

НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ

В.О. Кіцно, С.В. Поліщук, І.М. Гудков

ОСНОВИ РАДІОБІОЛОГІЇ ТА РАДІОЕКОЛОГІЇ

КИЇВ 2010

УДК 57.043:63:37.022
ББК 40.1я73
К 45

Рецензенти: Ю.О. Кутлахмедов, доктор біологічних наук, професор (Київський національний університет імені Тараса Шевченка), А.А. Булах, доктор біологічних наук, професор, зав. каф. біології (Міжнародний Соломонівський університет) і Ю.І. Посудін, доктор біологічних наук, професор, зав. каф. загальної та біологічної фізики (Національний аграрний університет)

В.О. Кічно, С.В. Поліщук, І.М. Гудков

Основи радіобіології та радіоекології: Навч. посіб. 3-тє видання. – К.:»Хай-Тек Прес», 2010. - 320 с.

Укладено на основі робочих програм для природничо-біологічних спеціальностей з розділів загальної, сільськогосподарської, лісogосподарської та ветеринарної радіобіології. Містить відомості з дозиметрії та радіометрії продукції сільського та лісового господарства та інших об'єктів навколишнього середовища. Наведено теми самостійних і лабораторних робіт та розглянуто порядок їх виконання. Дається методика вирішення завдань з прогнозування накопичення радіонуклідів в рослинах, в організмах тварин, в продукції рослинництва, тваринництва та лісокористування. Включено перелік орієнтовних контрольних тестів, список рекомендованої навчальної літератури.

Для засвоєння теоретичного курсу і виконання лабораторних занять студентами аграрних вищих навчальних закладів освіти III-IV рівнів акредитації.

Рекомендовано до видання навчально-методичною комісією ННІ охорони природи і біотехнологій НАУ, протокол № 1 від 28.08.2007 р.

ЗМІСТ

Вступ	8
1. ТЕМИ САМОСТІЙНИХ ЗАНЯТЬ	10
Тема 1. Норми радіаційної безпеки	10
1.1. Принципи нормування радіаційного впливу	10
1.2. Основні положення «Норм радіаційної безпеки України» (НРБУ-97)	11
1.3. Основні регламентні величини	12
1.3.1. Радіаційно-гігієнічні регламенти першої групи – контроль за практичною діяльністю	13
1.3.2. Радіаційно-гігієнічні регламенти другої групи – медичне опромінення населення	20
1.3.3. Радіаційно-гігієнічні регламенти третьої групи – втручання в умовах радіаційної аварії	21
1.3.4. Радіаційно-гігієнічні регламенти четвертої групи – зменшення доз хронічного опромінення населення	25
Тема 2. Основні санітарні правила протирадіаційного захисту	26
2.1. Загальні положення «Основних санітарних правил протирадіаційного захисту України» (ОСПУ-2001)	26
2.2. Типи джерел випромінювання	28
2.3. Групи радіотоксичності	29
2.4. Основні принципи захисту від закритих джерел іонізуючих випромінень	29
2.5. Вимоги до влаштування, обладнання та організації праці у радіологічній лабораторії при роботі з відкритими джерелами іонізуючих випромінень	33
2.5.1. Влаштування лабораторій	33
2.5.2. Поводження з радіоактивними відходами	35
2.5.3. Дезактивація робочих приміщень та устаткування лабораторії	37
2.5.4. Засоби індивідуального захисту та особистої гігієни при роботі з радіоактивними речовинами	38
Тема 3. Історія розвитку радіобіології та радіоекології	40
3.1. Визначення наук	41
3.2. Історія розвитку радіобіології та радіоекології	42
Тема 4. Фізичні основи радіобіології	46
4.1. Типи ядерних перетворень. Радіоактивність, одиниці її вимірювання	46
4.2. Характеристика іонізуючих випромінень та взаємодія їх з речовиною	48
4.3. Види доз іонізуючих випромінень, одиниці їх вимірювання, порядок розрахунку і застосування	56
4.4. Основні методи виявлення іонізуючих випромінень	60

4.5. Методи радіометрії	62
4.6. Призначення, класифікація, принцип будови, дозиметричних приладів	64
4.7. Прилади індивідуального дозиметричного контролю	66
4.7.1. Прилади, що працюють на базі іонізаційного методу виявлення іонізуючих випромінень	66
4.7.2. Прилади, що працюють на основі сцинтиляційного методу виявлення іонізуючих випромінень	70
4.7.3. Прилади, що працюють на базі фотографічного методу виявлення іонізуючих випромінень	71
4.7.4. Прилади, що працюють на основі люмінесцентного методу виявлення іонізуючих випромінень	72
4.8. Прилади загального дозиметричного контролю	73
Тема 5. Біологічна дія іонізуючих випромінень	82
5.1. Загальні уявлення про природу дії іонізуючих випромінень на живий організм	82
5.2. Радіобіологічні ефекти	83
5.2.1. Радіаційна стимуляція	83
5.2.2. Морфологічні зміни	85
5.2.3. Променева хвороба	86
5.2.4. Прискорення старіння і скорочення тривалості життя	89
5.2.5. Загибель	89
5.2.6. Генетичні зміни	90
5.2.7. Близькі і віддалені наслідки радіаційного ураження	91
5.3. Радіочутливість організмів	91
5.3.1. Радіочутливість рослин	92
5.3.2. Радіочутливість тварин	93
5.3.3. Радіочутливість риб	94
5.3.4. Радіочутливість амфібій і рептилій	95
5.3.5. Радіочутливість бактерій і вірусів	96
5.3.6. Радіочутливість рослинних угруповань	96
5.3.7. Особливості дії малих доз іонізуючих випромінень на живі організми	97
5.3.8. Критичні органи	98
5.4. Модифікація радіаційного ураження організму	99
5.4.1. Протипромєневий біологічний захист	99
5.4.2. Радіосенсибілізація	107
5.4.3. Післярадіаційне відновлення організму	108
Тема 6. Радіоекологія	121
6.1. Джерела радіоактивного забруднення об'єктів навколишнього середовища	122
6.1.1. Природні джерела	122
6.1.2. Джерела штучних радіонуклідів	124
6.2. Міграція радіонуклідів у навколишньому середовищі	126

6.3. Особливості надходження радіонуклідів у водні екосистеми	128
6.4. Розподіл радіонуклідів у морській екосистемі	130
6.5. Міграція радіонуклідів у прісноводних екосистемах	133
6.6. Загальні властивості прісноводних екосистем	133
6.7. Розподіл радіонуклідів серед компонентів прісноводних водоймищ	134
6.8. Надходження радіонуклідів у сільськогосподарські рослини та організм сільськогосподарських тварин	134
6.8.1. Надходження радіонуклідів у сільськогосподарські рослини	134
6.8.2. Надходження радіонуклідів у рослини з ґрунту	137
6.8.3. Надходження радіонуклідів у організм сільськогосподарських тварин	139
6.9. Накопичення радіонуклідів гідробіонтами	140
6.10. Прогнозування надходження радіонуклідів у сільськогосподарські рослини та організм тварин	142
6.11. Особливості ураження організму інкорпорованими радіоактивними речовинами	143
Тема 7. Ведення сільськогосподарського виробництва на забруднених радіонуклідами територіях	144
7.1. Основні принципи організації ведення сільського господарства на забруднених радіонуклідами територіях	145
7.2. Зниження надходження радіонуклідів у продукцію сільського господарства	147
7.2.1. Засоби зниження надходження радіонуклідів у сільськогосподарські рослини	147
7.2.2. Засоби зниження надходження радіонуклідів в організм сільськогосподарських тварин	156
7.3. Ведення особистого підсобного господарства в районах радіоактивного забруднення	158
7.4. Очищення продукції сільського господарства від радіонуклідів технологічною переробкою	159
7.4.1. Очищення продукції рослинництва	160
7.4.2. Очищення продукції тваринництва	161
Тема 8. Використання іонізуючих випромінень в сільському господарстві	162
8.1. Радіаційна техніка в сільському господарстві	163
8.2. Радіаційно-біологічні технології в рослинництві	165
8.2.1. Передпосівне опромінення насіння сільськогосподарських культур для прискорення проростання, розвитку та підвищення продуктивності рослин	165
8.2.2. Передсадивне опромінення органів вегетативного розмноження та розсади для прискорення розвитку і підвищення продуктивності рослин	166
8.2.3. Опромінення насіння і рослин з метою одержання нових сортів	167

8.2.4. Радіаційна біотехнологія подолання несумісності тканин і стимуляція зрощення при вегетативних щепленнях рослин	168
8.2.5. Радіаційна біотехнологія запобігання проростанню бульб, коренеплодів і цибулин при зберіганні	170
8.2.6. Використання іонізуючих випромінень для подовження строків зберігання ягід, фруктів та овочів	171
8.2.7. Радіаційна консервація продукції рослинництва і плідівництва	171
8.2.8. Радіаційні способи боротьби з комахами – шкідниками сільськогосподарських рослин	172
8.3. Радіаційно-біологічні технології в тваринництві	174
8.3.1. Радіаційне консервування кормів і поліпшення їх якості	174
8.3.2. Радіаційна біотехнологія подовження строків зберігання м'яса і м'ясних продуктів	175
8.3.3. Радіаційне знезараження деяких видів продукції тваринництва	176
8.3.4. Радіаційне знезараження стічних вод тваринницьких комплексів	176
8.3.5. Метод ізотопних індикаторів у дослідженнях в галузі сільськогосподарської біології. Радіоавтографія. Особливості використання стабільних ізотопів	178
Тема 9. Відбір і підготовка проб води, ґрунту, рослин, продуктів харчування рослинного і тваринного походження для радіометрії	185
9.1. Відбір проб води і інших рідин	188
9.2. Відбір проб ґрунту	188
9.3. Відбір проб рослин	188
9.4. Відбір проб зерна	189
9.5. Відбір проб коренебульбоплодів	189
9.6. Відбір проб трави і зеленої маси сільськогосподарських культур	190
9.7. Відбір проб грубих кормів (сіно, солома)	190
9.8. Відбір проб молока і молочних продуктів	191
9.9. Відбір проб м'яса і субпродуктів	191
9.10. Відбір проб риби	191
9.11. Відбір проб яєць	191
9.12. Відбір проб натурального меду	191
9.13. Підготовка проб до радіометрії	192
2. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ	194
<i>Лабораторна робота 1. Визначення потужності дози γ-випромінювання, створеного еталонним джерелом ¹³⁷Cs через захисні матеріали</i>	194
<i>Лабораторна робота 2. Визначення потоку β-частинок від еталонного джерела</i>	194
<i>Лабораторна робота 3. Визначення шару половинного послаблення</i>	195

	β-випромінення	
Лабораторна робота	4. Робота з приладами індивідуального дозиметричного контролю	196
Лабораторна робота	5. Вимірювання γ-фону в приміщеннях та на території радіометром СРП-68-01	197
Лабораторна робота	6. Вимірювання поверхневого забруднення радіометром-дозиметром МКС-04Н	198
Лабораторна робота	7. Визначення поверхневого забруднення α- та β-частинками радіометрами КРА-1 та КРБ-1	199
Лабораторна робота	8. Вимірювання питомої та об'ємної активності β-випромінюючих радіонуклідів на радіометрі "Бета"	199
Лабораторна робота	9. Експресне визначення за γ-випроміненням радіонуклідів цезію у воді, ґрунті, продуктах харчування та сільськогосподарській продукції на радіометрі РУБ-01-П6	201
Лабораторна робота	10. Визначення вмісту ¹³⁷ Cs в організмі людини радіометром РУБ-01-П-6	203
Лабораторна робота	11. Визначення забруднення території ¹³⁷ Cs за допомогою радіометра РУБ-01-П6	205
Лабораторна робота	12. Прижиттєве визначення вмісту ¹³⁷ Cs в м'язовій тканині сільськогосподарських тварин за допомогою гамма-спектрометру СУГ-1М	206
3.	СИТУАЦІЙНІ ЗАДАЧІ З ПРОГНОЗУВАННЯ РАДІОНУЦКЛІДНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПРОДУКЦІЇ РОСЛИННИЦТВА, ТВАРИННИЦТВА ТА ЛІСОКОРИСТУВАННЯ	208
3.1.	Прогнозування забруднення продукції рослинництва	208
3.2.	Прогнозуванню вмісту радіонуклідів в продукції тваринництва	213
3.3.	Прогнозування можливого радіонуклідного забруднення продукції лісового господарства	219
3.4.	Розрахунок і оцінка еквівалентної дози опромінення внаслідок надходження радіонуклідів в організм	224
4.	ОРІЄНТОВНІ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ З ПІДГОТОВКИ ДО ВИРІШЕННЯ ТЕСТОВИХ ЗАВДАНЬ	226
	Рекомендована література	239

ВСТУП

Радіобіологія, або радіаційна біологія, – це наука про дію іонізуючих випромінень на живі організми та їх угруповання.

Основним завданням радіобіології є вивчення закономірностей дії іонізуючих випромінень на живий організм з метою пошуку можливостей щодо керування його реакціями на цей фактор.

Об'єктами радіобіології є рослини і тварини, а також утворювані ними біоценози. Дослідження міграції радіоактивних речовин в об'єктах сільського та лісового господарства з метою мінімізації їх накопичення в продукції рослинництва, тваринництва і лісівництва є основою окремого напрямку радіобіології – радіоекології, або радіаційної екології.

Основна мета вивчення дисципліни “Радіобіологія” в аграрному навчальному закладі є оволодіння теоретичними основами про дію іонізуючих випромінень на живі організми, формування практичних навичок з оцінки радіаційної ситуації й розробки практичних заходів щодо ведення сільського і лісового господарства на забруднених радіоактивними речовинами угіддях.

Як результат вивчення радіобіології студент повинен *знати*: джерела іонізуючих випромінень у навколишньому середовищі, механізми дії випромінень на живі організми, радіочутливість основних видів сільськогосподарських і лісогосподарських рослин, тварин, принципи захисту живих організмів від випромінень, шляхи надходження радіоактивних речовин у рослини, організми тварин та людини, прийоми запобігання надходження і накопичення радіоактивних речовин у продукції рослинництва й тваринництва, методологію і технологію ведення окремих галузей сільськогосподарського та лісогосподарського виробництва на забруднених радіоактивними речовинами територіях; *уміти*: оцінювати радіаційну обстановку за допомогою дозиметричних приладів різних систем, проводити радіометричну експертизу об'єктів навколишнього середовища та сільськогосподарського виробництва, прогнозувати рівень можливого вмісту окремих радіонуклідів у рослинах при їх вирощуванні на забруднених угіддях, розробляти прийоми попередження надходження та накопичення радіонуклідів у продукції рослинництва, кормовиробництва, тваринництва, лісового господарства тощо.

Для студентів заочної форми навчання виконання трьох модульних завдань з радіобіології та радіоекології є обов'язковим. Модулі 1,2,3 (тестові завдання) – виконуються в період сесії під керівництвом викладача. Перед цим необхідно самостійно вивчити основні розділи і теми курсу “Радіобіологія та радіоекологія”.

Робота з радіоактивними речовинами та джерелами іонізуючих випромінень є потенційно небезпечною. Вона регламентується двома основними нормативно-правовими документами, що мають силу закону:

“Нормами радіаційної безпеки України” (НРБУ-97) та “Основними санітарними правилами протирадіаційного захисту України” (ОСПУ-2001).

У цих документах встановлені радіаційно-гігієнічні регламенти, які включають систему принципів, нормативів у галузі протирадіаційного захисту та правил радіаційної безпеки.

У 1997 р. Національна комісія з радіаційного захисту населення України (НКРЗУ) ухвалила НРБУ-97. Вони були розроблені з урахуванням останніх рекомендацій Міжнародної комісії з радіаційного захисту (МКРЗ), публікацій Міжнародного агентства з атомної енергії при ООН (МАГАТЕ), нормативно-технічних документів та найважливіших наукових розробок вітчизняних і закордонних фахівців, які були видані в 1985-1997 рр. Міністерство охорони здоров'я України (МОЗ) затвердило (17.07.97 р.) і ввело їх у дію з 01.01.98 р.

1. ТЕМИ САМОСТІЙНИХ ЗАНЯТЬ

Тема 1. Норми радіаційної безпеки

1.1. Принципи нормування радіаційного впливу

В основі нормування радіаційного впливу на організм людини лежать відомості про біологічну дію іонізуючих випромінювань. У результаті експериментів на тваринах та вивчення наслідків опромінення людей при ядерних вибухах, аваріях на підприємствах ядерно-паливного циклу, променевій терапії злоякісних пухлин та в інших екстремальних ситуаціях були встановлені реакції організму на гостре та хронічне опромінення - так звані радіобіологічні ефекти.

Прийнято виділяти дві основні групи радіобіологічних ефектів: нестохастичні та стохастичні.

Нестохастичні, або детерміністичні ефекти мають дозову залежність і проявляються в опроміненому організмі через відносно короткий термін. Із збільшенням дози опромінення зростає ступінь ураження органів і тканин - спостерігається ефект градування. Тобто залежно від величини і потужності дози розвивається той чи інший ефект (радіаційна стимуляція, морфологічні зміни, променева хвороба, загибель організму).

Стохастичні, або імовірні (випадкові) ефекти належать до віддалених наслідків опромінення організму. В основі виникнення стохастичних ефектів лежать викликані опроміненням мутації та інші порушення в клітинних структурах. Вони виникають як у соматичних (від латинського *somatos* - тіло), так і в статевих клітинах і зумовлюють утворення в опроміненому організмі злоякісних пухлин (соматико-стохастичні ефекти), а у нащадків - аномалії розвитку та інші порушення, які передаються спадково (генетичні ефекти).

Через обережність у галузі радіаційної безпеки прийнято вважати, що порога мутагенної дії радіації не існує, а значить немає і цілком безпечних доз. Тому опромінення людей в якій завгодно малій дозі відбувається з додатковим, відмінним від нуля, ризиком виникнення стохастичних ефектів. Із збільшенням дози опромінення імовірність виникнення стохастичних ефектів зростає лінійно. В цьому полягає суть концепції безпорогової лінійної залежності виникнення стохастичних ефектів.

Відповідні коефіцієнти лінійного зв'язку поміж дозою опромінення людей і виходом стохастичних ефектів встановлюються МКРЗ. Як правило, ці коефіцієнти виражають у вигляді додаткового виходу злоякісних пухлин та генетичних порушень і ступеня ризику загибелі організму від них, віднесених до колективної еквівалентної дози, що дорівнює 10^4 люд.-Зв (1 млн. люд.-бер).

Згідно з публікацією № 60 МКРЗ (1990 р.) при додатковій дії іонізуючого випромінювання, як одного з багатьох факторів мутагенезу, у дозі 1 сЗв (1 бер) ризик виникнення злоякісних пухлин зростає на 5%, а прояв

генетичних дефектів - на 0,4%. Це може призвести до додаткової загибелі людей.

Ризик загибелі людей від додаткового впливу іонізуючого опромінення в таких малих дозах значно менший ризику їх загибелі на самому безпечному виробництві. Але він є, тому дозове навантаження на організм людини суворо регламентовано. Цю функцію виконують норми радіаційної безпеки.

НРБУ-97 спрямовані на недопущення виникнення детерміністичних (соматичних) ефектів і на обмеження на прийнятому рівні виникнення стохастичних ефектів.

Радіаційно-гігієнічні регламенти, які встановлені НРБУ-97, побудовані на таких трьох принципах захисту:

- принцип виправданості;
- принцип неперевищення;
- принцип оптимізації.

Принцип виправданості вимагає, щоб користь від вибраної людської діяльності перевищувала сумарний збиток для суспільства чи людини.

Принцип неперевищення вимагає недопущення встановлених рівнів опромінення.

Принцип оптимізації вимагає, щоб користь від вибраної людської діяльності не тільки перевищувала пов'язаний з нею збиток, але й була максимальною, а дози опромінення мають бути якомога нижчими.

1.2. Основні положення “Норм радіаційної безпеки України” (НРБУ-97)

НРБУ-97 є основним державним документом, що встановлює систему радіаційно-гігієнічних регламентів для забезпечення прийнятих рівнів опромінення як для окремої людини, так і для суспільства взагалі.

Метою НРБУ-97 є визначення основних вимог до:

- охорони здоров'я людини від можливої шкоди, що пов'язана з опроміненням від джерел іонізуючого випромінювання;
- безпечної експлуатації джерел іонізуючого випромінювання;
- охорони навколишнього середовища.

НРБУ-97 встановлює два принципово відмінні підходи до забезпечення протирадіаційного захисту:

1. При всіх видах *практичної діяльності* в умовах нормативної експлуатації індустриальних та медичних джерел іонізуючого випромінювання.

2. При *втручанні*, яке пов'язано з опроміненням населення в умовах радіаційної аварії, а також при хронічному опроміненні за рахунок техногенно-підсилених джерел природного походження.

Практична діяльність – це діяльність людей, що пов'язана з використанням джерел іонізуючого випромінювання і спрямована на досягнення матеріальної чи іншої користі, яка призводить чи може призвести до контрольованого та передбаченого опромінення людей.

До практичної діяльності належать: виробництво джерел випромінювання, використання їх у промисловості, медицині, сільському господарстві,

наукових дослідженнях тощо, а також виробництво ядерної енергії, включаючи всі елементи ядерного паливного циклу.

Втручання - такий вид людської діяльності, що передбачає проведення контрольних заходів, які завжди спрямовані на зниження та відвернення неконтрольованого і непередбаченого опромінення або імовірності опромінення населення.

НРБУ-97 не поширюються на опромінення людини від природного радіаційного фону та на опромінення в умовах повного звернення практичної діяльності (джерел іонізуючого випромінювання) від регулювання.

1.3. Основні регламентні величини

НРБУ-97 включають чотири групи радіаційно-гігієнічних регламентних величин (регламентів):

Перша група - регламенти для контролю за практичною діяльністю, метою яких є додержання опромінення персоналу та населення на прийнятому для індивідууму та суспільства рівні, а також підтримання радіаційно-прийнятого стану навколишнього середовища та технології радіаційно-ядерних об'єктів. До цієї групи входять такі регламенти:

- ліміти доз;
- похідні рівні:
 - а) допустимі рівні
 - б) контрольні рівні

Друга група - регламенти, що мають за мету обмеження опромінення людини від медичних джерел. До цієї групи входять

- рекомендовані рівні.

Третя група - регламенти щодо відвернутої внаслідок втручань дози опромінення населення в умовах радіаційної аварії. До цієї групи входять:

- рівні втручань;
- рівні дії.

У межах цього документа *рівень втручань* – це рівень відвернутої дози опромінення, при перевищенні якої потрібно застосовувати конкретний контрзахід у разі аварійного чи хронічного опромінення.

Відвернута доза – це доза, яку передбачається відвернути за час дії контрзаходів, пов'язаних з цим втручанням.

Рівень дії – це величина, яка виражається у вигляді таких показників радіаційної обстановки, які можуть бути виміряні (потужність дози γ -випромінювання, об'ємна активність радіонуклідів у повітрі, концентрація їх у продуктах харчування, щільність радіоактивних випадань на ґрунті та ін.). При перевищенні встановлених показників розглядається питання про проведення втручань.

Четверта група - регламенти щодо відвернутої внаслідок втручань дози опромінення населення від техногенно-підсиленних джерел природного походження (гранітні кар'єри, будівельні матеріали, мінеральні добрива тощо). До цієї групи входять:

- рівні втручань;
- рівні дії.

Нормами радіаційної безпеки встановлюються такі категорії осіб, які зазнають опромінення:

Категорія А (персонал) - особи, які постійно чи тимчасово працюють безпосередньо з джерелами іонізуючих випромінень.

Категорія Б - особи, які безпосередньо не зайняті роботою з джерелами іонізуючих випромінень, але в зв'язку з розташуванням робочих місць у приміщеннях та на промислових майданчиках об'єктів з радіаційно-ядерними технологіями можуть отримати додаткове опромінення.

Категорія В - усе населення України.

1.3.1. Радіаційно-гігієнічні регламенти першої групи – контроль за практичною діяльністю

Ліміти дози та допустимі рівні

Числові значення лімітів доз встановлюються на рівнях, що виключають можливість виникнення детерміністичних ефектів опромінення і одночасно гарантують настільки низьку імовірність виникнення стохастичних ефектів опромінення, що вона є прийнятною як для окремих осіб, так і для суспільства в цілому.

Ліміт дози - основний радіаційно-гігієнічний норматив, метою якого є обмеження опромінення осіб категорій А, Б і В від усіх індустриальних джерел іонізуючого випромінення у ситуаціях практичної діяльності.

Для осіб категорій А, Б і В наведено в таблиці 1.

Оцінка допустимих рівнів зовнішнього і внутрішнього опромінення на організм людини проводиться не тільки за рівнем опромінення всього організму, але і за станом критичних органів, які в умовах нерівномірного опромінення організму призводять до найсуттєвішої шкоди здоров'ю людини або її нащадків. У порядку зменшення радіочутливості виділяють три групи критичних органів:

I – усе тіло, гонади, червоний кістковий мозок;

II – м'язи, щитовидна залоза, легені, печінка, селезінка, шлунково-кишковий тракт, кришталик ока та інші;

III – кісткова тканина, шкіряний покрив, передпліччя, ступні.

Річна ефективна доза - сума ефективної еквівалентної дози зовнішнього опромінення за рік та очікуваної ефективної еквівалентної дози внутрішнього опромінення, що сформоване надходженням радіонуклідів протягом року. Одиницею вимірювання цих доз у системі СІ є Зіверт, а позасистемною одиницею - бер (біологічний еквівалент рада). $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бер}$.

Період, за який розраховується очікувана еквівалентна доза внутрішнього опромінення, складає:

- для референтного віку - 50 років;

- для інших референтних років - 3 міс, 1 рік, 5 років, 10 років, 15 років.
- Референтний вік** – це інтервал часу між моментом надходження радіонуклідів та віком 70 років.

1. Ліміти річної ефективної та еквівалентної дози опромінення осіб, мЗв·рік

Ліміт доз	Категорія осіб		
	А	Б	В
Ліміт ефективної дози	20	2	1
<i>Ліміти еквівалентної дози зовнішнього опромінення:</i>			
• для кришталика ока	150	15	15
• для шкіри	500	50	50
• для кистей та стоп	500	50	-

З лімітом дози порівнюється сума ефективних доз опромінення від усіх індустриальних джерел випромінень. До цієї суми не включають:

- дозу, яку одержують при медичному обстеженні або лікуванні;
- дозу опромінення від природних джерел випромінення;
- дозу, що пов'язана з аварійним опроміненням населення;
- дозу опромінення від техногенно-підсилених джерел природного походження.

Крім ліміту доз для всіх категорій опромінених осіб, НРБУ-97 встановлюється такий перелік допустимих рівнів (ДР):

Для осіб категорії А:

- допустиме надходження (ДН) радіонукліда через органи дихання;
- допустима концентрація (ДК) радіонукліда в повітрі робочої зони;
- допустима щільність потоку частинок (ДЩП);
- допустима потужність дози зовнішнього опромінення (ДПД);
- допустиме радіоактивне забруднення (ДЗ) шкіри, спецодягу та робочих поверхонь.

Для осіб категорії Б:

- допустиме надходження (ДН) радіонукліда через органи дихання;
- допустима концентрація (ДК) радіонукліда в повітрі робочої зони.

Для осіб категорії В:

- допустиме надходження радіонукліда через органи дихання (ДНд) і травлення (ДНт);
- допустима концентрація радіонукліда в повітрі (ДКп) та питній воді (ДКв);
- допустимий скид і викид у довкілля радіонукліда.

Числові значення допустимих рівнів (ДН, ДК) для головних продуктів ядерного поділу наведено у таблицях 2 (категорія А) та 3 (категорія В).

Для осіб категорії Б величини ДР та ДЗ у 10 разів нижчі відповідних ДР і ДЗ для осіб категорії А.

Рівні допустимого радіоактивного забруднення шкіри, спецодягу та робочих поверхонь, знаходяться у таблиці 4. Ці числові значення є радіаційно-гігієнічними регламентами.

2. Допустимі рівні надходження основних дозоутворюючих радіонуклідів через органи дихання (ДН) та допустимі концентрації у повітрі робочих приміщень (ДК) для осіб категорії А

Радіонуклід	Період піврозпаду	ДН, Бк/рік	ДК, Бк/м ³
⁸⁶ Rb (рубідій)	18.66 доби	$6 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^3$
⁹⁰ Sr (стронцій)	29.12 року	$3 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^1$
⁹⁶ Zr (цирконій)	63.98 доби	$7 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^2$
¹⁰⁶ Ru (рутений)	368.2 доби	$7 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^1$
¹³¹ I (йод)	8.04 доби	$4 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^2$
¹³⁴ Cs (цезій)	2.06 року	$2 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^2$
¹³⁷ Cs (цезій)	30 років	$1 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^1$
¹⁴⁰ Ba (барій)	12.74 доби	$8 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^2$
¹⁴⁴ Ce (церій)	284.3 доби	$9 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^1$
²³⁹ Pu (плутоній)	24065 років	$6 \cdot 10^1$	$3 \cdot 10^{-2}$
²⁴¹ Am (америчій)	432.2 роки	$7 \cdot 10^1$	$3 \cdot 10^{-2}$

3. Допустимі рівні надходження основних дозоутворюючих радіонуклідів через органи дихання (ДНд), органи травлення (ДНт), допустимі концентрації в повітрі (ДКп) та питній воді (ДКв) для осіб категорії В

Радіонуклід	Період піврозпаду	ДНд Бк/рік	ДНт Бк/рік	ДКп Бк/м ³	ДКв Бк/м ³
⁸⁶ Rb	18.66 доби	$4 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^5$
⁹⁰ Sr	29.12 року	$6 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^4$
⁹⁶ Zr	63.98 доби	$6 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^5$	4	$5 \cdot 10^5$
¹⁰⁶ Ru	368.2 доби	$9 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^1$	$5 \cdot 10^4$
¹³¹ I	8.04 доби	$8 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	4	$2 \cdot 10^4$
¹³⁴ Cs	2.06 року	$3 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^4$	1	$7 \cdot 10^4$
¹³⁷ Cs	30 років	$2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^4$	$8 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^5$
¹⁴⁰ Ba	12.74 доби	$7 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^4$	5	$1 \cdot 10^5$
¹⁴⁴ Ce	284.3 доби	$1 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^4$	$6 \cdot 10^1$	$7 \cdot 10^4$
²³⁹ Pu	24065 років	2	$2 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^3$
²⁴¹ Am	432.2 роки	2	$3 \cdot 10^2$	$4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^3$

4. Допустимі рівні загального радіоактивного забруднення робочих поверхонь, шкіри (протягом робочої зміни), спецодягу та засобів індивідуального захисту, част./хв/см³

Об'єкт забруднення	α-активні нукліди		β-активні нукліди
	окремі*	інші	
Непошкоджена шкіра, спецбілизна, рушники, внутрішня поверхня лицьових частин засобів індивідуального захисту	1	1	100**
Основний спецодяг, внутрішня поверхня додаткових засобів індивідуального захисту	5	20	800
Поверхні приміщень постійного перебування персоналу, зовнішня поверхня спецвзуття	5	20	2000
Поверхні приміщень періодичного перебування персоналу	50	200	8000
Зовнішня поверхня додаткових засобів індивідуального захисту, що знімаються у саншлюзах	50	200	10000

* До окремих належать α-випромінюючі радіонукліди, допустима концентрація яких у повітрі робочих приміщень менша 0,3 Бк/м³.

** Допустимі рівні забруднення шкіри, спецодягу, внутрішньої поверхні лицьових частин засобів індивідуального захисту для ізотопів ⁹⁰Sr + ⁹⁰Y, ¹⁴⁴Ce + ¹⁴⁴Pr, ¹⁰⁶Ru + ¹⁰⁶Rh встановлюються в 5 разів меншими, тобто 20 част/хв/см².

Одним із важливих заходів зменшення доз опромінення осіб категорії В є встановлення гігієнічних регламентів вмісту окремих радіонуклідів у продуктах харчування та питній воді. Наказом МОЗ від 03.05.2006 р. № 256 затверджені Державні гігієнічні нормативи “Допустимі рівні вмісту радіонуклідів ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr у продуктах харчування та питній воді” (ДР-2006), що запроваджені з метою подальшого зниження дози внутрішнього опромінення населення шляхом обмеження надходження радіонуклідів з продуктами харчування та стимуляції створення і дотримання виробниками необхідних умов одержання чистої продукції на забруднених територіях. Числові значення допустимих рівнів вмісту радіонуклідів ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr у продуктах харчування та питній воді наведені в таблиці 5.

Контрольні рівні

З метою фіксації досягнутого рівня радіаційної безпеки на даному радіаційно-ядерному об'єкті, населеному пункті і навколишньому середовищі встановлюються контрольні рівні.

Значення останніх визначається адміністрацією об'єкта на рівні, нижчому за відповідні ліміти доз та допустимі рівні. Допускається встановлювати контрольні рівні для окремого радіонукліда та шляху його надходження, включаючи введення контрольних рівнів на вміст радіонукліда в окремому продукті харчування або на окремій території.

5. Значення допустимих рівнів вмісту радіонуклідів ^{137}Cs і ^{90}Sr у продуктах харчування та питній воді (ДР-2006), Бк/кг, Бк/л

№ з/п	Найменування продукту	ДР _{Cs} , Бк/кг	ДР _{Sr} , Бк/кг
1	Зерно, борошно-круп'яні та хлібобулочні вироби		
	1.1. Зерно продовольче, у т.ч. пшениця, жито, овес, ячмінь, просо, гречка, рис, кукурудза, сорго та інших зернових культур	50	20
	1.2. Зерно бобових сушене, у т.ч. горох, квасоля, сочевиця, боби та інше	50	30
	1.3. Борошно, борошняні хлібопекарські суміші, крупа, крохмаль, зерно плющене чи перероблене в пластівці; макаронні вироби, круп'яні вироби, толокно; напівфабрикати зернові; готові продукти, виготовлені із зерна, зернових культур, у т.ч. сухі сніданки, мюслі, продукти, одержані шляхом здуття чи обсмажування зернових та інше	30	10
	1.4. Соеві боби сушені, продукти переробки сої, у т.ч. соєвий білок, борошно, готові вироби та інше	50	30
	1.5. Хліб та хлібобулочні вироби, у т.ч. з добавками; продукти борошняні, у т.ч. борошняні кондитерські вироби, напівфабрикати з тіста	20	5
2	Молоко та молочні продукти		
	2.1. Сире товарне молоко для промислової переробки (крім продуктів дитячого харчування), молоко рідке та вершки, сироватка молочна; продукти кисломолочні, у т.ч. сири свіжі, йогурти, йогуртні продукти, десерти кисломолочні свіжі, напої кисломолочні та інші; продукти, вироблені на основі молока та вершків, у т.ч. з додаванням немолочних компонентів (морозиво, виготовлене на основі молока чи вершків, торти з морозива, напої молочні, десерти молочні та інше)	100	20
	2.2. Масло вершкове (у т.ч. масло коров'яче, спреди, молочний жир та інше); бутербродні пасти на основі масла вершкового	200	40
	2.3. Сири сичужні тверді, сири розсольні, сири плавлені, сири голубі	200	100
	2.4. Молоко та вершки концентровані або згущені, молоко та вершки згущені з наповнювачами	300	60
	2.5. Продукти молочні сухі, у т.ч. молоко, вершки, казеїн та інші; сухі молочні суміші, концентрати харчові на основі молока	500	100
	2.6. Сире товарне молоко для промислової переробки (для продуктів дитячого харчування)	40	5
3	М'ясо та м'ясопродукти		
	3.1. М'ясо забійних тварин, птиці (свіже, охолоджене, заморожене) без кісток для промислової переробки, м'ясо, харчові субпродукти (у т.ч. кишки-сирець, кров харчова) забійних тварин та свійської птиці свіжі, заморожені, різних способів обробки; продукти їх переробки, у т.ч. напівфабрикати, готові продукти, ковбаси, консерви м'ясні та м'ясо-рослинні	200	20
	3.2. М'ясо диких тварин та птиці	400	40
	3.3. Жир забійних тварин (у т.ч. шпик) та свійської птиці, продукти його переробки	100	30

	3.4. М'ясо забійних тварин, свійської птиці сушене та продукти його переробки	400	40
	3.5. Кістки тварин та птиці всіх видів	50	200
	3.6. Желатин	150	50
4	Риба, нерибні об'єкти промислу та продукти їх переробки		
	4.1. Риба свіжа та морожена, різних способів обробки; риб'ячий жир, ікра (у т.ч. штучна), молочко та інші рибні продукти; продукти переробки, у т.ч. рибні напівфабрикати, готові продукти з риби (масло рибне, масло ікорне, рибні пасти та інші), рибні пресерви та консерви	150	35
	4.2. Нерибні об'єкти промислу (ракоподібні, молюски та інші водяні безхребетні, м'ясо земноводних, плазунів та морських ссавців) свіжі та морожені, різних способів обробки; продукти їх переробки, у т.ч. напівфабрикати, готові продукти, консерви; жир морських ссавців	150	35
	4.3. Сушені або в'ялені риба та нерибні об'єкти промислу (ракоподібні, молюски та інші водяні безхребетні, м'ясо земноводних, плазунів та морських ссавців)	300	70
	4.4. Водорості, морські трави та продукти їх переробки	200	70
	4.5. Водорості та морські трави сушені	600	200
5	Яйця птиці та продукти їх переробки		
	5.1. Яйця птиці та рідкі яєчні продукти; напівфабрикати та готові вироби з яєць птиці	100	30
	5.2. Сушені продукти переробки яєць птиці, у т.ч. яєчний порошок, сушені білок, жовток; сухі суміші, вироблені на основі яєць птиці	400	100
6	Овочі та продукти їх переробки		
	6.1. Картопля свіжа та продукти переробки картоплі, у т.ч. картопля консервована, картопля заморожена; кулінарні картопляні вироби, напівфабрикати з картоплі та інше	60	20
	6.2. Свіжі овочі (листові, у т.ч. столова зелень, плодові, баштанні, коренеплоди), бобові, кукурудза цукрова, гриби (культивовані); продукти переробки овочів, у т.ч. напівфабрикати, готові продукти, соки, консерви та інше	40	20
	6.3. Овочеві концентрати (у т.ч. томатна паста, томатні соуси, кетчупи, тощо)	120	50
	6.4. Сушені овочі (у т.ч. картопля), гриби (культивовані) та овочеві суміші; продукти переробки сушених овочів	240	80
7	Фрукти та ягоди		
	7.1. Фрукти та ягоди свіжі, заморожені, консервовані; соки фруктові та ягідні	70	10
	7.2. Продукти переробки фруктів та ягід (варення, пасти, джеми, повидло, желе та інші)	140	20
	7.3. Сухі фрукти та ягоди, у т.ч. продукти сублімаційної сушки, сухі суміші на фруктовій та ягідній основі	280	40
	7.4. Горіхи та продукти їх переробки	70	10
	7.5. Суміші соків фруктових-ягідних з овочевими	50	15
8	Цукор, кондитерські вироби (карамель, ірис, пастила, мармелад, тощо), желейні вироби, шоколад та вироби з нього; гумка жувальна	50	30
9	Гриби та ягоди дикорослі свіжі, заморожені, консервовані	500	50

10	Гриби та ягоди дикорослі сушені	2500	250
11	Насіння олійних культур (соняшнику, кунжуту, арахісу, маку та інших, за винятком сої); продукти їх переробки, за винятком рослинних жирів та олій	70	10
12	Жири та олії рослинні, продукти, вироблені на їх основі, у т. ч. маргарини, кулінарні жири, кондитерські жири, креми та інші	100	30
13	Чай байховий, пресований, ароматизований, з рослинними домішками; кава зелена, смажена (у зернах, мелена, розчинна); какао-боби, какао терте, какао-порошок; сухі розчинні напої на основі чаю, какао, кави та замінників кави (обсмажений солод, цикорій та інше)	200	50
14	Вода питна (з підземних джерел питного водопостачання вода нормується і за вмістом природних радіонуклідів)	2	2
15	Напої		
	15.1. Мінеральна вода (з підземних джерел питного водопостачання вода нормується і за вмістом природних радіонуклідів)	10	5
	15.2. Безалкогольні та слабоалкогольні напої, у т.ч. на основі рослинної сировини; пиво, квас, морозиво соковмісне; концентрати напоїв, які не включені до інших розділів	20	20
	15.3.Алкогольні напої (за винятком пива)	50	30
16	Лікарські рослини сушені; фіточаї, мате (парагвайський чай), каркаде (суданська троянда) та інші	200	100
17	Тютюн та тютюнові вироби	120	50
18	Біологічно активні добавки (БАД) усіх видів; екстракти та загущувачі харчові рослинного походження (речовини з вмістом пектину, пектинати та пектати; агар-гар та інші клеї та загусники рослинного походження)	200	50
19	Прянощі; спеції та їх суміші; приправи, у т.ч. соуси (соевий соус, грибний та інші), за винятком томатних соусів, гірчиця (готова, гірчичний порошок), салатні заправки, майонез та інше	120	50
20	Харчові добавки та їх суміші (барвники натуральні та штучні, стабілізатори, емульгатори, ароматизатори, наповнювачі та інші); оцет; сода харчова; дріжджі; харчові концентрати для виготовлення перших і других страв, десертів, мусів, кремів та ін., які не включені до переліку в інших пунктах; супи та бульйони швидкого приготування; солодовий екстракт	150	50
21	Сіль кухонна харчова та сольові суміші	120	30
22	Мед та продукти бджільництва	200	50
23	Продукти дитячого харчування		
	Готові продукти дитячого харчування, сухі молочні суміші	40	5

При перевищенні контрольних рівнів адміністрацією об'єкта проводиться розслідування з метою виявлення та усунення причин, що призвели до перевищення. Контрольні рівні регулярно переглядаються, враховуючи поточний радіаційний стан на об'єкті.

Особливості опромінення осіб категорії А

Для осіб категорії А розподіл дози опромінення протягом календарного року не регламентується.

Особи, молодші за 18 років, не допускаються до роботи з джерелами іонізуючих випромінювань.

Для осіб, в яких річна ефективна доза опромінення може перевищити 10 мЗв на рік, вводиться обов'язковий індивідуальний дозиметричний контроль.

У разі небезпечних ситуацій (недопущення розвитку радіаційної аварії або при проведенні деяких технологічних операцій на радіаційно-ядерному об'єкті та ін.) для осіб категорії А дозовий ліміт підвищується до 50 мЗв за 1 календарний рік.

Опромінення персоналу в дозах від 50 до 100 мЗв на рік дозволяється місцевими органами Державного санітарно-епідеміологічного нагляду. При цьому сумарна доза опромінення за 10 років роботи не повинна перевищувати 200 мЗв.

У виняткових випадках опромінення персоналу в дозах 100-250 мЗв на рік може бути дозволено МОЗ один раз протягом усієї трудової діяльності працівника з його письмової згоди.

Особи, які зазнали одноразового опромінення в дозах 100-250 мЗв, мають бути виведені із зони опромінення і направлені на медичне обстеження.

Забороняється підвищене опромінення жінок до 45 років та чоловіків, молодших 30 років.

Особи з населення, які залучаються до проведення аварійних та рятувальних робіт, на цей період прирівнюються до категорії А.

1.3.2. Радіаційно-гігієнічні регламенти другої групи - медичне опромінення населення

Медичне опромінення спрямоване на досягнення тільки очевидної користі для конкретної людини або суспільства у вигляді отримання необхідної діагностичної чи наукової інформації або терапевтичного ефекту.

Повторність однотипних діагностичних досліджень (процедур) допускається тільки необхідністю і можливістю отримання нової чи розширеної інформації.

При проведенні профілактичного обстеження населення (флюорографії) річна ефективна доза не повинна перевищувати 1 мЗв.

Для осіб, які добровільно надають допомогу пацієнтам при проведенні діагностичних та терапевтичних процедур, доза не повинна перевищувати 5 мЗв на рік.

Вагітні жінки, а також жінки у період грудного годування дитини мають уникати медичного опромінення, за винятком випадків, що загрожують життю.

При проведенні радіологічних процедур (введення радіофармацевтичних препаратів) потужність дози γ -випромінення на

відстані 0,1 м від пацієнта не повинна перевищувати 1 мР за год. (при виході з радіологічного відділення).

1.3.3. Радіаційно-гігієнічні регламенти третьої групи - втручання в умовах радіаційної аварії

Види радіаційних аварій та їх класифікація

Радіаційна аварія - незапланована подія на будь-якому об'єкті з радіаційною чи радіаційно-ядерною технологією, при якій відбувається втрата контролю над джерелом випромінення і реальне (або потенційне) опромінення людей.

Усі радіаційні аварії поділяються на дві групи:

а) аварії, які не супроводжуються радіоактивним забрудненням виробничих приміщень, промайданчика об'єкта та навколишнього середовища;

б) аварії, в результаті яких відбувається розгерметизація закритих джерел і радіоактивне забруднення середовища виробничої діяльності та проживання людей.

Аварії першої групи супроводжуються додатковим зовнішнім γ -, рентгенівським, β - і нейтронним опроміненням людей.

Аварії другої групи супроводжуються додатковим зовнішнім і внутрішнім опроміненням людей.

Масштаб радіаційної аварії визначається розміром території, а також чисельністю людей, які втягнуті до неї. За своїм масштабом радіаційні аварії поділяють на два класи:

- промислові;
- комунальні.

До класу промислових аварій належать такі, що не поширюються за межі території виробничих приміщень і промайданчика об'єкта, а аварійне опромінення може отримати лише персонал.

До класу комунальних належать аварії, наслідки яких поширюються як на територію об'єкта, так і на оточуючі території, де проживає населення.

Комунальні радіаційні аварії поділяють на:

а) локальні, якщо в зоні аварії проживає населення загальною чисельністю до 10 тисяч чоловік;

б) регіональні - території населених пунктів, адміністративних районів, областей, де чисельність населення перевищує 10 тисяч чоловік;

в) глобальні - аварії, в результаті яких значна частина, або вся територія країни і її населення зазнає негативного впливу.

У розвитку комунальних аварій виділяють три основні часові фази:

а) рання (гостра) фаза - тривалість від декількох годин до одного-двох місяців;

б) середня фаза, або фаза стабілізації - починається через один-два місяці і завершується через 1-2 роки;

в) пізня фаза, чи фаза відновлення - починається через 1-2 роки після початку аварії.

Населення в умовах радіаційної аварії

При виникненні комунальної радіаційної аварії окрім термінових робіт щодо стабілізації радіаційного стану, включаючи відновлення контролю над джерелом, мають бути одночасно здійснені заходи, спрямовані на:

а) зведення до мінімуму кількості осіб з населення, які зазнають аварійного опромінення;

б) запобігання чи зниження рівня радіаційного забруднення продуктів харчування, питної води, сільськогосподарської сировини та угідь, об'єктів довкілля (повітря, води, ґрунту, рослин тощо), а також будівель і споруд.

Протирадіаційний захист населення в умовах радіаційної аварії базується на системі контрзаходів. При реалізації контрзаходу, як правило, відвертається не вся доза від аварійного джерела. Деяка її частка зберігається, це так званий залишковий (невідвернутий) рівень дози опромінення, запобігання якої даним контрзаходом стає неприйнятним тому, що суттєво збільшується збиток.

Залежно від масштабів і фаз радіаційної аварії, а також від рівнів прогнозованих доз опромінення контрзаходи умовно поділяють на термінові, невідкладні та довгострокові.

Термінові контрзаходи

До термінових належать такі контрзаходи, проведення яких спрямоване на запобігання виникненню в осіб з населення важких радіаційних уражень, що виявляється клінічно. До таких контрзаходів належать укриття та евакуація.

Рівні безумовно виправданих термінових контрзаходів (втручань) визначаються значеннями прогнозованих поглинених доз при гострому опроміненні за період менше 2 діб (табл. 6) та значеннями річних еквівалентних доз при хронічному опроміненні (табл. 7).

6. Рівні безумовно виправданого термінового втручання при гострому опроміненні

Орган або тканина	Прогнозована поглинена доза за період, менший 2 діб, Гр*
Все тіло (кістковий мозок)	1
Легені	6
Шкіра	3
Щитовидна залоза	5
Кришталик ока	2
Гонади	2
Плід	0,1

*Гр (грей) - одиниця поглиненої дози іонізуючого випромінювання у системі СІ.

7. Рівні відвернутої річної еквівалентної дози хронічного опромінення органів та тканин, при яких термінове втручання безумовно виправдане

Орган або тканина	Річна еквівалентна доза, Зв/рік
Гонади	0.2
Кришталік ока	0.1
Кістковий мозок	0.4

Невідкладні контрзаходи

Контрзаходи кваліфікуються як невідкладні, якщо їх реалізація спрямована на відвернення детерміністичних ефектів.

Основні та найбільш ефективні невідкладні контрзаходи на початковій фазі аварії такі: укриття, евакуація, йодна профілактика та обмеження перебування людей на відкритому повітрі.

Для проведення цих контрзаходів вводяться рівні виправданості та безумовної виправданості, які визначаються значеннями відвернутої дози за перші два тижні після аварії (табл. 8).

8. Найнижчі межі виправданості та рівні безумовної виправданості для невідкладних контрзаходів

Контрзахід	Відвернута доза за перші 2 тижні після аварії					
	Межі виправданості			Рівні безумовної виправданості		
	мЗв	мГр		мЗв	мГр	
	на все тіло	на щито-видну залозу	на шкіру	на все тіло	на щито-видну залозу	на шкіру
Укриття	5	50	100	50	300	500
Евакуація	50	300	500	500	1000	3000
Йодна профілактика:						
- діти	-	50	-	-	200	-
- дорослі	-	200	-	-	500	-
Обмеження перебування на відкритому повітрі:						
- діти	1	20	50	10	100	300
- дорослі	2	100	200	20	300	1000

Крім основних контрзаходів, на ранній фазі аварії застосовуються допоміжні контрзаходи, доцільність введення яких розглядається у кожній конкретній ситуації, але для них рівні втручань не вводяться (заходи пилоподавлення, спеціальний режим роботи підприємств, шкіл, дитячих садків та ін.).

Довгострокові контрзаходи

До довгострокових належать контрзаходи, спрямовані на відвернення доз опромінення, значення яких, як правило, нижче порога виникнення детерміністичних ефектів у осіб з населення.

Довгострокові контрзаходи включають: тимчасове виселення, обмеження вживання забруднених радіонуклідами води і продуктів харчування на досить тривалий час, обмеження сільськогосподарської діяльності, дезактивацію території та забруднених будівель і споруд, гідрологічні, лісотехнічні та інші контрзаходи.

Довгострокові контрзаходи проводять після повного завершення аварійного радіоактивного забруднення території з урахуванням аналізу результатів детального радіаційного моніторингу.

Втручання слід вважати безумовно виправданим, якщо довгостроковим контрзаходом запобігається така прогнозована доза, яка перевищує значення рівнів, наведених у таблиці 9, або пов'язаних з ним рівнів дій.

9. Нижні межі виправданості, безумовно виправдані рівні втручання і рівні дії для прийняття рішення про переселення

Категорії для прийняття рішення	Нижні межі виправданості	Безумовно виправдані рівні втручання і рівні дії
Доза, відвернута за період переселення, Зв	0.2	1
Доза, відвернута за перші 12 місяців після аварії, Зв	0.05	0.5
Щільність забруднення території довгоживучими радіонуклідами, Бк/м ²		
- ¹³⁷ Cs	400	4000
- ⁹⁰ Sr	80	400
- α-випромінювачі (плутоній, америцій та інші)	0.5	4
Потужність дози γ-випромінювання на відкритій місцевості, мГр/с		
-мононуклідне забруднення ¹³⁷ Cs	0.3	3
-забруднення на 15-й день після аварії	5	50

Заборона чи обмеження споживання продуктів харчування місцевого виробництва вводиться на ранній, середній і, частково, пізній фазах аварії.

Проте використання значень рівнів дії, вказаних в таблиці 10, вимагає постійного застосування процедури зважування за принципом «користь - збиток», оскільки не виключені ситуації, коли при вкрай обмежених можливостях підвозу чистих продуктів харчування, заборона чи обмеження споживання місцевих продовольчих ресурсів може викликати пряму загрозу голоду. При цьому наслідки для здоров'я людей дефіциту продуктів можуть

виявитися набагато важчими, аніж ті, які пов'язані з радіаційним фактором – стохастичними ефектами.

Рішення на проведення інших довгострокових контрзаходів приймається на основі процедури зважування за принципом «користь-збиток». На них не вводяться ні межі виправданості, ні безумовні рівні втручання.

Будь-який довгостроковий контрзахід має бути припинений, якщо оцінки доз показують, що подальше його продовження не виправдане, оскільки величина невідвернутого залишкового рівня дози виявляється нижче прийнятого.

НРБУ-97 встановлює такий залишковий прийнятий сумарний рівень ефективної дози:

- а) 1 мЗв за рік для хронічного опромінення тривалістю понад 10 років;
- б) 5 мЗв сумарно за період 2 роки;
- в) 15 мЗв сумарно за перші 10 років.

Ці значення враховуються при визначенні границь зони комунальної аварії.

10. Нижні межі виправданості та безумовно виправдані рівні втручання і дії прийняття рішення про вилучення, заміну й обмеження вживання забруднених радіонуклідами продуктів харчування

Критерії для прийняття рішення	Найнижчі межі виправданості	Безумовно виправдані рівні втручання і рівні дії
Відвернута доза внутрішнього опромінення, мЗв:	5	30
• за перший післяаварійний рік, мЗв	1	30
• за другий і наступні роки, мЗв	1	5
Радіоактивне забруднення молока, Бк/л*		
а) ^{131}I :		
• для дітей	100	200
• для дорослих	400	1000
б) ^{137}Cs	100	400
в) ^{90}Sr :		
• для дітей	5	50
• для дорослих	20	200

* Для інших немолочних продуктів харчування рівні дії у два рази вищі.

1.3.4. Радіаційно-гігієнічні регламенти четвертої групи – зменшення доз хронічного опромінення населення

Регламенти цієї групи спрямовані на зменшення доз хронічного опромінення населення від техногенно-посилених джерел природного

походження, які в результаті господарської та виробничої діяльності людини були піддані концентруванню або збільшилась їх доступність, внаслідок чого утворилося додаткове до природного радіаційного фону опромінення.

НРБУ-97 вводять обмеження на вміст природних радіонуклідів у мінеральній сировині та будівельних матеріалах, питній воді, мінеральних добривах, виробках із скла, порцеляни та глини, мінеральних барвниках, а також на концентрацію ізотопів радону в повітрі приміщень та робочих місць, на потужність дози γ -випромінення у приміщеннях.

Будівельні матеріали і мінеральна сировина з питомою активністю ^{226}Ra (радій), ^{232}Th (торій) і ^{40}K (калій) у межах 370 Бк/кг використовують без обмежень для всіх видів будівництва (1 клас); активність 370-740 Бк/кг - для промислового будівництва та будівництва шляхів (2 клас); активністю 740-1350 Бк/кг - для будівництва підземних споруд, спорудження гребель, шляхів поза межами населених пунктів (3 клас).

Для матеріалів, що мають естетичну цінність питома активність не повинна перевищувати 3700 Бк/кг. Їх використовують з обмеженнями для внутрішнього та зовнішнього оздоблення об'єктів громадського призначення.

Потужність дози γ -випромінення в приміщенні:

а) у житлових приміщеннях, дитячих та лікувально-профілактичних закладах, які проектується, будуються та реконструюються потужність дози становить не більше 30 мкР/год;

б) у приміщеннях будівель і споруд, які експлуатуються з постійним перебуванням людей, у тому числі житлових, - 50 мкР/год (за винятком дитячих, санаторно-курортних та оздоровчо-лікувальних закладів).

Рівень ^{222}Rn (радон) у приміщеннях та спорудах, які будуються та реконструюються для експлуатації з постійним перебуванням людей, становить 50 Бк/м³ повітря; ^{220}Rn (торон) - 3 Бк/м³. У приміщеннях та спорудах, які експлуатуються з постійним перебуванням людей, рівень ^{222}Rn у зоні дихання становить 100 Бк/м³, а для ^{220}Rn - 6 Бк/м³ (для дитячих та лікувально-профілактичних закладів - у два рази нижчий).

Питома активність природних радіонуклідів у воді джерел господарсько-питного водопостачання не повинна перевищувати:

- для ^{222}Rn - 100 Бк/л;
- для ізотопів урану - 1 Бк/л;
- для ^{226}Ra - 1 Бк/л.

Допустима концентрація (питома активність) ^{238}U та ^{232}Th у мінеральних добривах становить 1,9 кБк/кг.

Тема 2. Основні санітарні правила протирадіаційного захисту

2.1. Загальні положення “Основних санітарних правил протирадіаційного захисту України” (ОСПУ-2001)

Дія цих “Правил” поширюється на *всі види практичної діяльності*, що включають: виробництво джерел і використання іонізуючого випромінювання або радіоактивних речовин для медичних, промислових, ветеринарних, сільськогосподарських потреб, навчання, підготовки кадрів, наукових досліджень, включаючи будь-яку пов’язану з таким використанням діяльність, що може створювати загрозу опромінення; виробництво ядерної енергії, у тому числі всі види діяльності в межах ядерного паливного циклу чи будь-якої його частини, що пов’язана або може бути пов’язана з опроміненням; практичну діяльність, пов’язану з опроміненням від природних джерел, що визначені МОЗ як такі, що потребують контролю; будь-які інші види практичної діяльності, визначені МОЗ.

Вимоги цих “Правил” поширюються на будь-яке опромінення персоналу і населення, що супроводжує практичну діяльність. Відповідно до положень НРБУ-97 обмеженню підлягають:

- поточне опромінення,
- потенційне опромінення.

Джерела в рамках будь-якої практичної діяльності, на яку відповідно до положень НРБУ-97 поширюються вимоги цих “Правил”, включають:

- радіоактивні речовини і пристрої, що їх містять, чи пристрої, які створюють випромінювання, включаючи споживчу продукцію, закриті та відкриті джерела, генератори випромінювання, що включають пересувне радіографічне устаткування;

- пристосування й об’єкти, на яких є радіоактивні речовини чи пристрої, що створюють випромінювання, включаючи опромінюючі пристрої, рудники і підприємства з переробки радіоактивних руд, пристрої з переробки радіоактивних речовин, ядерні пристрої й пристосування (технологічні лінії) для поводження з радіоактивними відходами;

- будь-які інші джерела, визначені МОЗ.

Зі сфери дії цього документа виключаються такі джерела опромінення природного походження:

- джерела, пов’язані з природним вмістом ^{40}K , ^{226}Ra , ^{87}Rb та інших елементів в організмі;

- інші техногенно підсилені джерела природного походження, стосовно яких МОЗ не передбачені спеціальні умови регулювання і контролю.

Будь-яка практична діяльність із джерелами іонізуючих випромінень здійснюється з дозволу Державної санітарно-епідеміологічної служби МОЗ (Держсанепідслужби) і Міністерства охорони навколишнього природного середовища та ядерної безпеки (Мінекобезпеки).

Дозвільним документом Мінекобезпеки на проведення робіт з джерелами іонізуючого випромінювання є Ліцензія. Даний документ видається установі в разі виконання нею технічних норм, правил і стандартів щодо радіаційної безпеки.

Документом Держсанепідслужби, що підтверджує право виконання організацією (підприємством) робіт з джерелами іонізуючого випромінювання є

Санітарний паспорт. Він не видається до того часу, поки установа не забезпечить умови, необхідні для виконання вимог радіаційно-гігієнічних регламентів НРБУ-97 та інших вимог санітарного законодавства. Термін дії Санітарного паспорта встановлюється в ньому, але не більше 5 років.

Орган Держсанепідслужби, який видав Санітарний паспорт, здійснює санітарний нагляд, у тому числі за дотриманням умов, на яких він виданий, за списком дозволених у ньому робіт тощо. Після закінчення терміну дії Санітарного паспорта всі роботи з джерелами іонізуючих випромінень мають бути припинені.

2.2. Типи джерел випромінення

Забезпечення радіаційної безпеки професійно зайнятих осіб, як правило, вимагає проведення цілого комплексу захисних заходів залежно від конкретних умов праці з джерелами іонізуючих випромінень і, передусім, від типу джерела випромінення.

Розрізняють закриті і відкриті джерела іонізуючих випромінень.

Закрите джерело іонізуючих випромінень – радіоактивні речовини у твердій захисній оболонці з неактивного матеріалу чи інкапсульована у тверду неактивну захисну оболонку - досить міцну, щоб запобігти будь-якому розповсюдженню речовини за нормальних умов експлуатації та зносу протягом установленого терміну служби, а також в умовах непередбачених неполадок. Поняття "закрите джерело" включає як радіоактивні речовини, так і оболонку чи капсулу, за винятком таких випадків:

а) капсула й оболонка призначені тільки для збереження, транспортування і поховання радіоактивних речовин;

б) радіоактивні речовини в ядерному реакторі або ядерний тепловиділяючий елемент (твел).

До них належать γ -опромінювачі різноманітного призначення, джерела α - і β -випромінення та інші, що виготовлені у вигляді дисків, сплавів, стрижнів, сталевих ампул, а також рентгенівські апарати. Вони можуть викликати тільки зовнішнє опромінення, тому всі захисні заходи розробляються з урахуванням цієї обставини.

Закриті джерела іонізуючих випромінень за характером впливу можна поділити на дві групи:

- 1) джерела випромінення безперервної дії;
- 2) джерела, що генерують випромінення періодично.

До першої групи належать γ -установки різного призначення, нейтронні, β - і γ -випромінювачі. До другої - рентгенівські апарати і прискорювачі заряджених часток до енергій, що перевищують 10 Мев.

Відкрите джерело іонізуючих випромінень - радіонуклідне джерело, при проведенні робіт з яким можливе надходження наявних радіонуклідів до навколишнього середовища: будь-яке джерело, що не підпадає під визначення закритого джерела. При цьому можливе не лише зовнішнє, але й додаткове внутрішнє опромінення персоналу.

Це також радіоактивні ізомери, що застосовуються у вигляді газів, аерозолів, рідин, сипучих матеріалів, порошків. До джерел надходження радіонуклідів у навколишнє середовище належать виробництва, що використовують зразки проб чи реактиви, котрі містять радіоактивні речовини в концентраціях, що дають змогу віднести їх до твердих або рідких радіоактивних відходів, а також лабораторії, які проводять радіологічний моніторинг навколишнього середовища.

2.3. Групи радіотоксичності

Радіотоксичність - властивість радіоактивних ізомерів викликати патологічні зміни при надходженні їх в організм. Радіотоксичність ізомерів залежить від ряду їх характеристик і факторів, головними з яких є такі: 1) вид радіоактивного перетворення; 2) середня енергія одного акту розпаду; 3) схема радіоактивного розпаду; 4) шляхи надходження радіоактивних речовин в організм; 5) розподіл радіоактивних речовин по органах і системах; 6) час перебування радіонукліда в організмі; 7) тривалість часу надходження радіоактивних речовин в організм людини.

Усі радіонукліди, як потенційні джерела внутрішнього опромінення, залежно від величини мінімально значущої активності на робочому місці розподіляються на чотири групи радіотоксичності:

- група А - радіонукліди з особливо високою радіотоксичністю, мінімально значуща активність яких на робочому місці становить 1 кБк. До цієї групи належать 39 ізомерів, у тому числі ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{226}Ra , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am , ^{232}Th та інші трансуранові елементи.

- група Б - радіонукліди з високою радіотоксичністю, мінімально значуща активність котрих на робочому місці становить не більше 10 кБк. У ній 38 ізомерів, у тому числі ^{90}Sr , ^{131}I , ^{144}Ce , ^{106}Ru , ^{223}Ra , ^{235}U , ^{243}Pu , ^{137}Cs , ^{134}Cs та ін.

- група В - радіонукліди із середньою радіотоксичністю, мінімально значуща активність котрих на робочому місці становить не більше 100 кБк. У цій групі 143 ізомери, в тому числі ^{24}Na , ^{32}P , ^{35}S , ^{42}K , ^{47}Ca , ^{56}Co , ^{60}Co , ^{89}Sr , ^{65}Zn , ^{105}Ru , ^{140}Ba , ^{90}Y .

- група Г - радіонукліди з малою радіотоксичністю, мінімально значуща активність яких на робочому місці становить не більше 1000 кБк. У цій групі 75 ізомерів, зокрема ^3H , ^{14}C , ^{15}O , ^{33}P , ^{64}Cu , ^{53}Mn , ^{123}I , ^{197}Pt , ^{222}Rn , а також усі короткоживучі радіоізомери, період напіврозпаду яких менше 24 годин.

2.4. Основні принципи захисту від закритих джерел іонізуючих випромінень

Закриті джерела іонізуючих випромінень зумовлюють лише зовнішнє опромінення організму.

Принципи захисту від зовнішнього опромінення можна вивести з таких основних закономірностей розподілу іонізуючих випромінень і характеру їх взаємодії з речовиною:

- доза зовнішнього опромінення пропорційна інтенсивності та часу впливу випромінення;
- інтенсивність випромінення від джерела прямо пропорційна кількості квантів або частинок, що виникають у ньому за одиницю часу і обернено пропорційна квадрату відстані;
- проходячи через речовину, випромінення нею поглинаються і їх пробіг залежить від густини цієї речовини.

Основні принципи захисту від зовнішнього опромінення базуються на:
 а) захисті часом (скорочення часу роботи з джерелами); б) захисті кількістю (зменшення потужності джерела або кількості активності радіоактивних речовин на робочому місці); в) захисті екранами (екранування джерел матеріалами, що поглинають іонізуючі випромінення); г) захисті відстанню (збільшення відстані від джерела до максимально можливих величин).

У комплексі захисних заходів треба враховувати і вид випромінення радіоактивних речовин (α -, β -частинки, γ -кванти).

Захист від зовнішнього випромінення α -частинками не потрібен, оскільки пробіг їх у повітрі становить 2,4-11 см, а у воді і тканинах живого організму – лише 100 мк. Спецодяг повністю захищає від них.

При зовнішньому опроміненні β -частинки впливають на шкіряний покрив та роговицю очей і у великих дозах викликають сухість й опіки шкіри, ламкість нігтів, катаракту. Для захисту від потоків β -частинок використовують гумові рукавиці, окуляри і екрани, що виготовлені з матеріалів з малою атомною питомою масою (органічне скло, пластмаси, алюміній). У разі особливо потужних потоків β -частинок слід використовувати додаткові екрани, призначені для захисту від гальмівного рентгенівського випромінення: фартухи і рукавиці із просвинцьованої гуми, просвинцьоване скло, ширми, бокси тощо.

Захист від зовнішнього γ -випромінення може забезпечуватись скороченням часу безпосередньої роботи з джерелами випромінення, застосуванням захисних екранів, що поглинають випромінення, збільшенням відстані від джерела та використанням для роботи джерел з мінімально можливим виходом іонізуючих випромінень.

Вищезгадані способи захисту можна застосовувати окремо або в різних комбінаціях, але так, щоб дози зовнішнього фотонного опромінення осіб категорії А не перевищували 7 мР/день і 0,04 Р/тиждень.

Захист шляхом скорочення часу безпосередньої роботи з джерелами фотонного випромінення досягається швидкістю маніпуляцій з препаратом, скороченням тривалості робочого дня і робочого тижня.

Приклад. *Препарат ^{60}Co створює потужність дози 1,5 Р/год на відстані 50 см від джерела. Визначити безпечний час роботи з даним препаратом.*

Рішення. *Знаючи, що ГДД не може перевищувати 7 мР за 6 год робочого часу, визначимо безпечний час t у секундах:*

$$t - 3600 \cdot 7 : 1500 = 16,8 \text{ с}$$

Таким чином, з даним препаратом можна працювати 16,8 с.

Найефективніший захист від γ -випромінення досягається при використанні захисних екранів із матеріалів з великою атомною масою (свинець, чавун і т.п.).

За своїм призначенням захисні екрани можуть бути умовно поділені на 5 груп:

1) захисні екрани - контейнери, в яких розміщуються радіоактивні препарати. Головне призначення таких екранів - зберігання радіоактивних препаратів у неробочому стані;

2) захисні екрани для обладнання. В цьому разі екрани повністю оточують усе робоче обладнання при положенні радіоактивного препарату в робочому стані або при включенні високої (або прискорюючої) напруги на джерела ІВ;

3) захисні екрани, що монтуються як частини будівельних конструкцій (стіни, перекриття підлоги та стелі, спеціальні двері). Такий вид захисних екранів призначений для захисту приміщень, в яких постійно знаходиться персонал, та прилягаючої території;

4) пересувні захисні екрани. Цей тип захисних екранів використовується для захисту робочого місця на різних ділянках робочої зони;

5) екрани індивідуальних засобів захисту (щиток із оргскла, скло пневмокостюмів, просвинцьовані рукавиці та ін.).

За конструкцією всі захисні екрани поділяються на стаціонарні (стіни, ніші, колодязі) і пересувні (переносні екрани, ширми, контейнери, захисні фартухи). Товщину екранів визначають за шарами половинного послаблення.

Шар половинного послаблення - це товщина будь-якої речовини, яка вдвічі знижує дозу проникаючої радіації. Для γ -випромінення шар половинного послаблення різних матеріалів наведений у таблиці 11.

Товщину захисного екрану розраховують за кратністю послаблення дози. Підрахувавши дозу без захисту і визначивши кратність перевищення дози, проводять розрахунок послаблення дози до гранично допустимого рівня, використовуючи для цього показник шару половинного послаблення (табл. 12)

При розрахунках товщини шару половинного послаблення слід ураховувати, що він залежить від енергії випромінення. Так, при енергії γ -квантів, яка дорівнює 0,2 МеВ; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5 і 20 МеВ шар половинного послаблення для свинцю буде, відповідно 0,2 см; 0,4; 0,7; 1,0; 1,7; 2,0 см.

Захист відстанню проводять за допомогою пристрою для дистанційної роботи з радіоактивними речовинами (дистанційні інструменти, подовжувачі, маніпулятори і т.п.). Даний спосіб є досить ефективним, оскільки при збільшенні відстані від джерел іонізуючого випромінення у 2 рази доза зменшується в 4 рази і т.д.

Використовуючи закон зворотних квадратів, можна визначити відстань, що безпечна для роботи з радіоактивними речовинами за формулою:

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{R_2^2}{R_1^2}$$

де D_1 - відома доза, виміряна на відстані R_1 ;

D_2 - ГДД за добу ($7 \cdot 10^{-3}$ Р);

R_2 - шукана безпечна відстань.

Звідси можна визначити ту відстань R_2 , на якій доза випромінювання буде послаблена до безпечної величини D_2 :

$$R_2 = R_1 \sqrt{\frac{D_1}{D_2}}$$

11. Величина шару половинного послаблення γ -випромінювання для різних матеріалів ($E_\gamma = 1\text{MeV}$)

Матеріал	Густина матеріалу, г/см ³	Шар половинного послаблення, см
Вода	1.0	13.0
Деревина	0.7	21.0
Поліетилен	0.9	14.0
Склопластик	1.4	10.0
Бетон	2.3	5.6
Алюміній	2.7	6.5
Сталь, залізо	7.8	1.8
Свинець	11.3	1.3

12. Залежність кратності зниження дози від кількості шарів половинного послаблення

Кількість шарів половинного послаблення	Кратність зниження дози	Кількість шарів половинного послаблення	Кратність зниження дози
1	2	9	512
2	4	10	1024
3	8	11	2048
4	16	12	4096
5	32	13	8192
6	64	14	16384
7	128	15	32768
8	256	16	65538

Основні принципи попередження внутрішнього опромінення організму, що виникає при роботі з відкритими джерелами іонізуючих

випроміненнь, базуються на використанні принципів захисту, які використовуються при роботі зі закритими джерелами випромінення, а також здійснюється герметизація виробничого обладнання для запобігання забруднення приміщень лабораторії та навколишнього середовища радіоактивними речовинами. Застосовуються санітарно-технічні пристрої і спеціальне обладнання, використовуються спеціальні захисні матеріали, засоби індивідуального захисту. Виконуються правила особистої гігієни, проводиться дезактивація приміщень, апаратури та засобів індивідуального захисту.

2.5. Вимоги до влаштування, обладнання та організації праці у радіологічній лабораторії при роботі з відкритими джерелами іонізуючих випроміненнь

2.5.1. Влаштування лабораторій

Усі роботи з використанням відкритих джерел іонізуючих випроміненнь поділяються на 3 класи. Клас робіт залежить від активності радіоактивних речовин на робочому місці, пов'язаної з радіотоксичністю нукліда і встановлюється органами Держсанепідемслужби МОЗ, відповідно до таблиці 13.

Чим вище клас робіт, тим суворіші вимоги до розміщення та обладнання приміщень, у котрих проводяться роботи з відкритими джерелами. На дверях таких приміщень вивішується знак радіаційної небезпеки з указаним класом робіт і напис "Обережно, радіоактивність!"

У всіх закладах, призначених для робіт з відкритими джерелами, приміщення кожного класу робіт рекомендується зосередити в одному місці. Роботи I класу мають проводитись в окремому будинку чи ізольованій частині будинку з окремим входом через санпропускник. Робочі приміщення мають бути обладнані герметичними боксами, камерами, каньйонами й іншим герметичним устаткуванням.

13. Клас робіт залежно від групи радіотоксичності ізотопу

Група радіотоксичності	Мінімально значима активність на робочому місці, кБк	Активність на робочому місці, кБк		
		Клас робіт		
		I	II	III
А	1	Понад 10^5	Від 100 до 10^5	Від 1 до 100
Б	10	Понад 10^6	Від 10^3 до 10^6	Від 10 до 10^3
В	100	Понад 10^7	Від 10^4 до 10^7	Від 100 до 10^4
Г	1000	Понад 10^8	Від 10^5 до 10^8	Від 10^3 до 10^5

Приміщення для робіт I класу розділяються на три зони:

Перша - необслуговувані приміщення, в котрих розміщують технологічне обладнання і комунікації, що є основними джерелами іонізуючих випромінень і радіоактивного забруднення. Перебування персоналу в необслуговуваних приміщеннях при працюючому технологічному обладнанні не допускається.

Друга – приміщення періодичного обслуговування персоналом. Вони призначені для ремонту забрудненого устаткування, інших робіт, пов'язаних із розкриванням технологічного устаткування (вузлів завантаження і вивантаження радіоактивних матеріалів), а також для тимчасового зберігання сировини, радіоактивних відходів і готової продукції.

Третя - приміщення постійного перебування персоналу протягом усієї зміни (операторські, пульти керування). У третій зоні розташовуються адміністративні і службові приміщення, медкабінет, майстерні ремонту чистого устаткування й апаратури, складські приміщення нерадіоактивних матеріалів, центральний пульт керування, електротехнічні приміщення, системи приточної вентиляції і вентиляційні агрегати витяжної системи.

Для виключення можливого виносу забруднення з приміщень 2-ї зони у приміщення 3-ї зони між ними облаштовується санітарний шлюз.

Приміщення для робіт 2 класу розміщують в окремій частині будівлі ізолювано від інших приміщень. Для проведення в одній установі робіт 2 і 3 класів за єдиною технологією виділяють загальний блок приміщень, обладнаний відповідно до вимог, що ставляться до робіт 2 і 3 класу. При цьому обов'язково влаштовують санітарний пропускник, шлюз або душову і на виході - пункт радіаційного контролю. Приміщення для робіт 2 класу мають бути обладнані витяжними шафами або боксами.

Роботи 3 класу виконують в окремих приміщеннях (кімнатах), обладнаних відповідно до вимог, що ставляться перед хімічними лабораторіями. В них виділяються приміщення (місця) для виготовлення і зберігання розчинів та рекомендується обладнання душової і спеціальної приточно-витяжної вентиляції. Роботи, пов'язані з можливістю радіоактивного забруднення повітря (операції з порошками, випаровування розчинів, робота з емульгуючими та летючими речовинами та ін.), повинні проводитись у витяжних шафах. Робочі столи, металеві та інші конструкції шаф покривають слабкосорбуючими матеріалами.

Площа лабораторії в розрахунку на одного працюючого має становити не менше 10 м².

Радіологічна лабораторія повинна мати спеціально сплановані приміщення: сховище-фасова (15-20 м²) і препаратурська радіохімічна (15-20 м²), радіометрична (1-2 кімнати площею 10-16 м²), санпропускник (душ) і побутові приміщення.

Підлогу в приміщенні покривають пластиком або лінолеумом, краї якого піднімають на висоту 20 см і заводять за плінтус на покриття стін. Щілини і стики покриття промазують мастикою або шпаклюють. Стіни у сховищі-фасовій, препаратурській і радіохімічній кімнатах на висоту 2 м

обкладають глазурованим кахлем, вище 2 м стіни та стелю покривають масляною фарбою. Відділка приміщення і розміщення обладнання мають виключати накопичення пилу в кутках і забезпечувати легкість прибирання. Кутки приміщення повинні бути закругленими, полотна дверей і сплетіння вікон - мати прості профілі, а обладнання і робочі меблі - гладку поверхню, прості конструкції та малосорбуюче покриття. Для ефективності дезактивації всі комунікації (теплові, електричні, газові та водопровідні) роблять захованими. В лабораторії необхідно мати холодну та гарячу воду. Управління водопровідними кранами має бути ліктьове або педальне, а конструкція раковин - запобігати розбризкуванню води.

Лабораторію обладнують приточно-витяжною вентиляцією, що забезпечує протягом 1 години п'ятиразовий обмін повітря при швидкості його руху у витяжних шафах і боксах не менше 1,5 м/с. Потік повітря направляють із чистих приміщень у "забруднені", чим досягається більша кратність обміну його в забруднених приміщеннях лабораторії. Блок вмикання вентиляції розміщують при вході в лабораторію.

Роботи з дослідними зразками (розчини, порошки, летючі речовини та речовини, що легко випаровуються) проводять у витяжній шафі, всередині котрої знаходяться підведення газу, стиснутого повітря, води, а також встановлені раковини для стоку води. В передню стінку шафи бажано вмонтувати рукавиці.

Еталонні джерела і радіоактивні препарати зберігають у сейфах, що виключають доступ до них сторонніх осіб. Для зберігання переважно γ -активних речовин призначені сейфи, що мають товщину свинцевого захисту 20-50 мм. Для зберігання β -активних речовин використовують сейфи, що виготовлені з вуглеродистої сталі товщиною 3-4 мм. В робочих кімнатах розміщують тільки найнеобхідніше обладнання, в тому числі контейнери для рідких і твердих відходів.

2.5.2. Поводження з радіоактивними відходами

Радіоактивні відходи – матеріальні об'єкти і субстанції, активність радіонуклідів чи радіоактивне забруднення яких перевищує рівні, встановлені діючими нормативами, за умови, що використання цих об'єктів і субстанцій не передбачається.

НРБУ-97 встановлюють класифікацію радіоактивних відходів, що використовує критерій величини періоду піврозпаду радіонуклідів, які є у складі цих відходів:

- *короткоживучі*, у складі яких немає радіонуклідів з періодами піврозпаду, що перевищують 10 років;
- *середньоживучі*, що містять радіонукліди з періодом піврозпаду від 10 до 100 років включно;
- *довгоживучі*, які мають радіонукліди з періодами піврозпаду понад 100 років.

Залежно від агрегатного складу радіоактивні відходи поділяються на

рідкі, тверді і газоподібні. До рідких радіоактивних відходів належать розчини неорганічних речовин, пульпи фільтроматеріалів, органічні речовини (масла, розчинники та ін.). До твердих радіоактивних відходів належать будь-які об'єкти або речовини у твердому стані (у тому числі деталі машин, механізмів, матеріали, вироби, біологічні об'єкти, переведені у твердий стан рідкі радіоактивні відходи тощо).

Рідкі радіоактивні відходи за питомою активністю діляться на такі категорії: низькоактивні, середньоактивні, високоактивні, інтервали значень питомої активності для яких наведені в таблиці 14.

Тверді відходи вважаються радіоактивними, якщо питома активність їх для джерел α -випромінювання більша 1 кБк/кг (для трансуранових елементів – 0,1 кБк/кг); 10 кБк/кг для джерел β - і γ -випромінювання.

Збирання твердих і рідких радіоактивних відходів в установах має здійснюватися безпосередньо в місцях їхнього утворення, окремо від звичайних побутових, технологічних чи будівельних відходів.

14. Класифікація категорій рідких радіоактивних відходів

Категорія радіоактивних відходів	Інтервал значень питомої активності, Бк/кг		
	β -, γ -випромінюючі радіонукліди	α -випромінюючі радіонукліди	Трансуранові α -випромінюючі радіонукліди
Низькоактивні	Менше 10^3	Менше 10^2	Менше 10^1
Середньоактивні	Від 10^3 до 10^7	Від 10^2 до 10^6	Від 10^1 до 10^5
Високоактивні	Понад 10^7	Понад 10^6	Понад 10^5

Забороняється видалення рідких радіоактивних відходів у навколишнє середовище, у тому числі:

- у ставки, озера і водоймища, призначені для розведення риби і водоплавної птиці, а також у струмки й інші водойми, вода з яких може надходити до зазначених ставків, озер, водоймищ;
- у поглинаючі ями, колодязі, на поля зрошення, поля фільтрації, у системи підземного зрошення.

Допускається скидання рідких радіоактивних відходів у господарсько-побутову каналізацію за одночасного дотримання таких умов:

- після попереднього розведення концентрація радіонуклідів у новоутворених розчинах не більш, ніж у 10 разів перевищує відповідні припустимі концентрації у воді і при цьому забезпечується подальше десятиразове розведення нерадіоактивними стічними водами у колекторі установи;
- сумарне скидання радіоактивних речовин протягом року не перевищить установленого значення припустимого скидання для даної установи;
- відповідності якісного і кількісного хімічного складу рідких відходів існуючим нормативним вимогам, що регламентують умови скидання стічних вод;

- перебування радіоактивних речовин у хімічній формі, що виключає можливість їхньої сорбції й осідання у системі каналізації.

При малих кількостях рідких радіоактивних відходів (менше 200 л), а також при неможливості їх розведення відходи належить збирати в спеціальні ємкості для наступної відправки на пункт захоронення радіоактивних відходів або спеціалізовані комбінати.

Тверді й рідкі радіоактивні відходи, що підлягають захороненню, і які містять короткоживучі нукліди з періодом піврозпаду до 15 діб, витримують протягом часу, що забезпечує зниження питомої активності до значень, які вказані вище. Потім тверді радіоактивні відходи видаляють із звичайним сміттям на організовані відвали, а рідкі - в комунально-побутову каналізацію.

Термін витримки радіоактивних відходів, що містять велику кількість органічних речовин (піддослідні тварини, рослини, окремі їх частини і т.п.) не має перевищувати 5 діб у разі, якщо незабезпечене зберігання (витримка) в холодильних пристроях або спеціальних розчинах.

Транспортують радіоактивні відходи в пункти захоронення на спеціальних машинах. Дані про збір, витримку, знешкодження радіоактивних відходів в лабораторії заносять у спеціальний журнал.

Для їх довготривалого зберігання використовують спеціальні сейфи стаціонарного і нестаціонарного типів.

Не рідше як один раз на рік комісія, призначена керівником закладу, перевіряє правильність ведення обліку кількості радіоактивних відходів, зданих на захоронення, а також тих, що знаходяться в закладі. В разі виявлення втрат радіоактивних відходів негайно повідомляють органи МВС та СБ, а винні посадові особи притягаються до відповідальності в установленому законом порядку.

2.5.3. Дезактивація робочих приміщень та устаткування лабораторії

У всіх приміщеннях з постійним перебуванням персоналу, призначених для робіт із джерелами іонізуючих випромінень у відкритому вигляді, має проводитися щоденне вологе прибирання. Періодично, але не рідше одного разу на місяць, робиться генеральне прибирання з дезактивацією стін, підлоги, дверей і зовнішніх поверхонь устаткування. Сухе прибирання виробничих приміщень, за винятком вакуумного, забороняється.

У приміщеннях постійного перебування персоналу, де працюють з джерелами у відкритому вигляді, має бути передбачений сталий запас дезактивуючих засобів і миючих розчинів, що добираються з урахуванням властивостей радіонуклідів та їхніх сполук, з якими йде робота, а також характеру поверхонь, що підлягають дезактивації.

Після закінчення робіт кожен працівник має прибрати своє робоче місце і при потребі дезактивувати устаткування, інструмент, робочий посуд.

У разі забруднення радіоактивними речовинами приміщень або їх окремих ділянок негайно приступають до дезактивації. Якщо забруднення порошковою сухою речовиною, та його збирають злегка вологою ганчіркою,

попередньо вимкнувши вентиляцію. Велику кількість розлитих радіоактивних рідин засипають стружкою. Після того, як основна їх кількість буде видалена, залишки забруднення знищують обробкою спеціальними миючими засобами. Дезактивацію забруднених поверхонь проводять за допомогою м'яких щіток, тампонів, змочених миючими засобами, або змивом.

Після дезактивації спеціальними миючими засобами поверхню рясно промивають водою і протирають сухою чистою ганчіркою. Потім проводять контроль чистоти поверхні відповідним радіометричним приладом.

Використані щітки, тампони збирають у пластикові мішки або в інші ємкості та видаляють як радіоактивні відходи.

Як миючі засоби можуть використовуватись такі розчини:

- 1) пральний порошок - 10 мл, луг - 10 мл, вода - до 1 л.
- 2) щавелева кислота - 5 г, кухонна сіль - 50 г, миючий засіб ДС-РАС – 10 мл, вода – до 1 л.

Якщо не вдалося ефективно провести дезактивацію вказаними засобами, то для додаткової обробки поверхонь використовують розчин 3.

- 3) перманганат калію - 40 г, кислота сірчана (питома маса - 1,84) - 5 мл, вода - до 1 л.

Перманганат калію розчиняють в 1 л води при нагріванні до 60⁰С, потім охолоджують до кімнатної температури. В розчин доливають сірчану кислоту і перемішують. Якщо оброблюваний матеріал нестійкий до розчинів, що містять кислоти, для дезактивації використовують лужний розчин 4.

- 4) їдкий натр -10 г, трилон Б - 10 г, вода - до 1 л. Їдкий натр розчиняють у воді, додають трилон Б, перемішують до повного розчинення.

Для дезактивації цінного обладнання, приладів готують такі розчини:

- 5) лимонна кислота - 10 г, вода - до 1 л.
- 6) щавелева кислота - 20 г, вода - до 1 л.
- 7) натрію гексаметафосфат - 10-20 г, вода - до 1 л.

Кислоту або гексаметафосфат натрію розчиняють, перемішуючи, в 1 л води при кімнатній температурі.

При необхідності дезактивації поверхонь з лаково-фарбовим покриттям верхній шар знімають механічним (зчісування) або хімічним (за допомогою спеціальних розчинників) способом.

Одяг (фартухи, рукавники та ін.) з поліхлорвінілу та поліетилену можна дезактивувати в розчині 8.

- 8) миючий засіб ОП-7 - 4 г, соляна кислота - 20 мл, гексаметафосфат натрію - 4 г, вода - до 1 л.

2.5.4. Засоби індивідуального захисту та особистої гігієни при роботі з радіоактивними речовинами

Особи, які працюють з відкритими радіоактивними джерелами, забезпечуються засобами індивідуального захисту: халатами, шапочками, рукавицями, пластиковими рукавниками, фартухами, а при ліквідації

аварій - напівхалатами, напівкомбінезонами, пневмокостюмами і додатковим спецвзуттям (гумові чоботи, пластикові сліди), при роботі з радіоактивними газами, аерозолями, порошками - фільтруючими засобами захисту органів дихання (респіратор, протигаз).

У приміщеннях для роботи з відкритими радіоактивними джерелами забороняється: перебування співробітників без необхідних засобів індивідуального захисту; зберігання харчових продуктів, тютюнових виробів, косметики; робота з піпеткою без груші. Маніпуляції з піпеткою проводять за допомогою гумової груші або використовують автоматичні дозатори із змінними кінчиками.

Усі роботи з радіоактивними речовинами виконують у кюветі, накритій шаром фільтрувального паперу, котрий після роботи складають у пластикові мішки для збору радіоактивних відходів.

При виході із приміщення, де проводиться робота з радіоактивними речовинами, необхідно зняти спецодяг, рукавиці та інші засоби індивідуального захисту, ретельно вимити руки та перевірити їх чистоту на радіометричному приладі.

При негайній обробці шкіри, незалежно від ступеня її забруднення і дезактивуєчої речовини, видаляється до 90-98% нефіксованих радіоактивних речовин, які на ній знаходяться. При незначному забрудненні (перевищення допустимих рівнів не більше ніж у 2,5 раза) радіоактивні речовини добре видаляються під час миття теплою проточною водою з 72%-м господарським милом за допомогою волосної щітки. Щіткою користуються без натиску, щоб не викликати пошкодження шкіри і проникнення радіоактивних речовин всередину організму. Вода має бути проточною з температурою не вище 35°C, оскільки використання гарячої води погіршує результати очистки.

У разі, коли відбулася фіксація радіоактивних речовин в результаті їх реакції з білками шкіри, звичайна обробка за допомогою води і мила не ефективна. Для видалення остаточної активності використовують миючі засоби залежно від хімічних властивостей радіоактивних речовин: адсорбенти (каолінова паста, порошок "Новость" та ін.), комплексоутворювачі (трилон Б, тринатрієва сіль, лимонна кислота, унітіол, оксатіол, розчин соди та ін.), слабкі розчини кислот (частіше соляна і лимонна). Ці засоби руйнують зв'язки ізотопу з білками шкіри, сорбують РР і легко змиваються зі шкіри.

При дезактивації необхідно враховувати хімічні закономірності. Наприклад, забруднення радіоактивним фосфором нетреба змивати милом, оскільки при цьому утворюються нерозчинні фосфати. В цьому разі краще користуватись синтетичними миючими засобами, наприклад ОП-10 або 2%-м розчином соди.

Радіоактивний йод легко видаляється при обробці водою з милом і наступним використанням окислювачів (перманганат калію) та обробкою розчином сульфату. Використання води і мила ефективно при забрудненні ^{42}K і ^{24}Na . В інших випадках краще користуватись комплексоутворюючими

засобами: трилон Б (при забрудненні ^{90}Sr та ^{59}Fe), унітіол та оксатіол (при забрудненні ^{198}Au і ^{203}Hg), каолінове мило (при забрудненні ^{226}Ra).

При невеликих забрудненнях шкіряних покривів тулуба необхідно ретельно вмитись під душем з господарським 72%-м милом або засобом ОП-10.

Сильно забруднені ділянки шкіри спочатку обробляють міцним розчином калію перманганату і 5%-м розчином сірчанокислового натрію. Потім ретельно миються під душем. Для обтирання оброблених поверхонь шкіри зручно користуватися одноразовими серветками або ватно-марлевыми тампонами, котрі потім видаляють як тверді радіоактивні відходи.

Якщо радіоактивне забруднення супроводжувалось невеликим пошкодженням шкіри, то ранку необхідно декілька разів промити теплою проточною водою, а потім штучно викликати кровотечу під струменем води.

Шкіру лица дезактивують водою з милом, волосся - водою з шампунем, до якого додають 3%-й розчин лимонної кислоти. Очі промивають під струменем теплої води з широко розкритими повіками. Для запобігання забруднення слізних каналів струмінь води направляють від внутрішнього кута ока до зовнішнього. У разі попадання радіоактивних речовин до рота необхідно декілька разів прополоскати його теплою водою, а зуби і ясна вичистити зубною щіткою з пастою, після чого прополоскати 3%-м розчином лимонної кислоти.

Якщо одноразова обробка частин тіла не дала необхідної чистоти, дезактивацію повторюють. Неефективні повторні обробки вказують на фіксацію ізотопу шкірою. Це є сигналом для взяття таких осіб під медичний нагляд.

Індивідуальний контроль за дозами опромінення персоналу проводять один раз на місяць; контроль за рівнем забруднення робочих поверхонь, обладнання, спецодягу працюючих і їх шкіряного покриву - кожний раз після роботи з радіоактивними речовинами; рівень забруднення суміжних приміщень контролюється один раз на квартал, контроль за вмістом радіоактивних речовин у повітрі робочих приміщень - не рідше двох разів на місяць, а в стічних водах - 1 раз на квартал.

Дані всіх видів радіаційного контролю реєструються в журналі.

Тема 3. Історія розвитку радіобіології та радіоекології

Все живе на нашій планеті виникло, розвивалось й існує в умовах, іноді далеких від сприятливих. На живі організми діють перепади температур, атмосферні опади, рух повітря, зміни атмосферного тиску, чергування дня і ночі та інші фактори. Серед них особливе місце займає іонізуюча радіація, що утворюється за рахунок 25 природних радіоактивних елементів, таких як уран, радій, радон, торій та ін. Джерелом радіонуклідів є також Сонце та зірки Галактики. Це два джерела іонізуючого опромінення всього живого й неживого.

Рентгенівське або γ -випромінювання являє собою електромагнітні хвилі з високою частотою і надзвичайно великою енергією. Всі види іонізуючого випромінювання зумовлюють іонізацію та ушкодження опромінюваних об'єктів.

Вважається, що все живе на Землі пристосувалось до дії іонізуючих випромінень і не реагує на них. Існує навіть гіпотеза, що природна радіація є рушієм еволюції, завдяки якому виникла така велика кількість видів, найрізноманітніших за формою та способом життя живих організмів, оскільки спадкові потворства є не що інше, як виникнення нових ознак організму, які можуть призвести до появи зовсім нового виду.

Протягом 18-19 ст., а особливо нині природний радіаційний фон на Землі підвищився і продовжує збільшуватись. Причиною є прогресуюча індустріалізація всіх розвинутих країн, внаслідок якої при збільшенні добування металевих руд, вугілля, нафти, будівельних матеріалів, добрив та інших корисних копалин на її поверхню стали виймати у великих кількостях різні мінерали, що містять природні радіоактивні елементи. При спалюванні мінеральних джерел енергії, особливо таких як вугілля, торф, горючі сланці, в атмосферу потрапляє багато різних речовин, в тому числі й радіоактивних.

В середині 20 ст. почали створюватися штучні джерела іонізуючих випромінювань. Початок їм поклало створення атомної бомби у США, а потім і в інших країнах, а також розвиток атомної енергетики. Під час атомних вибухів, роботи підприємств атомної енергетики, особливо при радіаційних аваріях, у навколишнє середовище можуть потрапляти великі кількості природних та штучних радіоактивних речовин. Це призводить до підвищення радіаційного фону, появи окремих осередків та великих територій з високим рівнем радіоактивності.

3.1. Визначення наук

Радіобіологія – це наука про дію іонізуючих випромінень на живі організми та їх угруповання.

Відповідно, сільськогосподарська радіобіологія – вивчає дію іонізуючих випромінень на сільськогосподарські рослини і сільськогосподарських тварин та агроценози.

Основними завданнями сільськогосподарської радіобіології є: 1) вивчення закономірностей дії іонізуючих, випромінень на сільськогосподарські рослини та сільськогосподарських тварин; 2) практичне використання іонізуючих випромінень у сільськогосподарському виробництві; 3) дослідження шляхів міграції і переміщення радіоактивних речовин у об'єктах сільськогосподарського виробництва. Останнє завдання вивчає сільськогосподарська радіоекологія.

Радіоекологія вивчає концентрації та міграцію радіоактивних речовин в біосфері та вплив іонізуючих випромінень на живі організми та їх угруповання.

Відповідно *сільськогосподарська радіоекологія вивчає концентрації та міграцію радіоактивних речовин в об'єктах сільськогосподарського виробництва (на ріллі, луках, пасовищах, водоймах, рослинах, тваринах тощо) і вплив їх іонізуючих випромінень на сільськогосподарські рослини та сільськогосподарських тварин.*

3.2. Історія розвитку радіобіології та радіоекології

Своїм виникненням як самостійної науки радіобіологія зобов'язана трьом великим відкриттям у галузі фізики: в 1895 р. німецьким фізиком В.К. Рентгеном Х-променів, названих пізніше його ім'ям; в 1896 р. французьким фізиком А.А. Бекерелем природної радіоактивності та у 1898 р. французькими фізиками, подружжям М. Склодовською-Кюрі і П. Кюрі радіоактивних властивостей полонію та радію. Всі вони були удостоєні Нобелівської премії - однієї з найпочесніших нагород світу за досягнення в галузі науки.

Відкриття рентгенівських променів привернуло увагу вчених-природознавців усього світу. Зацікавився ними й професор фізики Паризького музею історії природи А.А. Бекерель. Він відкрив, що мимовільно уран випромінює невидимі промені. Це було відкриття природної радіоактивності.

Вивчення цього явища стало предметом досліджень і подружжя Кюрі. В липні 1898 р. вони відкрили властивість радіоактивності зовсім нового елемента, першого, виявленого саме за властивостями радіоактивності і названого полонієм на честь батьківщини М. Склодовської-Кюрі - Польщі, а в грудні того ж року також у нового елемента, названого радієм (від латинського слова радіус - промінь).

Етапи розвитку радіобіології і радіоекології. Перший етап. Про біологічну дію іонізуючих випромінень стало відомо майже відразу після їх виявлення. Вони були шкідливими для здоров'я тих, хто працював з рентгенівськими апаратами та радіоактивними речовинами. Однією з перших жертв випромінювання став сам А.А. Беккерель.

Від променевої хвороби померла М. Склодовська-Кюрі і її дочка І. Кюрі та її чоловік Ф. Жоліо-Кюрі - визначні французькі фізики, що відкрили у 1934 р. явище штучної радіоактивності елементів, за що також були вшановані Нобелівською премією. Лише рання загибель П. Кюрі внаслідок катастрофи позбавила його тієї ж долі. Незважаючи на заходи щодо безпеки роботи з радіоактивними речовинами та випроміненнями, до 80-х років вже було відомо близько 500 дослідників, що загинули від іонізуючої радіації.

Перші наукові дослідження щодо впливу іонізуючого випромінення на живі організми були проведені практично відразу після відкриття рентгенівських променів та явища радіоактивності. Серед найперших випробувачів - відомий російський фізіолог І.Р. Тарханов, який вже в 1896 р., будучи доцентом Петербурзького університету, показав уражуючу властивість рентгенівських променів при опроміненні комах і жаб.

Глибокі дослідження щодо дії рентгенівських променів та променів радіо на рослини і тварин провів видатний російський фізіолог і біохімік Ю.С. Лондон. Він вперше описав гальмування росту рослин під впливом дії цих-променів та смертельну дію на мишей. Його книга «Радій в біології та медицині», опублікована в 1911 р., є першою у світі працею з радіобіології.

Наприкінці 19 і в перші два десятиріччя 20 століття було відкрито багато різноманітних ефектів іонізуючих випромінень. Зокрема, описано явище радіаційної стимуляції рослин, яка полягає в тому, що на відміну від високих доз радіації, які гальмують ріст і розвиток живих організмів, малі дози можуть, навпаки, прискорювати ці процеси. Виявлено також порушення поділу клітин при опроміненні, гальмування окремих процесів обміну речовин. За цей час було встановлено багато фактів, які підтвердили дію рентгенівського випромінення та випромінень радіоактивних елементів на різні біологічні об'єкти. Радіобіології, як самостійної науки, ще не існувало. Для її становлення не було головного - теорії, яка б пояснювала природу дії радіації на організм. Потреба в такій теорії була цілком очевидною. Нагально потребував пояснення так званий «радіобіологічний парадокс» - явище, що полягає у великій невідповідності між дуже малою величиною поглинутої при опроміненні енергії іонізуючого випромінення та ступенем прояву реакцій біологічного об'єкта, що нерідко призводить до його загибелі.

Другий етап. 20-30-ті роки 20 ст. відомі низкою великих винаходів та нових ідей, які прискорили становлення радіобіології як науки. Було сформульовано теорію «мішені», згідно з якою не всі частини живої клітини однаково ушкоджуються випроміненням. У ній є особливо чутливі об'єми «мішені», ураження яких призводить до ушкодження всього об'єкта. Нині доведено, що такою мішенню є молекула ДНК. Великий внесок у розвиток цієї теорії зробив видатний радіобіолог і генетик М.В. Тимофєєв-Ресовський.

У цей період сформувалась теорія прямої дії випромінення, що доводила можливість безпосередньої взаємодії випромінень з мішенню, та непрямої дії, яка підтверджувала, що головну роль у радіаційному ушкодженні відіграють процеси взаємодії продуктів радіолізу води, з якої на 90% складаються живі клітини, з мішенню.

В цей час відкрито «кисневий ефект», суть якого в тому, що при зменшенні в середовищі концентрації кисню ступінь променевого ушкодження знижується.

Ці роки ознаменувалися ще одним великим відкриттям - встановленням мутагенної дії іонізуючої радіації, її властивості впливати на спадковий апарат живого організму. Першими це продемонстрували в 1925 р. на найпростіших грибах російські вчені Г.А. Надсон та Г. С. Філіпов. В 1927 р. американський генетик Г. Мьоллер показав ці можливості на дрозофілі - плодовій мушці, а в 1928 р. - Л. Седлер на вищих рослинах. З відкриттям радіаційного мутагенезу почали активно проводитись роботи з виведення за допомогою іонізуючих випромінень нових сортів культурних рослин. В 1930 р. такі роботи розпочали українські вчені Л.М. Делоне та А.О. Сапегін.

В ці роки народилась сільськогосподарська радіобіологія та зародились основи радіоекології як науки, що вивчає вміст в об'єктах навколишнього середовища природних радіоактивних елементів. Біля її джерел стояв видатний геолог і геохімік, перший президент Академії наук України В.І. Вернадський.

На початку другої світової війни був нагромаджений великий експериментальний матеріал, зроблені деякі узагальнення, створені теорії, проте ні радіобіологія, ні радіоекологія як науки ще не сформувались. Навіть термім «радіобіологія» існував лише у колі вузьких спеціалістів.

Третій етап. Використання США в 1945 р. атомної бомби в Японії, масові випробування в наступні роки атомної зброї в ряді країн, в тому числі й у колишньому СРСР, призвели до реальної загрози радіаційного ушкодження біосфери. Цей період, коли різко зріс інтерес до наслідків біологічної дії іонізуючої радіації, знаменує початок третього етапу розвитку радіобіології.

Саме в ці роки радіобіологія остаточно формується як самостійна галузь науки. Актуальним для неї стає таке практичне завдання, як пошук засобів захисту організму від іонізуючого випромінення. В 1949 р. були винайдені радіозахисні властивості амінокислоти цистеїну, ціаніду натрію, амінів. У 1951 р. бельгійський радіобіолог З. Бак показав високу протипроменеву ефективність синтезованої ним сполуки цистеаміну, який і нині залишається одним з найбільш дієвих радіозахисних препаратів.

У 50-ті рр. була експериментально доведена властивість клітини відновлюватись після ушкоджень, завданих опроміненням.

Для тих років характерним є також широке використання досягнень радіобіології для вирішення практичних завдань. Розширюється фронт використання іонізуючих випромінень у медицині, їх починають ефективно використовувати в сільському господарстві. В радіобіології виділяються багато самостійних напрямів, у тому числі й сільськогосподарська радіобіологія.

Ще до війни було розпочато дослідження з використання іонізуючого випромінення у невеликих дозах для підвищення врожайності рослин. Було показано, що опромінене в стимулюючих дозах насіння швидше проростає, енергійніше сходить. Нерідко це проявляється і в наступному прискоренні росту та розвитку рослин і збільшенні їх продуктивності.

В 50-70-ті рр. одержано певні результати в галузі практичної стимуляції рослин. У деяких країнах технологію передпосівного γ -опромінення насіння, живців, розсади змогли довести до рівня широкомасштабних випробувань і навіть до впровадження у практику. Пристрасним пропагандистом та ініціатором випробувань цього методу в Україні був відомий учений в галузі агрохімії та фізіології рослин П.А. Власюк.

Успішно впроваджувався у сільськогосподарське виробництво метод опромінення насіння та іншого садивного матеріалу для виведення нових

сортів рослин. Всього за цей період у світі одержано за допомогою іонізуючої радіації понад тисячу сортів рослин, майже половину яких становлять сорти сільськогосподарських культур. В Україні за допомогою опромінення одержано високоврожайні, стійкі проти різних захворювань сорти кукурудзи, люпину, сої та інших культур. Автором деяких сортів гречки, виведених за допомогою цього методу, є відомий селекціонер професор О.С. Алексєєва. На основі досягнень сільськогосподарської радіобіології в агропромислове виробництво впроваджуються багато інших радіаційних методів і технологій: для запобігання проростанню цибулин, бульбо- та коренеплодів при тривалому зберіганні, для подолання несумісності тканин рослин при прищепках, для боротьби з шкідниками сільськогосподарських рослин і збудниками інфекційних хвороб тварин, для стерилізації, консервації, знезаражування продукції рослинництва і тваринництва.

У зв'язку з випробуванням багатьма країнами в 50-ті і на початку 60-х рр. ядерної зброї та глобальним забрудненням Землі штучними радіоактивними речовинами перед радіобіологією постають нові завдання у вивченні закономірностей їх міграції в біосфері, шляхів надходження в рослини, організми тварин та людини, особливості дії на організм інкорпорованих (що надійшли усередину) радіоактивних речовин, що нерівномірно розподіляються по тканинах, з різною швидкістю виводяться з нього.

У цей період бурхливо розвивається радіоекологія, формується сільськогосподарська радіоекологія, основу якої в той час становили дослідження природної радіоактивності ґрунтів, сільськогосподарських рослин і тварин, шляхів міграції природних та штучних радіоактивних речовин в цих об'єктах. Великий внесок у розвиток цих досліджень в 50-80-ті рр. внесли українські радіоекологи Д.М. Гродзинський, О.О. Городецький, А.І. Даниленко.

Наприкінці 70-х та у першій половині 80-х рр. спостерігались деякі зовсім невинновдані тенденції скорочення обсягу радіобіологічних робіт. Причиною цього деякою мірою було самозаспокоєння, зумовлене заборонаю випробувань ядерної зброї та необхідністю зниження радіаційного фону, успіхами руху прихильників миру. Але головна причина - недалекоглядність деяких керівників науки.

Четвертий етап - це сучасний період розвитку радіобіології і радіоекології. Відлік його почався 26 квітня 1986 р. В радіобіологію прийшов численний загін спеціалістів із суміжних наук. Відкрито багато нових інститутів, лабораторій, кафедр радіобіологічного профілю, що покликані вирішити старі проблеми і нові завдання, які постали перед радіобіологією і радіоекологією в зв'язку з аварією на Чорнобильській АЕС.

Основними з них є: 1) специфіка дії на живі організми малих доз іонізуючих випромінень; 2) особливості дії на живі організми хронічного опромінення; 3) профілактика й терапія гострих та хронічних променевих

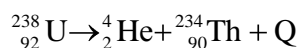
ушкоджень; 4) радіаційне порушення імунітету; 5) віддалені наслідки опромінення; 6) спільна дія на організм іонізуючих випромінень та інших факторів; 7) міграція штучних радіоактивних речовин в об'єктах навколишнього середовища; 8) особливості дії на живі організми випромінення інкорпорованих радіоактивних речовин; 9) запобігання надходженню і нагромадженню радіоактивних речовин у рослинах, організмах тварин і людини; 10) виведення радіоактивних речовин з організму людини.

Тема 4. Фізичні основи радіобіології

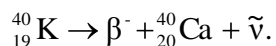
4.1. Типи ядерних перетворень. Радіоактивність, одиниці її вимірювання

Типи ядерних перетворень. Ядра атомів стійкі, але міняють свій стан при порушенні співвідношення протонів і нейтронів. В легких ядрах повинно бути приблизно порівну протонів і нейтронів. Існують такі типи ядерних перетворень, або види радіоактивного розпаду: альфа-розпад, бета-розпад (електронний, позитронний), електронний захват і внутрішня конверсія.

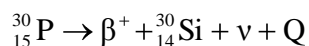
Альфа-розпад супроводжується викидом з ядра нестійкого елемента α -частинки, яка являє собою ядро атома гелію. При цьому воно втрачає 2 протони й 2 нейтрони і перетворюється в інше ядро, заряд якого менше на 2, а масове число на 4. Отже, при такому розпаді, відповідно із правилом зміщення, сформульованим Фаянсом і Содді (1913 р.), створений дочірній елемент зміщується вліво відносно материнського на 2 клітинки таблиці Менделєєва. Наприклад:



Бета-розпад. Якщо в ядрі є надлишок нейтронів (“нейтронне перевантаження ядра”), то відбувається електронний (β^-) розпад, при якому один із нейтронів перетворюється в протон, а з ядра вилітає електрон і антинейтрино. При цьому розпаді заряд ядра і номер збільшується на одиницю, а дочірній елемент здвинутий в таблиці Менделєєва на один номер вправо від материнського, а масове число залишається без зміни. Наприклад:



Якщо в ядрі є надлишок протонів, відбувається позитронний β^+ розпад. При цьому ядро викидає позитрон і нейтрино, а один із протонів перетворюється в нейтрон. Заряд ядра і атомний номер зменшуються на 1 і дочірній елемент зміщується на 1 номер вліво від материнського елемента в таблиці Менделєєва. Масове число залишається без змін. Наприклад:

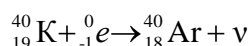


Позитрон, що вилетів з ядра, зриває з оболонки атома “лишній” електрон, або взаємодіє з вільним електроном, утворюючи пару “позитрон-електрон”, яка миттєво перетворюється в 2 γ -кванти з енергією, еквівалентною масі частинок ($e^+ + e^-$). Процес перетворення пари в 2 γ -кванти отримав назву *анігіляції* (знищення), а виникаюче електромагнітне випромінення – *анігіляційного*. В даному випадку відбувається перетворення

одної форми матерії – частинок речовини, в іншу форму – γ -фотони. Таким чином, при позитронному розпаді в кінцевому результаті за межі материнського атома вилітають не частинки, а два γ -кванта, кожний з яких має енергію 0,511 MeV, що дорівнює енергетичному еквіваленту маси спокою частинок – позитрону та електрону.

Електронний захват. Перетворення ядра може здійснюватись шляхом електронного захвату, коли один із протонів ядра захоплює електрон з одної із оболонок атома, частіше всього К-шару і рідше L-шару. Такий процес називають електронним к- або l-захватом. Порядковий номер нового ядра стає на одиницю меншим, при цьому дочірній елемент в періодичній таблиці Д.І. Менделєєва зміщується на 1 клітинку вліво від материнського.

Наприклад:



Внутрішня конверсія. Суть внутрішньої конверсії полягає в тому, що ядро передає енергія збудження одному із електронів внутрішніх шарів (К, L, M) в результаті чого він викидається за межі атома. Такі електрони отримали назву електронів внутрішньої конверсії. Якщо енергія збудження перебільшує 1,022 MeV, то перехід ядра в нормальний стан може супроводжуватись випроміненням пари “електрон-позитрон” з наступною їх анігіляцією. Після конверсії в електронній оболонці атома з’являється “вакантне місце вирваного електрона”. Потім один із електронів з більш віддалених шарів і з більш високою енергією здійснює квантовий перехід на “вакантне” місце з виділенням характеристичного рентгенівського випромінення.

Радіоактивність – це мимовільне або штучне перетворення атомних ядер нестійкого ізотопу хімічного елемента з даного стану в інший ізотоп цього або іншого елемента, яке супроводжується виділенням енергії шляхом випускання елементарних частинок, γ -квантів і ядер.

Основний закон радіоактивного розпаду стверджує, що за одиницю часу розпадається однакова частка ядер, що є в наявності.

Розрізняють три види радіоактивності (активності):

- 1) поверхнева – Кі/км²; Бк/м²; розп./хв. з 1 см² тощо.
- 2) питома – Кі/кг; Бк/кг тощо.
- 3) об’ємна – Кі/л; Бк/л тощо.

Позасистемною одиницею радіоактивності є Кюрі (Ки).

Кюрі – це така кількість радіоактивної речовини (чи елемента), в якій за 1 с розпадається біля 37 млрд. атомів. $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ розп./с}$, або $2,22 \cdot 10^{12} \text{ розп./хв.}$ Таку радіоактивність мають 1 г ${}^{226}\text{Ra}$, або 3 т ${}^{238}\text{U}$, або 0,00001 г ${}^{131}\text{I}$.

Таким чином, радіоактивність визначається не масою радіоактивного елемента, а величиною періоду його піврозпаду (${}^{238}\text{U}$ – 4,5 млрд. років, а ${}^{131}\text{I}$ – 8,07 діб).

Похідними від Ки у бік зниження є: $1 \text{ мКи} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Ки}$; $1 \text{ мкКи} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ки}$; $1 \text{ нКи} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Ки}$; $1 \text{ пКи} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ Ки}$; $1 \text{ аКи} = 1 \cdot 10^{-18} \text{ Ки}$.

За одиницю радіоактивності в системі СІ прийнятий Бекерель (Бк).

Беккерель – це така кількість радіоактивної речовини чи елемента, в якій за 1 с розпадається один атом. $1 \text{ Бк} = 1 \text{ розп./с}$. Звідси $1 \text{ Кі} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$, а $1 \text{ Бк} = 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Кі}$.

Похідними від Бк є: $1 \text{ кБк} = 1 \cdot 10^3 \text{ Бк}$; $1 \text{ МБк} = 1 \cdot 10^6 \text{ Бк}$.

Природна радіоактивність продукції рослинництва та тваринництва за ^{40}K знаходиться в межах $1-9 \cdot 10^{-9} \text{ Кі/кг}$, або $37-333 \text{ Бк/кг}$.

4.2. Характеристика іонізуючих випромінень та взаємодія їх з речовиною

Іонізуюче випромінення, проходячи крізь речовину, розтрачує свою енергію на іонізацію та збудження зустрічних атомів і поглинається цією речовиною. Енергію, витрачену зарядженою частинкою або фотоном електромагнітного випромінення на одиницю довжини їх пробігу в речовині, називають лінійною передачею енергії (ЛПЕ). В системі СІ її виражають в джоулях на метр. В радіобіології частіше використовують спеціальні одиниці і ЛПЕ виражають в кілоелектронвольтах (кеВ) на мікромметр шляху у воді (1 кеВ/мкм дорівнює $0,16 \text{ нДж/м}$).

Електронвольт (eV) – одиниця вимірювання енергії, яку набуває електрон при проходженні електричного поля з різницею потенціалів 1 В.

Довжина пробігу залежить від енергії фотонного випромінення, заряду, маси і швидкості частинок; причому ця залежність різко збільшується із зниженням швидкості і збільшенням маси частинки.

Гамма-випромінення - це потік фотонів (квантів) електромагнітного випромінення з енергією вище 100 кеВ .

Енергія γ -квантів, що випускаються ядрами після α -розпаду, звичайно не перевищує 5 МеВ , після електронного розпаду - $2,0-2,5 \text{ МеВ}$. При анігіляції античастинок вона складає $0,511 \text{ МеВ}$. В середньому енергія γ -випромінення різних радіоактивних елементів коливається в діапазоні $0,1-3 \text{ МеВ}$ і рідко досягає 10 МеВ . γ -кванти з енергією до 1 МеВ утворюють випромінення, яке назвали м'яким, а з енергією більше 1 МеВ - жорстким випроміненням. γ -кванти, за рідким винятком, утворюють лінійчатий спектр випромінення, постійний для кожного елемента. Моноенергетичний спектр випромінення мають тільки деякі γ -випромінюючі ізотопи (^{137}Cs , ^{52}Mn , ^{141}La та інші), тому звичайно вказують їх середню енергію (\bar{E}).

Гамма-кванти, не маючи заряду і маси спокою, викликають слабку іонізуючу дію, утворюючи $2-6$ пар іонів на 1 см пробігу в повітрі. В залежності від величини енергії при взаємодії в речовину вони можуть викликати такі ефекти: а) фотоелектричне поглинання - вибивання електронів з електронної оболонки атома з передачею їм всієї своєї енергії; б) комптон-ефект - вибивання електронів із зовнішньої електронної оболонки атома з передачею їм частини своєї енергії та зміною напрямку руху фотона - розсіювання; в) утворення пар – перетворення під дією сильного електричного поля ядра атома в пару "електрон-позитрон" з наступною анігіляцією. Вид взаємодії γ -квантів з речовиною визначається атомним

номером опромінюваної речовини та величиною їх енергії. При всіх трьох видах взаємодії γ -кванта з речовиною утворюються швидкі вторинні електрони, які й викликають основну іонізацію атомів середовища.

В зв'язку з тим, що імовірність зустрічі γ -квантів з електронами атома мала, вони мають великі проникаючі властивості. В повітрі γ -кванти проходять шлях у декілька сот метрів, в деревині - до 25 см, у свинці - до 5 см, в бетоні – до 10 см, у воді - десятки метрів, а живі організми вони пронизують наскрізь, являючи для них значну загрозу як джерело зовнішнього опромінення. ЛПЕ у воді γ -квантів з енергією 1,3 МеВ дорівнює 0,3 кеВ/мкм, а при енергії 0,25 МеВ вона становить 2 кеВ/мкм. Як джерела γ -квантів в біологічних дослідженнях використовують ^{60}Co , ^{125}I , ^{129}I , ^{131}I , ^{137}Cs та інші.

Характеристика основних радіонуклідів, що використовуються в біологічних дослідженнях, наведена в таблиці 15.

15. Характеристика радіонуклідів, що використовуються в біологічних дослідках

Нуклід	Період піврозпаду $T_{1/2}$	Тип розпаду	Вид випромінення та його енергія, МеВ	Середня енергія E_β , МеВ	Вихід на розпад, %	Активність 1 г, Кюрі (Бк)
^3H	12.36 років	β^-	β^- 0.018	0.01	100	$9.55 \cdot 10^3$ ($3.53 \cdot 10^{14}$)
^{14}C	5730 років	β^-	β^- 0.155	0.05	100	4.58 ($1.70 \cdot 10^{11}$)
^{13}N	10.1 хв	β^+	β^+ 1.240 γ 0.511	0.47	100 100	$2.24 \cdot 10^7$ ($8.29 \cdot 10^{17}$)
^{24}Na	15.02 год	β^-	β^- 1.390 1.639 γ 1.370 2.750	0.54	100 100 100 100	$8.58 \cdot 10^7$ ($1.93 \cdot 10^{18}$) - -
^{28}Mg	21.2 год	β^-	β^- 0.460 γ 0.031 0.400 0.950 1.350	0.15	100 100 37.8 37.8 56.8	$5.22 \cdot 10^7$ ($1.93 \cdot 10^{18}$) - - -
^{32}P	14.3 діб	β^-	β^- 1.710	0.68	100	$2.80 \cdot 10^5$ ($1.04 \cdot 10^{16}$)
^{35}S	87.4 діб	β^-	β^- 0.167	0.06	100	$4.26 \cdot 10^4$ ($1.04 \cdot 10^{16}$)
^{40}K	$1.26 \cdot 10^9$ років	β^- $\text{E}\beta^1$	β^- 1.314 1.40 R_x^2		89 11 41.1	$6.28 \cdot 10^{-6}$ ($2.32 \cdot 10^5$) -
^{42}K	12.39 год	β^-	β^- 1.970 3.520 γ 1.524	0.78 1.10	18 82 18	$5.93 \cdot 10^7$ ($2.19 \cdot 10^{18}$)
^{45}Ca	163 діб	β^-	β^- 1.970		100	$1.90 \cdot 10^4$ ($7.03 \cdot 10^{14}$)
^{54}Mn	312.5 діб	β^-	β^- 0.319		35	$4.17 \cdot 10^5$

			γ 0.835		100	$(1.54 \cdot 10^{16})$
^{60}Co	12.8 років	β^-	β^- 0.320 γ 1.172 1.333	0.10	100 99 100	$1.13 \cdot 10^7$ $(4.18 \cdot 10^{13})$
^{64}Cu	12.8 год	β^-	β^- 0.573 0.656 γ 0.511 1.340 R_x	0.19	39.6 19.3 38 0.05 41.1	$3.78 \cdot 10^7$ $(1.40 \cdot 10^{18})$
^{65}Zn	245 діб	β^+ E3	β^+ 0.325 γ 1.120 R_x	0.10	1.5 50.7 41.1	$8.0 \cdot 10^3$ $(3.07 \cdot 10^{14})$
^{89}Sr	50.5 діб	β^-	β^- 1.463	0.48	100	$2.76 \cdot 10^4$ $(1.02 \cdot 10^{15})$
^{90}Sr	28.1 рік	β^-	β^- 0.610	0.20	100	$2.0 \cdot 10^2$ $(7.40 \cdot 10^{12})$
^{90}Y	64.2 год	β^-	β^- 2.270	0.89	100	$5.70 \cdot 10^6$ $(2.11 \cdot 10^{17})$
^{106}Ru	365 діб	β^-	β^- 0.040 1.045	0.01	100 2.2	$3.40 \cdot 10^3$ $(4.51 \cdot 10^{15})$ -
^{131}I	8.07 діб	β^-	β^- 0.330 0.610 0.810 γ 0.280 0.360 0.640	0.19	13 86 1 6 79 7	$1.22 \cdot 10^3$ $(4.51 \cdot 10^{15})$ - - - -
^{134}Cs	2.06 років	β^-	β^- 0.090 0.662 γ 0.570 0.605 0.796	0.02 0.20	25 75 14 95 80	$1.16 \cdot 10^3$ $(4.29 \cdot 10^{13})$ - - -
^{137}Cs	30 років	β^- III^3	β^- 0.523 1.180 γ 0.661	0.16 0.40	8 82.5 40	98 $(3.63 \cdot 10^{11})$ -
^{140}Ba	2.74 діб	β^-	β^- 0.480 1.022 γ 0.030 0.304 0.537	0.14 0.35	40 60 16 4.6 25	$7.24 \cdot 10^4$ $(2.68 \cdot 10^{15})$ - - -
^{144}Ce	284 діб	β^-	β^- 0.170 0.300 γ 0.134	0.05 0.08	30 70 5.9	$3.20 \cdot 10^3$ $(1.18 \cdot 10^{14})$ -

¹ E3 – електронне захоплення; ² R_x – рентгенівське випромінювання; ³ III – ізомерний перехід.

Рентгенівське випромінювання - це електромагнітне випромінювання, що складається з гальмівного та характеристичного випромінень, діапазон енергій котрих коливається в межах 0,12-200,0 кеВ, що відповідає довжинам хвиль 50-0,01 нм. У спектрі електромагнітних хвиль вони межують з ультрафіолетовими променями, довжина яких складає 50-2000 нм.

Гальмівне випромінення - це фотонне випромінення з безперервним спектром, що виникає при зменшенні кінетичної енергії заряджених частинок (електрони з енергією більше 15 кеВ) внаслідок їх гальмування в полі ядра атома важких елементів. Основними джерелами рентгенівського випромінення є рентгенівські апарати, котрі широко використовуються для проведення експериментів з рослинами та тваринами, а також у рентгенодіагностиці та радіаційній терапії. В рентгенівських апаратах є можливість регулювати енергію гальмівного випромінення, яка залежить від напруги на аноді рентгенівської трубки, та інтенсивність випромінення, що залежить від сили струму на катоді.

Джерелами гальмівного випромінення можуть бути деякі радіоактивні ізотопи, β -частинки яких при гальмуванні їх в полі ядер атомів важких елементів перетворюються в імпульси гальмівного випромінення, енергія яких дорівнює енергії β -частинок. Інтенсивність такого випромінення значно нижча, ніж в рентгенівських апаратах.

Характеристичне випромінення - це фотонне випромінення з дискретним спектром, яке виникає при зміні енергетичного стану електронів атомів під впливом швидких електронів та β -частинок.

Поглинання енергії швидкого електрона електронними оболонками атома вольфраму чи молібдену, з яких виготовлений анод рентгенівської трубки, призводить до вибивання одного з електронів його внутрішніх шарів за межі атома. При цьому відбувається іонізація атома. На місце електрона, вибитого з внутрішнього шару, негайно переходить електрон з більш віддалених від ядра шарів. Цей перехід супроводжується випроміненням цілого ряду фотонів з різними значеннями енергії, характерними для кожного конкретного атома. Енергія цих фотонів може знаходитись у видимому спектрі, ультрафіолетовому та інфрачервоному спектрах в залежності від енергії частинок та порядкового номеру елемента. Тому даний вид випромінення називається характеристичним.

Взаємодія γ -випромінення з речовиною. Гамма-кванти при проходженні через речовину втрачають енергію в основному за рахунок трьох ефектів: фотоелектричне поглинання (фотоефект), комптонівське розсіювання (комптон-ефект) і утворення електрон-позитронних пар (рис. 1).

Відносна величина кожного з цих ефектів залежить від атомного номера поглинаючого матеріалу та енергії фотона.

Ефект фотоелектричного поглинання відбувається при низьких енергіях γ -квантів, як правило до 10000 еВ.

При фотоефекті γ -квант, вибиваючи електрон (частіше з К-шару), передає йому всю свою енергію і зникає, а електрон отримує енергію його енергію за мінусом енергії зв'язку електрона у атомі.

Приклад. Для іонізації одного атома необхідно:

а) в повітрі – 33-35 еВ

б) у воді - ~ 60 еВ

в) у м'якій біологічній тканині - ~ 68 еВ

Якщо енергія γ -кванта становить 10 кеВ, то при іонізації в повітрі електрон отримає: $1000 \text{ eV} - 34 \text{ eV} = 966 \text{ eV}$.

При більш високих енергіях γ -квантів (100-200 кеВ) відбувається комптон-ефект. При цьому γ -кванти, вибиваючи електрони, передають їм лише якусь частину своєї енергії, після чого міняють напрямок руху, тобто розсіюються. Цей процес продовжується до того часу, поки γ -квант повністю не передасть свою енергію вибитому електрону і закінчується фотоелементом.

10 кеВ > 99%	–	–	–
200 кеВ < 1%	> 99%	–	–
2 МеВ < 1%	~ 99%	~ 1%	–
20 МеВ	~ 50%	~ 49%	~ 1%
фотоелемент	ефект Комптона	утворення пари	ядерні реакції
Біологічна тканина			

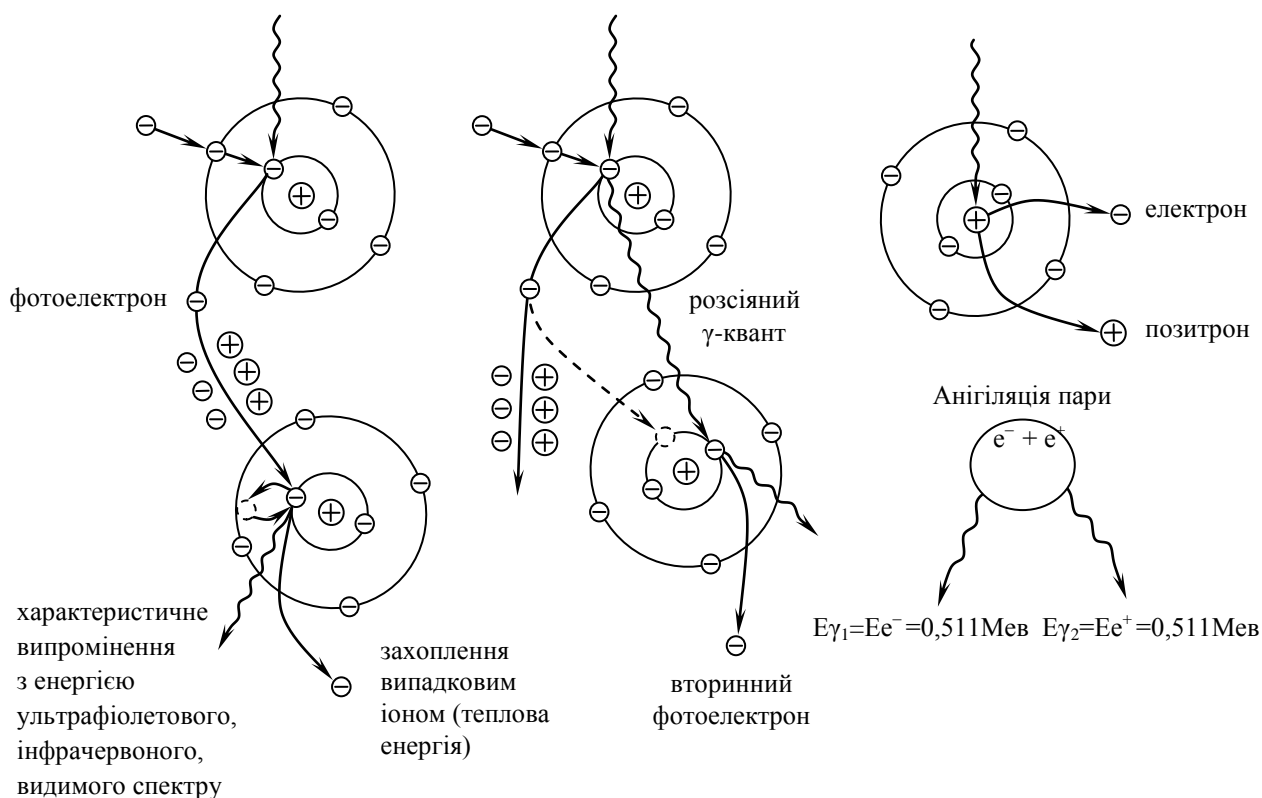


Рис. 1. Поглинання фотонного випромінювання у біологічній тканині.

Гамма-кванти з енергією від 1,022 МеВ до 20 МеВ в речовині під дією сильного електричного поля біля ядра перетворюються в пару "електрон-позитрон". В даному випадку електромагнітне випромінювання перетворюється в корпускулярні частинки. Після чого пара "електрон-позитрон" зникає (анігілює), перетворюючись в два вторинних γ -кванти з енергією, рівною енергетичному еквіваленту маси спокою часток 0,511 МеВ.

Гамма-випромінення з енергією більше 20 МеВ можуть взаємодіяти з ядрами атомів (ядерний ефект), але вірогідність цього дуже мала.

Взаємодія корпускулярних частинок з речовиною. Заряджені частинки, проходячи через речовину, поступово витрачають енергію на іонізацію, тобто відрив електрона від атома (іонізаційні втрати) та на збудження атомів і молекул (радіаційні втрати), які потім проявляються у вигляді гальмівного випромінення.

Заряджені частинки різних видів але з однаковою енергією утворюють практично однакову кількість пар іонів (однакова повна іонізація).

Альфа-випромінення - це потік позитивно заряджених α -частинок або ядер атомів гелію. Альфа-частинки складаються з двох протонів і двох нейтронів, мають подвійний позитивний заряд, атомну масу 4,003 а.о.м. ($6,664 \cdot 10^{-27}$ г), швидкість їх руху у вакуумі становить $9-25 \cdot 10^3$ км/с. Їх енергія коливається в діапазоні від 2 до 11 МеВ. Енергетичний спектр α -частинок монохроматичний або близький до нього і є характерним для кожного α -випромінюючого елемента.

Альфа-частинки випускають нестійкі ядра важких трансуранових елементів, які мають в періодичній системі Д.І. Менделєєва порядкові номери вище 82. Ядро при цьому втрачає два протони та два нейтрони і перетворюється в ядро іншого елемента, розміщеного на дві клітини ліворуч від материнського (α -розпад). Надлишкова енергія дочірнього ядра виділяється з γ -випроміненням.

Пробіг α -частинки в речовині прямопропорційний її енергії та оберненопропорційний густині речовини. Свою енергію α -частинки витрачають на іонізацію та збудження атомів середовища, утворюючи на 1 см шляху пробігу у повітрі 116000-254000 пар іонів. Щільність іонізації середовища різко збільшується наприкінці пробігу – виникає так званий пік Брега. ЛПЕ α -частинок у воді складає до 260 кеВ/мкм. Довжина пробігу, який здійснюється α -частинкою до повної втрати енергії, досягає в повітрі 10 см, у воді та м'якій біологічній тканині - 0,10-0,15 мм (таблиця 16). Втративши енергію, α -частинка приєднує два електрони і перетворюється в атом гелію.

16. Пробіг α -частинок (R) в повітрі, біологічній тканині та алюмінії

E_α , Мев	Повітря R, см	Біологічна тканина R, мк	Алюміній R, мк
4.0	2.5	31.0	16.0
4.5	3.0	37.0	20.0
5.0	3.5	43.0	23.0
5.5	4.0	49.0	26.0
6.0	4.6	56.0	30.0
6.5	5.2	54.0	34.0
7.0	5.9	72.0	38.0
7.5	6.6	81.0	43.0
8.0	7.4	91.0	48.0
8.5	8.1	100.0	53.0

9.0	8.9	110.0	58.0
9.5	9.8	120.0	64.0
10.0	10.6	130.0	69.0

Бета-випромінення - це потік негативно заряджених електронів ядерного походження, які отримали назву β -частинки. Бета-частинки випускаються ядрами радіоактивних елементів при надлишку у їх ядрах нейтронів (електронний розпад). При цьому нейтрон перетворюється у протон з виділенням β -частинки і антинейтрино. При електронному розпаді утворюються дочірні продукти, що знаходяться в метастабільному стані і мають надлишок енергії, яка виділяється у вигляді γ -квантів. Розрізняють чисті β -випромінюючі радіоактивні елементи та змішані, при розпаді яких виділяються β -частинки та в 20-80% γ -кванти.

Маса β -частинки дорівнює масі електрона (0,00548 а.о.м. або $9,11 \cdot 10^{-28}$ г). Енергія β -частинок різних природних та штучних радіоактивних ізотопів має величезний діапазон: від 0,0015-0,05 МеВ (м'яке β -випромінення) до 3, рідше 12 МеВ (жорстке β -випромінення). При електронному розпаді з ядра разом з β -частинкою виділяється антинейтрино і енергія зв'язку ядра розподіляється між ними довільно. Тому величина енергії β -частинок одного й того ж елемента неоднакова, їх енергетичний спектр суцільний, або безперервний. Середня енергія β -частинок в спектрі дорівнює приблизно 1/3 їх максимальної енергії і позначається (\bar{E}_β).

При взаємодії з середовищем β -частинка витрачає свою енергію на іонізацію та збудження зустрічних атомів (іонізаційні втрати енергії) та утворення гальмівного випромінення (радіаційні втрати енергії), котрі збільшуються із збільшенням атомної маси опромінюваної речовини. Їх шлях в речовині звивистий, так як вони легко змінюють напрямок руху під впливом електричних полів зустрічних атомів. Пробіг β -частинок при E 6-7 МеВ досягає в повітрі 25 м, в біологічній тканині – до 0,50 см. Вони утворюють 50-100 пар іонів на 1 см шляху в повітрі. ЛПЕ β -частинок у воді з середньою енергією 0,4 МеВ дорівнює 0,25 кеВ/мкм, наприкінці пробігу вона збільшується до 0,70 кеВ/мкм.

Довжина пробігу β -частинок (R_β) збільшується із збільшенням енергії (таблиця 17).

Бета-частинки середніх енергій майже повністю поглинаються шаром алюмінію та оргсклом товщиною 5 мм. В зв'язку з розсіяним типом іонізації повного захисту при роботі з джерелами β -випромінення не існує. При зовнішньому впливі великої кількості β -частинок можуть виникати β -опіки шкіри та листя рослин, пошкодження кришталіка ока. Особливо небезпечними стають вони при надходженні всередину організму.

Нейтрон (n) - електрично нейтральна частинка ядра атома всіх елементів, за винятком водню, з масою спокою 1,00898 а.о.м. Нейтрони стійкі тільки у складі стабільних атомних ядер. Вільний нейтрон - нестабільна частинка, яка розпадається на протон, β -частинку та антинейтрино; середній час життя нейтрона становить 12,5 хв.

17. Максимальний пробіг β -частинок, R_β

Максимальна енергія β -частинок, E_β , МЕВ	Алюміній		Тканина чи вода R_β , мм	Повітря R_β , см
	мг/см ²	R_β , мм		
0.01	0.16	0.0006	0.002	0.13
0.02	0.7	0.0026	0.008	0.52
0.03	1.5	0.0056	0.018	1.12
0.04	2.6	0.0096	0.030	1.94
0.05	3.9	0.0144	0.046	2.91
0.06	5.4	0.0200	0.063	4.03
0.07	7.1	0.0263	0.083	5.29
0.08	9.3	0.0344	0.109	6.93
0.09	11.0	0.0407	0.129	8.2
0.1	14.0	0.0500	0.158	10.1
0.2	42.0	0.155	0.491	31.3
0.3	76.0	0.281	0.889	56.7
0.4	115.0	0.426	1.35	85.7
0.5	160.0	0.593	1.87	119.0
0.6	220.0	0.778	2.46	157.0
0.7	250.0	0.926	2.92	186.0
0.8	310.0	1.15	3.63	231.0
0.9	350.0	1.30	4.10	261.0
1.0	410.0	1.52	4.80	306.0
1.25	540.0	2.02	6.32	406.0
1.5	670.0	2.47	7.80	494.0
1.75	800.0	3.01	9.50	610.0
2.0	950.0	3.51	11.10	710.0
2.5	1220.0	4.52	14.30	910.0
3.0	1500.0	5.50	17.40	1100.0
3.5	1750.0	6.48	20.4	1300.0
4.0	2000.0	7.46	23.6	1500.0
4.5	2280.0	8.44	26.7	1700.0
5.0	2540.0	9.42	29.8	1900.0
6.0	3080.0	11.4	36.0	2300.0
7.0	3600.0	13.3	42.2	2700.0
8.0	4140.0	15.3	48.4	3100.0
9.0	4650.0	17.3	54.6	3500.0
10.0	5200.0	19.2	60.8	3900.0
12.0	6250.0	23.2	73.2	4700.0
14.0	7300.0	27.1	85.6	5400.0
16.0	8400.0	31.0	98.0	6200.0
18.0	9500.0	35.0	110.0	7000.0
20.0	10500.0	29.0	123.0	7800.0

В речовині вільні нейтрони існують дуже короткий час (в щільних речовинах - одиниці-сотні мікросекунд) внаслідок їх сильного поглинання ядрами. Вільні нейтрони виникають в природі або утворюються в лабораторних умовах тільки в результаті ядерних реакцій. Взаємодіючи з

ядрами, нейтрони можуть: а) розсіюватись на ядрах інших елементів (пружне та непружне розсіювання); б) викликати реакції поділу важких ядер; в) поглинатися ядрами (радіаційне захоплення або реакція активації), що призводить до утворення радіоактивних ізотопів.

При пружному розсіюванні на ядрах вуглецю, азоту, кисню та інших елементів, які входять до складу біологічної тканини, нейтрони втрачають приблизно 10-15% енергії, тоді як при зіткненні з ядрами водню, які мають практично однакові з нейтронами маси, енергія нейтронів зменшується в 2 рази, передаючись протону віддачі. В результаті такої взаємодії утворюються сильно іонізовані протони, а енергія нейтронів зменшується. Розрізняють такі енергетичні групи нейтронів: а) надшвидкі - з енергією понад 20 MeV; б) швидкі - з енергією від 200 keV до 20 MeV; в) проміжні - з енергією, що не перевищує 200 keV; г) надтеплові - з енергією 0,1-0,03 eV; д) теплові - з енергією близько 0,025 eV.

Передача енергії нейтронів опромінюваній речовині відбувається безпосередньо через утворені ними вторинні частинки, в основному це ядра віддачі, протони, β -частинки. Таким чином, кінцевий біологічний ефект взаємодії нейтронів з речовиною, пов'язаний з іонізацією, котру викликають ці частинки.

Тип взаємодії нейтронів з атомними ядрами залежить від хімічного складу опромінюваної речовини (від співвідношення у ній атомів різних елементів), а також від енергії нейтронів. Відносна біологічна ефективність (ВБЕ) нейтронів коливається в залежності від енергії в межах 3-10. Якщо енергія нейтронів невідома, то при розрахунках використовують максимальне значення цього показника, тобто 10.

Протон (p) - елементарна частинка будь-якого атомного ядра, яка визначає фізичні та хімічні властивості елементів. Маса спокою протона становить 1,00758 а.о.м. ($1,6725 \cdot 10^{-24}$ г), тобто він у 1836 разів важче електрона. Протон має позитивний заряд, який дорівнює заряду електрона. Разом з нейтронами протони утворюють ядра атомів всіх хімічних елементів. Вільні протони складають основну частину первинної компоненти космічних променів. В ядрах атомів при певних умовах протон може перетворюватись у нейтрон і навпаки (позитронний розпад ядер і К-захоплення). При взаємодії нейтронів з речовиною малої питомої маси виникають протони віддачі, які виходять з ядра і викликають іонізацію та збудження атомів. ЛПЕ протонів віддачі у воді близька до ЛПЕ α -частинок і становить 143 кеВ/мкм. Вони взаємодіють з речовиною подібно α -частинкам.

4.3. Види доз іонізуючих випромінень, одиниці їх вимірювання, порядок розрахунку і застосування

Розрізняють три основних види доз іонізуючих випромінень:

- 1) експозиційну;
- 2) поглинуту;
- 3) еквівалентну.

Експозиційною є доза, яку утворює джерело іонізуючого випромінювання в повітрі. Позасистемною одиницею експозиційної дози є Рентген (Р).

Рентген – це така кількість іонізуючих випромінень, яка утворює в 1 см³ сухого повітря при нормальних умовах біля 2 млрд. пар іонів. 1 Р = 2,08 · 10⁹ пар іонів на 1 см³ повітря.

Похідними від Р є: 1 мР = 1 · 10⁻³ Р; 1 мкР = 1 · 10⁻⁶ Р.

В системі СІ за одиницю експозиційної дози прийнято **кулон на кілограм** (Кл/кг). 1 Кл/кг = 3876 Р = 3,88 · 10³ Р.

Для створення однієї пари іонів витрачається енергії:

а) в повітрі – 34 еВ

б) у воді – приблизно 60 еВ;

в) у м'якій біологічній тканині – приблизно 68 еВ.

Експозиційна доза розраховується за формулою:

$$D_x = Pt$$

де Р – потужність дози (доза, віднесена до одиниці часу);

t – час.

Поглинутою є доза, яка визначає кількість енергії іонізуючих випромінень, поглинутої одиницею маси чи об'єму опромінюваної речовини (об'єкту, суб'єкту, окремого елемента).

Позасистемною одиницею поглинутої дози є **рад**. 1 рад – це енергія 1 Р, поглинута в одиниці маси чи об'єму опромінюваного об'єкта.

Похідними від рада є: 1 мрад = 1 · 10⁻³ рад; 1 мкрад = 1 · 10⁻⁶ рад.

В системі СІ за одиницю поглинутої дози прийнято **Грей (Гр)**. 1 Гр = 100 рад; 1 рад = 0,01 Гр = 1 · 10⁻² Гр = 1 сГр.

Подальшими похідними є: 1 мГр = 1 · 10⁻³ Гр; 1 мкГр = 1 · 10⁻⁶ Гр.

Поглинута доза для джерел направленої дії розраховується за формулою:

$$D_p = D_x W$$

де D_x – експозиційна доза;

W – середньозважений коефіцієнт для різних органів і тканин організму людини, який дає можливість вирівняти ризик опромінення незалежно від того, опромінюється все тіло рівномірно, чи ні (табл. 18).

18. Значення коефіцієнта W для різних органів і тканин організму людини

Орган чи тканина	W
Статеві залози	0.25
Молочна залоза	0.15
Червоний кістковий мозок	0.12
Легені	0.12
Щитовидна залоза	0.03
Кісткова тканина (поверхня)	0.03
Інші органи і тканини	0.30
Все тіло	1.00

Задача: Потужність рентгенівського апарату становить 600 Р/год. Визначити поглинуту дозу, отриману при рентгеноскопії грудної клітини на серце, легені, молочну залозу, червоний кістковий мозок, кісткову тканину, якщо час експозиції становив 3 хв.

Порядок рішення.

1. Визначаємо експозиційну дозу: $D_x = (600 \text{ Р/год} \times 3) : 60 = 30 \text{ Р}$
2. Визначаємо поглинуту дозу на:
 - а) серце: $30 \cdot 0,30 = 9 \text{ рад};$
 - б) легені: $30 \cdot 0,12 = 3,6 \text{ рад};$
 - в) молочну залозу: $30 \cdot 0,15 = 4,5 \text{ рад};$
 - г) червоний кістковий мозок: $30 \cdot 0,12 = 3,6 \text{ рад};$
 - д) кісткову тканину: $30 \cdot 0,03 = 0,9 \text{ рад}.$
3. Визначаємо сумарну дозу на організм: $9 + 3,6 + 4,5 + 3,6 + 0,9 = 21,6 \text{ рад}.$

Еквівалентна доза визначає кількість енергії будь-якого виду іонізуючого випромінювання, поглинутої одиницею маси чи об'єму опромінюваного суб'єкту з урахуванням відносної біологічної ефективності (ВБЕ).

Позасистемною одиницею еквівалентної дози є **біологічний еквівалент рада (бер)**. Бер – це така кількість енергії будь-якого виду випромінень, поглинутої в 1 г тканини при якій спостерігається такий же радіобіологічний ефект, як при 1 рад фотонного випромінювання.

Похідними від бера є: $1 \text{ мбер} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ бер}; 1 \text{ мкбер} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ бер}.$

В системі СІ за одиницю еквівалентної дози прийнято **Зіверт (Зв)**. $1 \text{ Зв} = 100 \text{ бер}; 1 \cdot 10^{-2} \text{ бер} = 1 \text{ сЗв}.$

Подальшими похідними є: $1 \text{ мЗв} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Зв}; 1 \text{ мкЗв} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Зв}.$

Еквівалентна доза розраховується за формулою:

$$D_n = D_p \text{ВБЕ}$$

де D_p – поглинута доза;

ВБЕ – коефіцієнт відносної біологічної ефективності різних видів іонізуючих випромінень (табл. 19).

19. Відносна біологічна ефективність різних видів іонізуючих випромінень

Вид іонізуючого випромінювання	ВБЕ
Рентгенівське та γ -випромінювання	1
Електрони, позитрони, β -випромінювання	1
Протони з енергією $E < 10 \text{ MeV}$	10
Нейтрони з енергією $E < 20 \text{ keV}$	3
Нейтрони з енергією $E = 0,1 \dots 10,0 \text{ MeV}$	10
α -випромінювання з енергією $E < 10 \text{ MeV}$	20
Важкі ядра віддачі	20

Для визначення еквівалентної дози від зовнішнього γ -випромінювання на території з високим γ -фоном при розрахунку поглинутої дози використовується перехідний множник f (табл. 20).

Основні фізичні величини і одиниці, що використовуються в радіобіології, наведені в таблиці 21.

Задача: γ -фон на території біля 12-го навчального корпусу НАУ становить 17 мкР/год. Визначити еквівалентну дозу γ -випромінення для людини за один рік в м'язах при енергії фотонів 400 кеВ.

Порядок рішення:

1. Визначаємо експозиційну дозу: $17 \text{ мкР/год} \cdot 24 \text{ год} \cdot 365 \text{ діб} = 148920 \text{ мкР/рік}$.
2. Визначаємо поглинуту дозу для енергії 400 кеВ для м'язової тканини: $148920 \text{ мкР/рік} \cdot 0,96 = 142963,2 \text{ мкрад}$.
3. Визначаємо еквівалентну дозу: $142963,2 \text{ мкрад} \cdot 1 = 142963,2 \text{ мкбер} = 0,14 \text{ бер} = 0,14 \text{ сЗв}$. Зона жорсткого радіаційного контролю (4-та) вище 0,1 сЗв, але оскільки доаварійний фон по Києву становив 10 мкР, то нечорнобильські радіонукліди становлять таку частину дози: $10 \cdot 24 \cdot 365 = 87600 \text{ мкР/рік}$
 $87600 \text{ мкР/рік} \cdot 0,96 = 84096 \text{ мкрад} = 0,084 \text{ бер}$
4. Доза від радіонуклідів Чорнобильського походження становить:
 $0,14 - 0,084 = 0,056 \text{ бер} = 0,056 \text{ сЗв}$.

20. Перехідний множник f від експозиційної до поглинутої дози

Енергія фотонів, кеВ	Об'єкт опромінення		
	вода	м'язи	кістки
	Перехідний множник f, рад/Р		
10	0.91	0.92	3.46
50	0.90	0.93	3.52
100	0.95	0.95	1.45
400	0.97	0.96	0.93
1000	0.97	0.96	0.93
2000	0.97	0.96	0.93

21. Основні фізичні величини та одиниці їх вимірювання

Величина		Одиниці вимірювання			
Назва	Позна- чення	Назва		Позначення	
		СІ	Позасистемна	Укр.	Англ.
Активність радіонукліда	A	Беккерель ($2.7 \cdot 10^{-11}$ Кі) Кюрі ($3.7 \cdot 10^{10}$ Бк)		Бк Кі	Bq Ci
Експозиційна доза	X	Кулон на кілограм ($3.88 \cdot 10^3$ Р) Рентген ($2.58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг)		Кл/кг Р	C/kg R
Поглинута доза	D	Грей ($1 \cdot 10^2$ рад) рад ($1 \cdot 10^{-2}$ Гр)		Гр рад	Gy rad
Еквівалентна доза	H	Зіверт ($1 \cdot 10^2$ бер) бер ($1 \cdot 10^{-2}$ Зв)		Зв бер	Sv rem
Потужність експозиційної дози	P _X	Ампер на кілограм ($3.88 \cdot 10^3$ Р/с) Рентген в секунду ($2.58 \cdot 10^{-4}$ А/кг)		А/кг Р/с	A/kg R/s
Потужність поглинутої дози	P _D	Грей в секунду ($1 \cdot 10^2$ рад/с) Рад в секунду ($1 \cdot 10^{-2}$ Гр/с)		Гр/с рад/с	Gy/s rad/s
Потужність еквівалентної дози	P _H	Зіверт в секунду ($1 \cdot 10^2$ бер/с) бер в секунду ($1 \cdot 10^{-2}$ Зв/с)		Зв/с бер/с	Sv/s rem/s

4.4. Основні методи виявлення іонізуючих випромінень

Розрізняють такі основні методи виявлення іонізуючих випромінень:

- 1) іонізаційний, 2) сцинтиляційний, 3) люмінесцентні, 4) фотографічний, 5) хімічний, 6) калориметричний 7) біологічний.

Суть **іонізаційного методу** полягає в тому, що під дією іонізуючих випромінень відбувається іонізація опромінюваних об'єктів – повітря, води, твердих речовин, біологічних тканин тощо з утворенням позитивно і негативно заряджених іонів. Іони в лічильнику, що знаходиться під напругою, отримують направлений рух, утворюючи іонізаційний струм. Вимірюючи силу струму, можна отримати уяву про кількість (дозу) випромінень, а вимірюючи імпульси струму, можна визначити інтенсивність випромінення.

Детекторами для виявлення і вимірювання іонізації зазвичай служать іонізаційні камери, пропорційні лічильники, лічильники Гейгера-Мюллера і напівпровідникові лічильники.

За принципом іонізаційного методу працюють наступні прилади дозиметричного контролю: дозиметри (ДК-02, ДКП-50-А, ИД-1, КИД-1-6, ДКС-0,4, ДБГ-01С, МКС-У, МКС-07, ДКГ-21, МКС-05 «Тера» тощо); рентгенометри (ДП-5А,Б,В, ДКС-0,5, ДРГ-01-Т, Белла, Прип'ять тощо); радіометри («Тисс», ДП-100, КРБ-1, КРА-1, «Бета», КРК-1, УМФ-1500 тощо).

Сцинтиляційний метод оснований на реєстрації фотонів видимого світла, що виникають при збудженні атомів деяких речовин – сцинтиляторів під дією випромінення. Для виготовлення даного типу детекторів найчастіше використовуються кристали хімічно чистого NaI, активованого талієм (Tl).

Процес виявлення іонізуючого випромінення відбувається в такій послідовності: γ -квант вибиває з кристала фотон, який потрапляє на фотокатод фотоелектричного множника (ФЕМ) і, в свою чергу, вибиває з нього фотоелектрон. Фотоелектрон потрапляє на пластину - дінод ФЕМ і вибиває з неї до 10 електронів. Цей процес повторюється стільки разів, скільки пластин (дінодів) має ФЕМ. Так, при шести дінодах ФЕМ на виході отримують близько 1 млн. електронів. (Наприклад, ФЕМ приладу СРП-68-01 має 14 дінодів).

За цим принципом працюють: дозиметри (ДКС-02П,К); рентгенометри (СРП-68-01, СРП-88); радіометри (РКБ4-1еМ, РЖС-05, РУГ-Р, РИ-БГ, РИ-АБ, РУГ-01М «Гамма»); гамма-спектрометри (АМ-А-02-Ф1,2,3, АИ-1024-9505, АИ-4096, СЕГ-05, СЕГ-2МЛ); автоматичні гамма- і бета-лічильники («Гамма-12», «Бета-2» тощо).

Люмінесцентні методи виявлення іонізуючого випромінення оснований на ефектах радіофотолюмінесценції і термолюмінесценції.

При радіофотолюмінесценції під дією іонізуючих випромінень в люмінофорах – фосфатних скельцях (NaI, ZnS, активованих сріблом) утворюються центри фотолюмінісценції. Під час дії на них ультрафіолетових променів виникає видима люмінесценція, інтенсивність якої спочатку пропорційна дозі 10^{-2} – 10^1 Гр, при дозі $3,5$ – 10^2 Гр досягає максимуму і при

подальшому збільшенні дози – падає. Під дією ультрафіолетових променів центри люмінесценції руйнуються, що дає можливість проводити вимірювання дози багаторазово.

При радіотермолюмінесценції поглинута енергія випромінювання перетворюється в люмінесценцію лише під дією температури, а її інтенсивність пропорційна дозі випромінювання. Тому дозиметри даного типу можуть слугувати накопичувачами дози. Для запобігання втрати дози необхідно підібрати фосфатні скельця, які висвітлять її при температурі близько 400°C.

За цим принципом працюють дозиметри ДПГ-02, ДПГ-03, ИКСА, DTU тощо.

Фотографічний метод оснований на вимірюванні ступеня почорніння фотоемульсії під впливом іонізуючих випромінень. Його ступінь в деякому діапазоні доз пропорційна експозиційній дозі. Опромінені плівки типу РМ-5-1, РМ-5-3 і РМ-5-4 дозволяють реєструвати γ -випромінювання в діапазоні експозиційних доз 0,02–2,0 Р, 0,3–12 Р, 0,01–50,0 Р відповідно.

Перевагами фотографічного методу є можливість його масового використання для індивідуального контролю, документальна реєстрація отриманої дози та стійкість дозиметрів до ударів і різких змін температури.

Недоліки даного методу – низька чутливість до малих доз, неможливість спостереження за ходом накопичення дози безпосередньо в процесі опромінення, залежність результатів вимірювань від умов проявлення плівки.

Складність використання даного методу полягає в тому, що для визначення отриманої дози необхідно мати еталон, виготовлений з такого ж матеріалу як в дозиметрі, опроміненого відомою дозою і проявленого в аналогічних умовах. Це значить, що потрібне джерело іонізуючого випромінювання, яке може створювати контрольовану дозу.

За цим принципом працюють дозиметри ИФК-2,4, ИФКУ тощо.

Хімічний метод оснований на тому, що під дією іонізуючих випромінень деякі речовини можуть перетворюватись на інші. Наприклад, при опроміненні хлороформу утворюється соляна кислота. Якщо взяти хлороформ, додати до нього індикатор соляної кислоти, то при наявності іонізуючих випромінень його забарвлення починає змінюватись. Тому на корпус такого дозиметра можна наклеїти візуальну шкалу зміни забарвлення в залежності від дози опромінення. Це дає нам можливість спостерігати за ходом її накопичення в процесі опромінення. Визначення точного значення дози проводиться на приладах типу фотоелектрокалориметрів (ФЕК), відградуйованих в одиницях дози іонізуючого випромінювання, що її спричинили.

В теперішній час зазвичай користуються так званими “сухими”(“сліпими”) феросульфатними дозиметрами, для яких використовують насичений повітрям розчин FeSO_4 в розбавленій H_2SO_4 в діапазоні вимірювання дози 20-400 Гр. Для більш високих доз (10^3 – 10^5 Гр)

використовують церієвий дозиметр (0,1 М розчин $\text{Ce}_2(\text{SO}_4)_3$ в 0,4 М H_2SO_4). Але продовжують використовувати й хімічні дозиметри на основі хлороформу і чотирьоххлористого вуглецю, не зважаючи на те, що при оцінці відносно малих доз вони дають більшу похибку.

Чутливість хімічних методів дозиметрії значно нижча, ніж іонізаційних, сцинтиляційних, люмінесцентних і фотографічних. Крім того, для реєстрації показників необхідні значні затрати часу.

Калориметричний метод оснований на тому, що під дією іонізуючих випромінень в опромінюваних об'єктах підвищується температура. Цей метод використовується для вимірювання надзвичайно високих потужностей дози. Без нього було б неможливо слідкувати за ситуацією, що відбувається в ядерному реакторі.

Таким чином, кожний з перерахованих методів займає певне незамінне місце у виявленні іонізуючих випромінень.

Біологічний метод використовується в радіобіології для відновлення отриманої організмом величини поглиненої енергії (дози) від різних видів випромінення. Він заснований на врахуванні біологічних ефектів, котрі виникають у опроміненому організмі, через певний час після дії іонізуючої радіації. Вихід цих ефектів прямопропорційний дозі опромінення.

Величину дози оцінюють за рівнем летальності тварин, ступенем лейкопенії через 7-9 діб після опромінення, кількістю хромосомних аберацій лімфоцитів периферичної крові за допомогою методів анафазного та метафазного аналізу і за цитогенетичними показниками репродуктивних клітин ссавців та рослин; за визначенням кількості вільних радикалів в безводних речовинах (зубна емаль, волосся) за допомогою методу ядерного магнітного резонансу і ступеню прояву деяких клінічних симптомів та біохімічних змін у крові та сечі.

Наприклад, зміни в крові (сполучні тканині) ссавців можна достовірно спостерігати після дози опромінення 50 рад і навіть 20 рад. Зміни в інших тканинах живого організму,

4.5. Методи радіометрії

Для визначення радіоактивності використовують три основні методи:

1) абсолютний; 2) розрахунковий; 3) відносний.

Абсолютний метод оснований на використанні прямого рахунку всієї кількості часток ядер, що розпадаються в умовах геометрії, близької до 4π . При цьому активність зразка виражається не в імпульсах струму, а в одиницях радіоактивності – Кі і Бк. Для цього методу оцінки радіоактивності використовують такі 4π -лічильники, в які розміщують зразки: газопротічний типу СА-4БФЛ або рідинні сцинтилятори типу ЖС-1 чи ЖС-7. Даний метод поки що не має широкого практичного використання через високу вартість 4π -лічильників і велику складність підготовки зразків. Але він є практично єдиним методом для вимірювання еталонних зразків.

Розрахунковий метод оснований на реєстрації імпульсів, що надходять від детектора на блок реєстрації і подальшій математичній обробці отриманих цифрових показників. При цьому істинну радіоактивність визначають за формулою:

$$A_{np} = \left(\frac{N_{0np}}{\omega \varepsilon k p q r t} \right) 2,22 \cdot 10^{12}$$

де $N_{0np} = N_{np} + \phi - N_{\phi}$ – швидкість рахунку від проби без фону;

ω – поправка на геометричні умови вимірювання;

ε – поправка на лічильну здатність детектора;

k – поправка на поглинання випромінень в шарі повітря і вікні (стінці) лічильника;

p – поправка на самопоглинання в шарі препарату;

q – поправка на зворотне розсіювання від кювети;

r – поправка на схему розпаду;

t – поправка на γ -випромінення при змішаному β - і γ -випроміненні;

m – наважка препарату, мг;

$2,22 \times 10^{12}$ – перехідний коефіцієнт від числа розпадів за хвилину в Кі.

Відносний метод оснований на порівнянні швидкості рахунку від препарату з відомою активністю (еталону) зі швидкістю рахунку від препарату невідомої активності (вимірюваного зразку). При цьому активність розраховують із такої пропорції:

$$\frac{A_{em}}{N_{0em}} = \frac{A_{np}}{N_{0np}} \quad \text{звідси} \quad A_{np} = \frac{A_{em} \cdot N_{0np}}{N_{0em}}$$

В цьому методі головним є правильний підбір еталону, вартість якого у деяких випадках значно вища, ніж найдорожчий спектрометр. Тому еталони не може мати й лабораторія самого високого класу. Ними забезпечують спеціальні заводи по еталонуванню радіометричної апаратури. В Україні такий завод знаходиться в м. Біла Церква. На заводі еталонів проводиться еталонування-паспортизація всіх приладів, призначених для експертної оцінки вмісту радіонуклідів. В залежності від завдань лабораторіями замовляються коефіцієнти зв'язку для проб, що вимірюються. Для кожного виду зразку дані коефіцієнти визначається шляхом поділу $A_{ет}$ на $N_{0ет}$. $A_{ет} : N_{0ет} = K_{зв}$. Після цього активність проби розраховують за формулою:

$$A_{пр} = K_{зв} N_{0пр}$$

Паспортизація проводиться не рідше одного разу на рік, так як період напіврозпаду найбільш значимих радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr становить, відповідно, 30 та 20 років. Похибка за рік не перевищує 3%.

Для визначення природної радіоактивності еталоном може служити радіонуклід, що найбільше накопичується живими організмами – ^{40}K . Тому використання хімічно чистої солі KCl, активність якої становить $3,87 \cdot 10^{-7}$ Кі/кг, дозволяє вимірювати природну радіоактивність в продукції сільськогосподарського виробництва без еталонування.

До відносного методу відносяться такі експрес-методи визначення сумарної β -активності:

1) **Вимірювання в товстому шарі.** Товстим шаром називається шар препарату, активність якого не змінюється при подальшому збільшенні його товщини. Наприклад відомо, що пробіг β -частинок в біологічній тканині становить до 10 мм. Якщо взяти розмелений зразок біологічної тканини з активностями: 7 мм – 70 Бк; 8 мм – 80 Бк; 9 мм – 90 Бк; 10 мм – 100 Бк; 11 мм – 100 Бк; 12 мм – 100 Бк, то товстим шаром буде зразок товщиною 10 мм. Цей метод дозволяє вимірювати зразки без зважування.

2) **Касетний метод.** Підвищує лічильну здатність приладу та швидкість вимірювання зразку за рахунок збільшення кількості детекторів.

3) **Кюветний метод.** Дозволяє покращити геометричні умови вимірювання до 4π за рахунок того, що в абсолютному методі проба знаходиться в детекторі, а в даному випадку детектор знаходиться в пробі.

4) **Визначення сумарної β -активності по зольному залишку.** Використовується при низькій концентрації радіоактивних речовин в зразку. Розрахунок проводиться за формулою:

$$A_{\text{пр}} = N_{0\text{пр}} K_{\text{зв}} M$$

де M – коефіцієнт зольності, що визначається діленням маси золи в грамах на масу сирого зразку в грамах.

Приклад. Маса сирого зразку вівса 100 г. Маса золи – 3 г. Визначити сумарну β -активність.

Рішення. $M = 3 : 100 = 0,03$; $K_{\text{зв}} \text{ по } KCl = 3,87 \times 10^{-7}$; $N_{KCl} = 24 \text{ імн/хв.}$; $N_{\phi} = 10 \text{ імн/хв.}$; $N_{\text{золи}} = 13 \text{ імн/хв.}$

$$K_{\text{зв}} = (3,87 \cdot 10^{-7}) : 14 = 0,276 \cdot 10^{-7} = 2,76 \cdot 10^{-8} \text{ Ки/кг}$$

$$A_{\text{вівса}} = 3 \cdot 2,76 \cdot 10^{-8} \cdot 0,03 = 0,248 \cdot 10^{-8} = 2,48 \cdot 10^{-9} \text{ Ки/кг} = 91,8 \text{ Бк/кг}$$

4.6. Призначення, класифікація, принцип будови дозиметричних приладів

Дозиметричні прилади використовують для оцінки радіаційної обстановки, яка включає:

- вимірювання потужності дози фотонного випромінювання на місцевості, у приміщенні та ін;
- визначення рівнів забруднення поверхонь α - і β -частинками;
- визначення вмісту радіонуклідів в об'єктах навколишнього середовища;
- ізотопний склад радіонуклідів, який дозволяє робити висновки щодо їх токсичності та нормувати їх вміст в продуктах харчування.

Дозиметричні прилади за призначенням умовно поділяють на чотири основні групи:

1. Дозиметри - або прилади індивідуального дозиметричного контролю. Вони призначені, як правило, для визначення поглинутої або еквівалентної дози фотонного та нейтронного опромінення людини у надзвичайних ситуаціях. Вони обов'язково використовуються у випадках, якщо ефективна еквівалентна доза може перевищити $1/3$ частину ліміту дози, встановленого НРБУ для опромінення осіб категорії А.

2. Рентгенометри - прилади, що призначені для визначення потужності дози фотонного випромінювання у повітрі.

3. Радіометри - прилади, що призначені для визначення інтенсивності потоку частинок та квантів іонізуючих випромінень за одиницю часу. За їх допомогою визначають концентрацію радіоактивних речовин в об'єктах навколишнього середовища та біологічних речовинах, питому активність, щільність забруднення різних поверхонь радіонуклідами.

4. Спектрметри - прилади, що призначені для визначення ізотопного складу радіонуклідів по енергії їх випромінювання. Розрізняють α -, β - та γ -спектрметри.

Дозиметри в свою чергу ділять на сигнальні; індикаційні; індивідуальні.

Сигнальні дозиметри призначені для звукового попередження появи підвищеної кількості іонізуючих випромінень.

Індикаційні дозиметри призначені для приблизного визначення ступеня небезпеки іонізуючих випромінень.

Індивідуальні дозиметри призначені для вимірювання отриманої дози в конкретній ситуації чи за визначений час роботи.

Крім того, за призначенням дозиметри поділяють ще на такі групи: а) аварійні - "Гнейс", ИКС-А; б) термолюмінісцентні - КДТ; хімічні – ДП; в) іонізаційні – ДКП-50А, ИД-І; ИД-ІІ; г) технологічні – "Щелкун", ДК-0,2, КИД, ИФК, ИФКУ; д) для вимірювання малих доз випромінювання – ДРС-1, ДЕС-04, КИД-2, КИД-6, ДК-02; е) для робіт з особливою радіаційною небезпекою – дозиметр сигналізатор ДЕГ-07.

За видом випромінень, що реєструються, дозиметри поділяють на:

1) комбіновані – а) β -, γ - і нейтронне випромінювання - ИАД, "Гнейс", ДП-70МР, КДП-02, ДРС-1, ИФКУ; б) γ -нейтронні – ИД-1, ИД-2, ДП-70М; в) β -, γ - ДП-70, "Щелкун"; г) рентгенівське та γ -випромінювання – ИДК-4, КИД-1,2,6;

2) для одного виду випромінень (γ -випромінювання) – ДК-2, ДКП-50А, КДТ-1, ИКС-А, ДЕГ-07, КИД-4.

За видами доз, що реєструються, дозиметри поділяють на: експозиційної – ДК-02, ДКП-50А, ДП-70, КИД-1,2,6, КДТ-1,2, ИКС-А, ДЕГ-07; поглинутої – ИД-1,2, ДП-70М; еквівалентної – ИФК-2, ИФКУ, ДП-70МП, ДРС-01; тканинні – "Гнейс", ИАД.

За діапазоном доз, що реєструються, дозиметри поділяють на: а) чутливі – ДК-02, "Щелкун", КИД, ИФК-2, ИФКУ, ДРС-1, ДЕГ-07; б) середньої чутливості – ДКП-50А, ДС-50, ИДК-4; в) аварійні (грубі, розраховані на високі рівні радіації) – ИД-1,2, ДП, КДТ, ИКС-1, "Гнейс", "Дисней".

Конструктивно дозиметри поділяються на: а) прямопоказуючі – ДК-02, ДКП-50А, ИД-1; б) непрямопоказуючі (сліпі) – ИД-2, ДС-50, ДП, КДТ, ИКС-А, ИАД, "Гнейс".

Також дозиметри поділяють за можливостями виявлення іонізуючих

випроміненнь різного спектру: а) низько- (до 200кеВ) – “Щелкун”, ИДК-4; б) середньо- (до 1,25 МеВ) – КДТ, ИКС-А, ДЕГ-07; в) високоенергетичні (1,5-3 МеВ) – ДП, ДКП-50А, ДС-50, ИД-1,2, КИД, ИФКУ.

Рентгенометри, радіометри і спектрометри відносять до приладів загального дозиметричного контролю. За їх допомогою одержують дані, які використовують для оцінки радіаційної ситуації у радіологічних лабораторіях, на підприємствах, території району і в цілому у оточуючому середовищі.

Класифікація цих приладів умовна. Деякі з приладів є універсальними і можуть виконувати функцію як рентгенометрів, так і радіометрів, і дозиметрів. Все залежить від конструктивних властивостей приладу. Для полегшення викладання та сприйняття матеріалу прийнято розглядати кожену групу приладів окремо.

Дозиметричні прилади складаються, як правило, з чотирьох основних блоків: блок детектування, блок посилення та перетворення, блок реєстрації та блок живлення (рис. 2). В сучасних приладах кількість блоків може бути значно більшою, в залежності від їх класів та функцій.

В залежності від конструктивних особливостей прилади поділяють на три типи:

1. Стационарні – АМ-А-02-Ф1,2,3; АИ-1024; Бета-2; РУГ-91; ДП-100; МКС-0,1Р тощо.
2. Переносні - ДП-5А,Б,В; СРП-68-01; СРП-88М; ДКС-0,4; МКС-0,4; “Белла”, “Прип’ять”, “Рось” тощо.
3. Комбіновані – ИФКУ; ИФК-2,4; ДК-0,2; ДКП-50; КИД-1-6; ИД-1; ИКС-А; ДТУ тощо.

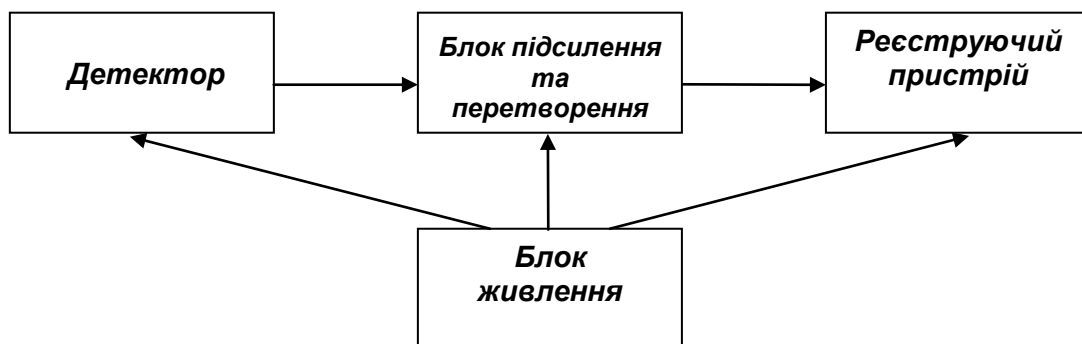


Рис. 2. Принцип будови дозиметричних приладів

Прилади класифікуються також за методами виявлення іонізуючих випроміненнь, в залежності від типу детектора – іонізаційні, сцинтиляційні, люмінесцентні, фотографічні, хімічні, калориметричні, нейтронно-активаційні та біологічні.

4.7. Прилади індивідуального дозиметричного контролю

4.7.1. Прилади, що працюють на базі іонізаційного методу виявлення іонізуючих випроміненнь (рис. 3)

Дозиметр кишеньковий прямопоказуючий ДК-0,2 призначений для контролю за експозиційною дозою жорсткого рентгенівського випромінення та γ -випромінення з енергією 0,2-2,0 МеВ в діапазоні 0,01-0,20 Р. Потужність експозиційної дози не повинна перевищувати 6 Р/год. В комплект приладу входять десять вимірювальних камер ДК-0,2 і зарядний пристрій ЗД-6, призначений для зарядки дозиметрів. Саморозрядка дозиметра не перевищує 10% значення шкали за добу. Похибка виміру $7 \pm 10\%$.

Вимірювальна камера складається з трьох частин: інтегруючої іонізаційної камери з повітряноеквівалентними стінками, електроскопу та мікроскопу. Конденсатор, утворений внутрішніми стінками камери і центральним електродом, заряджується до визначеного потенціалу. При дії випромінення повітря в робочому об'ємі дозиметра іонізується, і потенціал камери зменшується пропорційно дозі опромінення. Його вимірюють за допомогою вмонтованого в дозиметр мініатюрного електроскопу. Відхилення рухомої системи електроскопу (платинована кварцева нитка діаметром 5 мкм) визначається по шкалі мікроскопа, що відградує в мілірентгенах.

Конструктивно дозиметр виконано у вигляді авторучки з утримувачем для закріплення на одязі. Циліндричний корпус із дюралюмінію виконує функцію зовнішнього електрода іонізаційної камери. Об'єм камери - 1,8 см³. Зарядний пристрій має корпус та зарядне гніздо для дозиметра, потенціометр для встановлення необхідної напруги на конденсаторі у діапазоні 180-250 В.

Принцип роботи зарядного пристрою ЗД-6 базується на п'єзoeлектричному ефекті. Під впливом тиску дозиметра на п'єзоелементи перетворювача механічної енергії в електричну відбувається деформація та утворення на їх протилежних сторонах різниці потенціалів. Позитивний заряд подається на стержень зарядного пристрою, негативний - на корпус. Для зменшення вихідної напруги зарядного пристрою використовується розрядник.

Зарядний пристрій ЗД-6 призначений також для зарядки інших прямопоказуючих дозиметрів: ДКП-50, ІД-1, ІД-0,2.

Індивідуальні дозиметри ДКП-50А, що входять до комплекту ДП-22-В і ДП-24 - це кишенькові конденсаторні камери, які призначені для вимірювання індивідуальних доз фотонного випромінення в аварійних умовах в діапазоні 2-50 Р при потужності дози 0,5-200 Р/год (енергія фотонів становить 0,2-2,0 МеВ. Саморозряд дозиметра не вище 4 Р за добу. Похибка виміру $7 \pm 15\%$. Комплектація, конструкція і принцип дії цих приладів аналогічні дозиметру ДК-0,2.

Індивідуальний дозиметр КІД-2 призначений для індивідуального дозиметричного контролю при роботі з рентгенівським і γ -випроміненням з енергією 0,02-2,0 МеВ в діапазоні 0,005-1,0 Р. Цей діапазон вимірювань розбито на два піддіапазони: 0,005-0,05 Р при потужності експозиційної дози, яка не перевищує 6 Р за годину і 0,05-1,0 Р при потужності експозиційної дози до 120 Р за годину. Саморозряд конденсаторних камер дозиметра не

перевищує 0,002 Р за добу. Похибка вимірювання в діапазоні енергії 150 кеВ - 2,0 МеВ становить $7 \pm 10\%$, в діапазоні енергій 10-150 кеВ - $7 \pm 60\%$.

В комплект даного приладу входять зарядно-вимірювальний пристрій і дозиметри. Дозиметр складається з двох іонізаційних камер, розрахованих на максимальні експозиційні дози 0,05–1 Р. Кожна камера - це електрична ємність, утворена центральним електродом і корпусом. Зарядно-вимірювальний пристрій служить для зарядки конденсаторних камер та визначення дози. Живлення зарядно-вимірювального пристрою здійснюється від мережі змінного струму.

Комплект індивідуального дозиметричного контролю КІД-1, призначений для вимірювання експозиційних доз жорсткого рентгенівського та γ -випромінювання в діапазонах 0,02-0,2 Р і 0,2-2,0 Р. Він являє собою модифікацію комплекту КІД-2. Конструктивно зарядно-вимірювальний пульт приладу КІД-1 виконаний у вигляді настільного приладу з похилою передньою панеллю та з'ємною кришкою. На панелі знаходяться: вимірювальний прилад з регулятором установки нуля шкали, гнізда "Заряд" і "Вимір", регулятор установки зарядної напруги, тумблер вмикання та дві сигнальні лампи, що вказують робочі піддіапазони 0,2 і 2,0 Р. принцип дії дозиметра КІД-1 та порядок роботи з ним аналогічний дозиметру КІД-2.

Загальним недоліком іонізаційних конденсаторних камер дозиметрів ДК-0,2, ДКП-5А, КІД-1, КІД-2 та їх аналогів є саморозряд. Тому дозиметри використовують протягом одного робочого дня. Саморозряд дозиметра контролюють по контрольному дозиметру, який знаходиться протягом робочого дня у свинцевому контейнері.

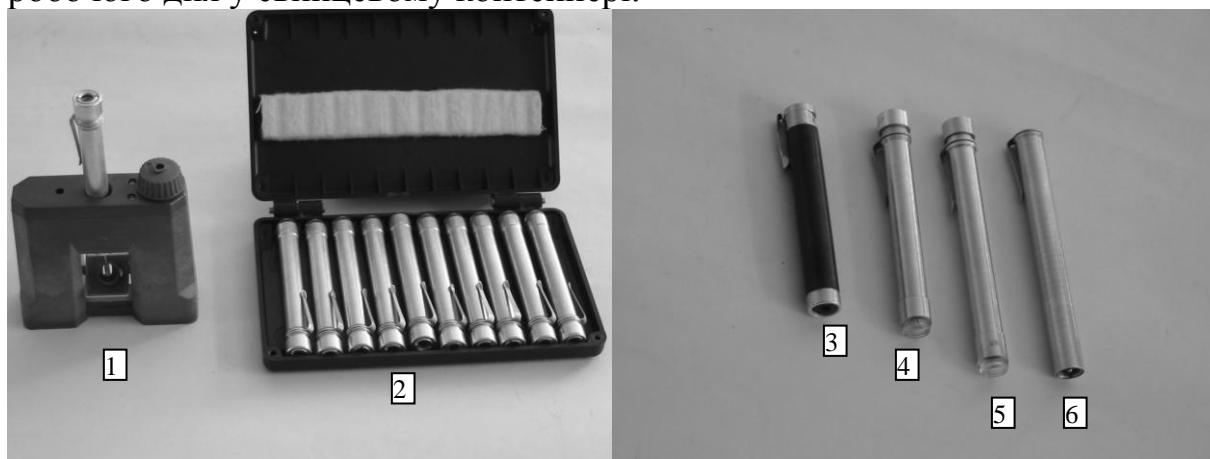


Рис. 3. Загальний вигляд приладів індивідуального дозиметричного контролю: 1 – зарядний пристрій ЗД-6; 2 – комплект індивідуальних дозиметрів ДК-02; 3 – дозиметр КІД-1; 4 – дозиметр ДК-02; 5 – дозиметр ДКП-50А; 6 – дозиметр ІД- 1

Індивідуальний дозиметр ДКС-04 "Стриж" (рис. 4) використовується для виявлення, оцінки та вимірювання за допомогою звукової та світлової сигналізації щільності потоку теплових нейтронів, рентгенівського та жорсткого β -випромінювань. Дозиметр подає звуковий та світловий сигнали при наявності потоку теплових нейтронів, жорсткого γ -

випромінення з енергією більше 0,5 MeV, а також рентгенівського та γ -випромінення. Цей прилад вимірює потужність експозиційної дози і експозиційну дозу рентгенівського та γ -випромінень в діапазоні енергій фотонів 0,05-3,0 MeV. Діапазон потужності експозиційної дози - 0,1-999,9 мР/год ($7,16 \cdot 10^{-12}$ - $7,16 \cdot 10^{-8}$ А/кг); діапазон вимірювань експозиційної дози 1-4096 мР ($2,58 \cdot 10^{-7}$ - $1,03 \cdot 10^{-3}$ Кл/кг).



Рис. 4. Індивідуальний дозиметр ДКС-04 «Стриж».

Детектором γ -випромінення є малогабаритний газорозрядний лічильник типу СБМ-21 з додатковим циліндричним кадмієвим фільтром. Використання кадмію збільшує чутливість детектора на теплові нейтрони у 4 рази внаслідок реєстрації захоплюючого нейтронного випромінення.

В результаті впливу іонізуючого випромінення на виході детектору виникають імпульси, котрі за допомогою електричної схеми перетворюються у звукову та світлову сигналізацію, а також цифрову інформацію про значення експозиційної дози та її потужності.

Сигналізація працює в режимах "Межа" експозиційної дози та "Пошук". В другому режимі сигналізація спрацьовує від кожного імпульсу, зареєстрованого лічильником. В першому режимі сигналізація включається при перевищенні значень дози 1 мР ($2,6 \cdot 10^{-7}$ Кл/кг). Живлення дозиметра здійснюється від мережі змінного струму та акумуляторів типу Д-01.

Конструктивно дозиметр виконано у вигляді портативного кишенькового приладу. Корпус зроблено із міцного протиударного полістеролу у вигляді прямокутної коробки, що складається з двох з'єднаних між собою половинок.

Дозиметр індивідуальний ДКГ-21 призначений для вимірювання індивідуальної еквівалентної дози та потужності еквівалентної дози γ -випромінення. Особливістю даного дозиметра є можливість запам'ятовування в енергонезалежній пам'яті історії накопичення дози та передачі даної інформації в комп'ютер через інфрачервоний порт; світлова та звукова індикація перевищення запрограмованих порогових рівнів дози; автоматичне вимкнення за умови рівня гамма-фону нижче встановленого порогу за миттєвим відключенням при його зростанні.

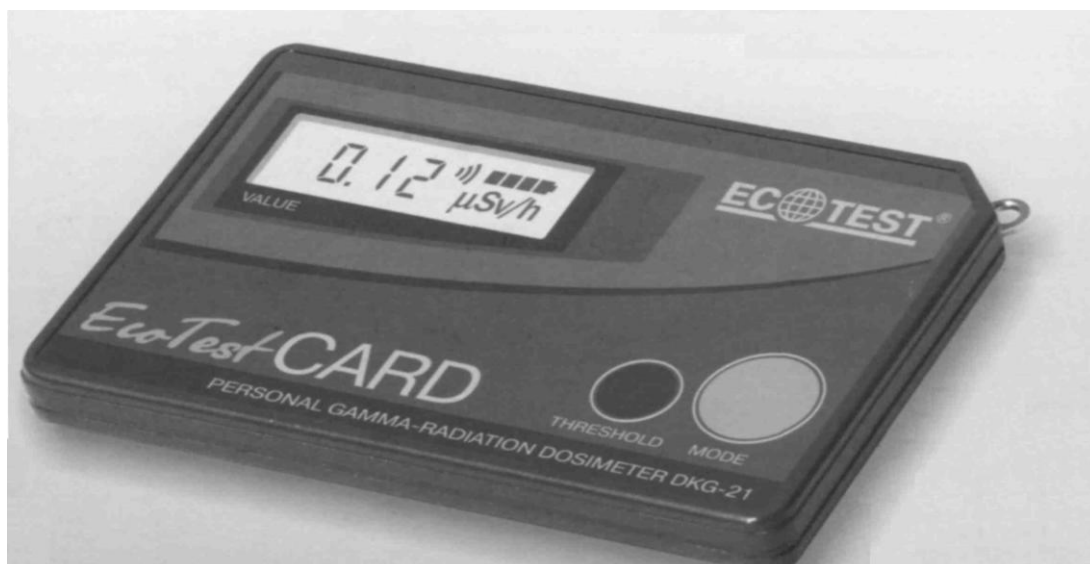


Рис. 5. Дозиметр гамма-випромінення індивідуальний ДКГ-21.

Діапазон вимірювання потужності еквівалентної дози (мкЗв/год) 0,1-1000000; еквівалентної дози (мЗв) 0,001-9999, при відносній похибці вимірювання $\pm 15\%$.

Енергетичний діапазон реєстрованого γ -випромінення становить від 0,05 до 6,0 МеВ.

Дискретність запам'ятовування в енергонезалежній пам'яті історії накопичення дози від 5 до 30 хв.

4.7.2. Прилади, що працюють на базі сцинтиляційного методу виявлення іонізуючих випромінень

Дозиметри гамма-випромінення ДКС-02П, ДКС-02К (рис. 6) призначений для вимірювання потужності еквівалентної дози γ - та рентгенівського випромінення.



Рис. 6. Дозиметр гамма-випромінення ДКС-02П.

Дозиметр укомплектований детектором γ -випромінення типу «СЕЛДІ» (CsI-сцинтилятор-фотодіод). Прилад здійснює автоматичний вибір інтервалів (від 2 до 1 с.) в діапазоні вимірювання, обладнаний звуковою та вібраційною сигналізацією, яка спрацьовує при перевищенні запрограмованих порогових рівнів потужності дози.

Діапазон вимірювання потужності еквівалентної дози γ - та рентгенівського випромінення становить 0,05-300,0 мкЗв/год. при основній відносній похибці $\pm 15\%$.

Енергетичний діапазон вимірювань становить 0,05-3,0 МеВ.

Максимальний час вимірювання – 2 с.

4.7.3. Прилади, що працюють на базі фотографічного методу виявлення іонізуючих випромінень

Комплект індивідуальних фотодозиметрів ІФК-2,3 призначений для визначення величини дози рентгенівського, γ - і β -випромінення, а також для контролю інтегральної дози опромінення тепловими і швидкими нейтронами по почорнінню рентгенівської плівки. Діапазон енергій: β -випромінення 0,2-3,5 МеВ; рентгенівського та γ -випромінення 0,02-3,0 МеВ. Діапазон визначення доз залежить від типу використаної рентгенівської плівки (РМ-5-1, РМ-5-3, РМ-5-4 та ін.) і може коливатись для рентгенівського і γ -випромінення від 0,01 до 50 Р, а для β -випромінення від 0,05 до 2,0 рад. Похибка вимірювання сумарних доз складає $7 \pm 20\%$.

Для визначення оптичної щільності почорніння рентгенівських плівок використовують денситометр ДФЕ-10.

Дозиметр ІФК-2,3 має фільтри-поглиначі, що дає можливість приблизно оцінювати енергію фотонного випромінення і розраховувати поглинуті дози у критичних органах.

Корпус касети має розміри 50 x 40 x 10 мм і поділений на чотири секції. Одна секція - наскрізне вікно, у трьох інших встановлені: 1 - свинцеві фільтри (0,75 мм) з пластинкою гетінакса; 2 - алюмінієві фільтри (2 мм) з пластинкою гетінакса; 3 - гетінакс з кадмієвою фольгою (0,027 мм).

Дозиметр ІФКУ використовують для вимірювання поглинутих доз γ -випромінення з енергією фотонів від 0,1 до 3,0 МеВ, β -випромінення з енергією від 1,0 МеВ і більше, а також еквівалентної дози теплових нейтронів. Діапазон вимірювань (при використанні плівки РМ-5-1) становить 0,05-2,0 рад (бер). Максимальна похибка вимірювань доз γ -випромінень - 20%, β -випромінення - 50%. Розмір касети з фільтрами алюмінію, свинцю і кадмію 67 x 33 x 10 мм.

Описані дозиметри працюють за однаковим принципом - утворення прихованого фотографічного зображення при іонізації солей срібла, які містяться в фотоемульсії, випромінюваннями. Густина почорніння опромінених плівок після проявки в стандартних умовах визначається денситометром. Користуючись градуйованою кривою залежності інтенсивності почорніння плівки від дози, розрахованої при опроміненні

контрольних плівок відомими дозами, визначають індивідуальні поглинуті дози за час опромінення.

4.7.4. Прилади, що працюють на основі люмінесцентного методу виявлення іонізуючих випромінень

Люмінесцентні дозиметри поділяються на радіофотолюмінесцентні (РФЛ) та термолюмінесцентні (ТЛ). принцип їх роботи такий: при поглинанні кристалами (люмінофорами) енергії іонізуючого випромінення виникають вільні електрони, котрі захоплюються центрами люмінесценції. Цей процес називається запасанням світлосуми. Звільнення електронів з «пасток» при нагріванні або додатковому опроміненні кристалу призводить до рекомбінації вільних електронів з дірками на центрах люмінесценції. Енергія, яка виділяється при рекомбінації, переводить центр у збуджений стан. При цьому виникає люмінесценція, котра і є мірою поглиненої енергії, тобто дозою випромінення.

Комплект термолюмінесцентних дозиметрів КДТ-1 призначений для індивідуального дозиметричного контролю в широкому діапазоні експозиційних доз γ -випромінення ($1 \cdot 10^1 - 1 \cdot 10^4$ Р). він складається з набору касет з детекторами на основі LiF і CaSO₄, активованого марганцем, а також вимірювального пульта.

Дозиметр КДТ-02 призначений для вимірювання експозиційної дози γ -випромінення з енергією 0,06-1,25 MeV в діапазоні $0,03 - 1,0 \cdot 10^3$ Р. Прилад складається з дозиметрів з детекторами на основі LiF і скелець, що люмінесціюють, які містять борат магнію, а також пульта для реєстрації показників детекторів.

Дозиметр ІКС-А використовується для вимірювання великих експозиційних доз γ -випромінення ($0,5 - 8,0 \cdot 10^3$ Р) в аварійних умовах. В них детектором випромінень є алюмофосфатні скельця.

Загальна характеристика приладів індивідуального дозиметричного контролю наведена в таблиці 22 .

22. Характеристика приладів індивідуального дозиметричного контролю

Назва дозиметру	Метод реєстрації	Вид реєстрованого випромінення	Потужність експозиційної дози	Енергія випромінення, MeV	Діапазон вимірювання	Похибка, %	Само-розряд
КІД-1	Іонізаційний	α, γ	до 33	0.15-200	0.005-1.0	± 10	≤ 0002 Р/с
ДК-02		γ	до 100	0.2-2.0	10-200	± 10	10% шкали за 24 год.
ДКП-50А		γ	0.5-200	0.2-2.0	2-50	± 10	
ДКС-04		β, γ	0.1-999.9	0.01-3.0	1-4096	± 20	
ІД-1		γ, n	10-3600	0.2-2.0	2-500	± 10	≤ 1 поділки шкали
ІФК-2,3	Фотографіч-	α, γ	0.06-1.25	0.02-3.0	0.01-50	± 20	-
		β	-	0.2-3.0	0.05-2.0	± 20	-

ІФКУ	ний	α, γ	0,06-1,25	0,1-3,0	0,05-2,0	± 20	-
		β	-	$>1,0$	0,05-2,0	± 50	-
ДПГ-0,2	Люміні- сцент- ний	γ	0.06-1.25	0.1-3.0	1-1000	± 10	$\leq 2\%$ за рік
ДПГ-0,3		γ	0.06-1.25	0.1-3.0	0.1-1000	± 10	$\leq 2\%$ за рік
ІКС-А		γ	0.05-1.25	0.06-2.0	500-8000	± 15	$\leq 2\%$ за рік

4.8. Прилади загального дозиметричного контролю

Загальний контроль потужності дози зовнішнього γ - та рентгенівського випромінень здійснюється за допомогою рентгенометрів. Вони призначені для оцінки радіаційного стану, перевірки надійності засобів захисту від фотонного випромінення і зберігання високоактивних β -випромінюючих ізотопів, які при взаємодії з матеріалами захисних контейнерів, утворюють гальмівне випромінення, наприклад ^{90}Sr .

Рентгенометри різних марок складаються з лічильника ядерних випромінень, для чого використовують іонізаційну камеру, газорозрядний або сцинтиляційний лічильник посилювача і нормалізатора імпульсів струму.

Вихідними пристроями є стрілочні прилади (мікроамперметри), декатрони, рідкі кристали, що видають цифрову індикацію та ін. Нерідко рентгенометри можуть бути обладнані звуковою сигналізацією, що спрацьовує при заданому порозі. Шкала цих приладів відградуєвана в одиницях потужності експозиційної дози - Р/год, мР/год, мкР/год, або в одиницях еквівалентної дози фотонного випромінення - мЗв/год, мкЗв/год.

Деякі рентгенометри, наприклад СРП-68-01, СРП-88, можуть працювати і в імпульсному режимі, тобто реєструвати окремі імпульси струму, що виникають при взаємодії γ -кванту з детектором. Такі прилади називаються рентгенометрами-радіометрами. Вони оснащені перемикачем виду робіт і мають подвійне позначення шкали (мкР/год та с^{-1}).

Якщо прилади даного типу оснащені змінними блоками детектування, то вони стають універсальними, тобто призначеними для рішення багатоцільових задач, включаючи вимірювання потужності дози фотонного випромінення, визначення ступеню забруднення поверхні β - та (або) α -активними ізотопами, вимірювання густини потоку швидких і теплових нейтронів (прилади МКС-04Н, УІМ-2-1еМ, МКС-01-Р та ін.).

Для визначення інтенсивності потоку частинок та квантів іонізуючих випромінень за одиницю часу використовують радіометри. За їх допомогою визначають концентрацію радіоактивних речовин в об'єктах навколишнього середовища та біологічних речовинах, питому активність, щільність забруднення різних поверхонь радіонуклідами (КРБ-1, КРА-1, Бета, РУБ-01П6, РУГ-Р, РИ-БГ, РУГ-01М «Гамма» та ін.).

Для визначення ізотопного складу радіонуклідів по енергії їх випромінення використовуються спектрометри. Розрізняють α -, β - та γ -спектрометри (АМ-А-01Ф, СЕГ-05, СЕГ-2МЛ, СУГ-1М та ін.).

Прилад СРП-68-01 (рис. 7) призначений для пошуку радіоактивних руд за їх γ -випроміненням і для радіометричної зйомки місцевості, а також

для радіометричного випробування кар'єрів. Також прилад може бути використаний для визначення активності γ -випромінюючих радіонуклідів у воді, продуктах харчування, продукції рослинництва і тваринництва.

Прилад дозволяє проводити вимірювання потоку γ -квантів в межах від 0 до 10000 с^{-1} і потужності експозиційної дози γ -випромінювання в межах від 0 до 3000 мкР/год .

Діапазон вимірювань поділено на піддіапазони: для вимірювання потоку γ -квантів (с^{-1}) на 100, 300, 1000, 3000, 10000; для вимірювання потужності експозиційної дози (мкР/год) на 30, 100, 300, 1000, 3000.

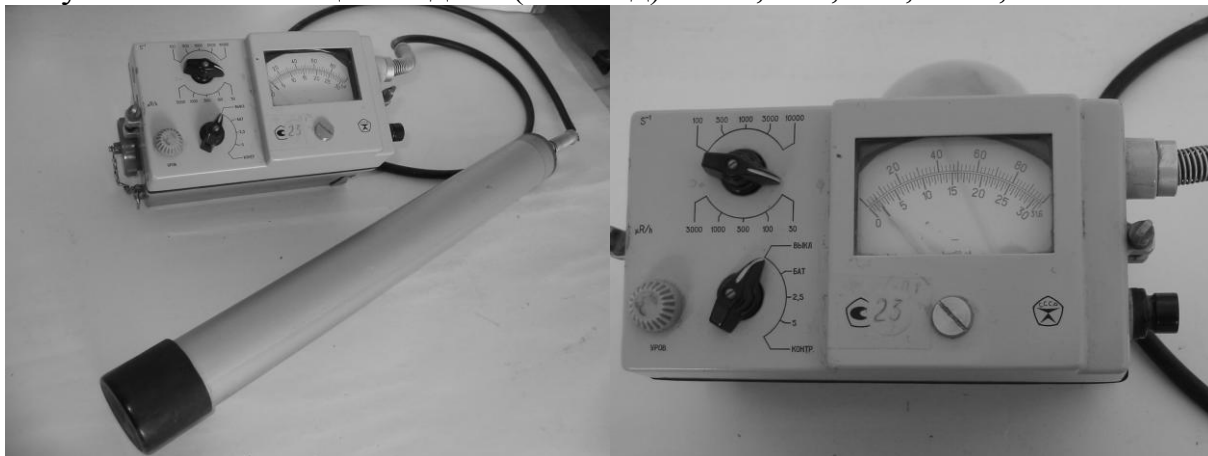


Рис. 7. Загальний вигляд приладу СРП-68-01.

Для контролю роботи приладу в нього вмонтовано джерело ^{60}Co з періодом піврозпаду 5,25 років. Нижній поріг дискримінації γ -випромінювання для енергії знаходиться в межах від 15 до 35 кеВ. Межі допустимої основної похибки вимірювань $7\pm 15\%$. Час для встановлення робочого режиму не більше 1 хв. з моменту вмикання приладу. Стала часу інтегрування 2,5-5 с. При сталій часу 5 с підвищується точність підрахунку, але при цьому зростає інертність приладу. Комплект живлення приладу складається з 9 елементів типу "343", що з'єднані послідовно і забезпечують безперервну роботу протягом 8 годин.

Радіометр-дозиметр МКС-04Н (рис. 8) використовують для радіаційного контролю на підприємствах агропромислового комплексу, промислових підприємствах і в науково-дослідних закладах.

Радіометр-дозиметр МКС-04Н дозволяє вимірювати: щільність потоку β -частинок від забрудненої поверхні; потужність експозиційної дози рентгенівського і γ -випромінювання; питому активність β -радіонуклідів в зразках.

Робота приладу заснована на сцинтиляційному методі реєстрації іонізуючих випромінень.



Рис. 8. Загальний вигляд радіометра-дозиметра МКС-04Н.

Діапазон вимірювання потужності еквівалентної дози рентгенівського та γ -випромінювання в положенні γ_1 від 0,1 до 99 мкЗв/год⁻¹, в положенні γ_2 - від 1 до 999 мкЗв/год⁻¹, при енергії випромінювання 0,1-3 МеВ.

Діапазон вимірювання щільності потоку β -частинок з енергією від 1 до 999 част./см⁻²·хв⁻¹ в положенні β_1 та від 10 до 9999 част./см⁻²·хв⁻¹ в положенні β_2 .

Прилад дозволяє проводити вимірювання потоку γ -квантів в межах від 0 до 10000 с⁻¹ і потужності експозиційної дози γ -випромінювання в межах від 0 до 3000 мкР/год.

Діапазон вимірювань поділено на піддіапазони: для вимірювання потоку γ -квантів (с⁻¹) на 100, 300, 1000, 3000, 10000; для вимірювання потужності експозиційної дози (мкР/год) на 30, 100, 300, 1000, 3000.

Дозиметр-радіометр МКС-07 (рис. 9) призначений для вимірювання потужності еквівалентної дози γ - та рентгенівського випромінювання і поверхневої щільності потоку β -частинок.



Рис. 9. Дозиметр-радіометр МКС-07.

Особливостями даного приладу є застосування лічильників Гейгера-Мюллера, можливість запису в енергонезалежну пам'ять з передачею в комп'ютер через інфрачервоний порт до 4096 результатів вимірювання, виведення на цифровий індикатор усередненого результату за час вимірювання від 1 до 99 хв., реєстрація м'яких β -випромінень та автоматичний вибір інтервалів і діапазонів вимірювання.

Діапазон вимірювання потужності еквівалентної дози γ - та рентгенівського випромінення становить від 0,1 мкЗв/год. до 2,0 Зв/год. при відносній похибці $\pm 15\%$.

Діапазон вимірювання еквівалентної дози становить від 1,0 мкЗв до 9999 мЗв при відносній похибці $\pm 15\%$.

Вимірювання щільності потоку β -частинок знаходиться в межах 5,0-100000 част/см²·хв.

Енергетичний діапазон вимірювань становить 0,05-3,0 МеВ.

Дозиметр-радіометр універсальний МКС-У (рис. 10) призначений для вимірювання еквівалентної дози та її потужності і поверхневої щільності потоку β -частинок.

Відмінними рисами приладу є можливість роботи в умовах атмосферних опадів, запиленості атмосфери та при заглибленні виносного детектора у воду на глибину до 0,5 м і широкий робочий температурний діапазон (від -40 до +50°C).

Особливостями даного приладу є застосування лічильників Гейгера-Мюллера, кремнієвого детектора β -випромінення, аварійного γ -детектора типу «СЕЛДІ», можливість запису в енергонезалежну пам'ять з передачею в комп'ютер через інфрачервоний порт до 4096 результатів вимірювання, можливість перегляду записаних результатів вимірювання на власному цифровому індикаторі та автоматичний вибір інтервалів і діапазонів вимірювання.



Рис. 10. Дозиметр-радіометр універсальний МКС-У

Діапазон вимірювання потужності еквівалентної дози γ - та рентгенівського випромінювання становить від 0,1 мкЗв/год. до 100000 мкЗв/год. при відносній похибці $\pm 15\%$.

Діапазон вимірювання еквівалентної дози становить від 1,0 мкЗв до 9999 мЗв при відносній похибці $\pm 15\%$.

Вимірювання щільності потоку β -частинок знаходиться в межах 10,0-200 част./см²·хв при відносній похибці $\pm 15\%$.

Енергетичний діапазон вимірювань становить 0,3-3,0 МеВ.

Радіометр КРБ-1 (рис. 11) призначений для вимірювання β -забруднення поверхонь.

Прилад забезпечує вимірювання β -випромінювання в діапазоні від $1 \cdot 10^1$ до $1 \cdot 10^7$ розп./хв·см²), при цьому діапазон вимірювань розподілено на під діапазони:

від $1 \cdot 10$ до $1 \cdot 10^2$ розп./хв·см²

від $1 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^3$ розп./хв·см²

від $1 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^4$ розп./хв·см²

від $1 \cdot 10^4$ до $1 \cdot 10^5$ розп./хв·см²

від $1 \cdot 10^5$ до $1 \cdot 10^6$ розп./хв·см²

від $1 \cdot 10^6$ до $1 \cdot 10^7$ розп./хв·см²

Діапазон середніх енергій β -випромінень, що вимірює прилад становить від 100 кеВ до 3 МеВ.



Рис. 11. Радіометр КРБ-1.

Радіометр «Бета» (рис. 12) призначений для контролю забруднення води, ґрунту, рослин і продуктів харчування β -активними радіонуклідами, а також для експрес-визначення сумарної β -активності досліджуваних проб.

Визначення питомої й об'ємної активності рідких, твердих і сипучих проб проводиться відносним методом.

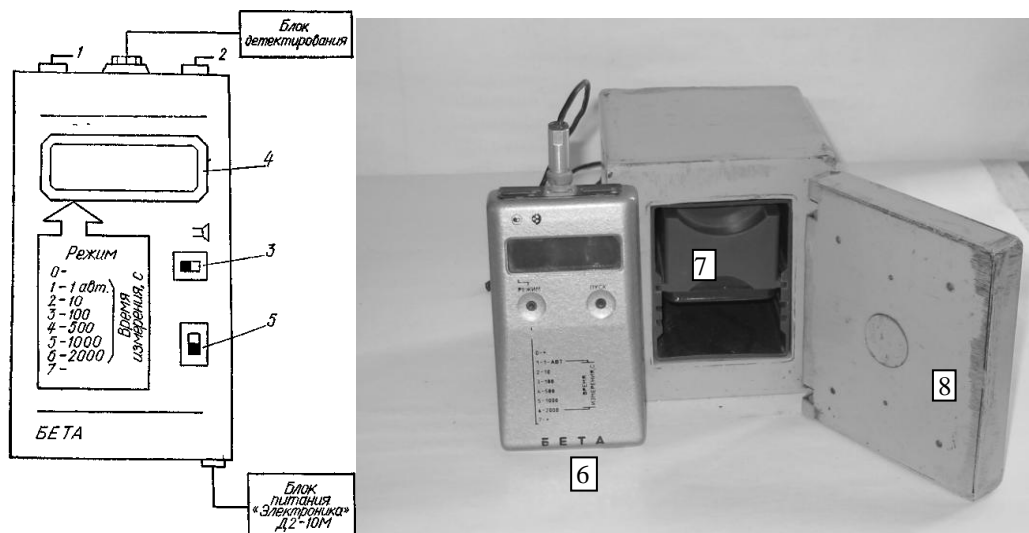


Рис. 12. Схема та загальний вигляд радіометра «Бета»:

1 – режим роботи; 2 – пуск; 3 – звукова індикація; 4 – індикаторне табло; 5 – вмикач живлення; 6 – блок індикації; 7 – іонізаційний детектор СБТ-10; 8 – свинцевий будиночок

Радіометр дозволяє вимірювати питому активність β -випромінюючих нуклідів в рідинах і сипучих речовинах у діапазоні 185-37000 Бк/кг ($5 \cdot 10^{-9}$ - $1 \cdot 10^{-6}$ Кі/кг) і поверхневе забруднення β -випромінюючими радіонуклідами в діапазоні 10-1500 част/см²·хв.

Основна погрішність вимірів радіометра при визначенні β -активності твердих зразкових джерел не перевищує 25%. Додаткова погрішність виміру забруднення поверхонь β -активними радіонуклідами при зовнішньому γ -фоні, рівному 100 мкР/год, не повинна перевищувати 50%.

У радіометрі як детектор застосовується лічильник типу СБТ-10. Час виміру проби встановлює оператор. Він може становити 1 с, 10, 100, 500, 1000, 2000 с. Живлення приладу здійснюється від мережного блоку живлення «Електроніка Д 2-10 М» або сухих елементів типу «Уран» загальною напругою 4,5 В. Час встановлення робочого режиму не перевищує 1 хв., а час безперервної роботи радіометра - 8 год. при нестабільності показань $\pm 15\%$. Коефіцієнт градування вимірювань поверхневого забруднення складає 3,5 част/хв·см², чутливість радіометра по зразкових пробах питомої активності дорівнює $4,3 \cdot 10^7$ Кі/л·с⁻¹.

Для зменшення впливу зовнішнього γ -фону лічильник поміщають у свинцевий будиночок з товщиною стінок 2 см.

Радіометр РУБ-01-П6 (рис. 13) відноситься до радіометричних приладів спеціального призначення. Він використовується для санітарно-гігієнічного контролю об'єктів природного середовища на вміст в них радіонуклідів цезію.

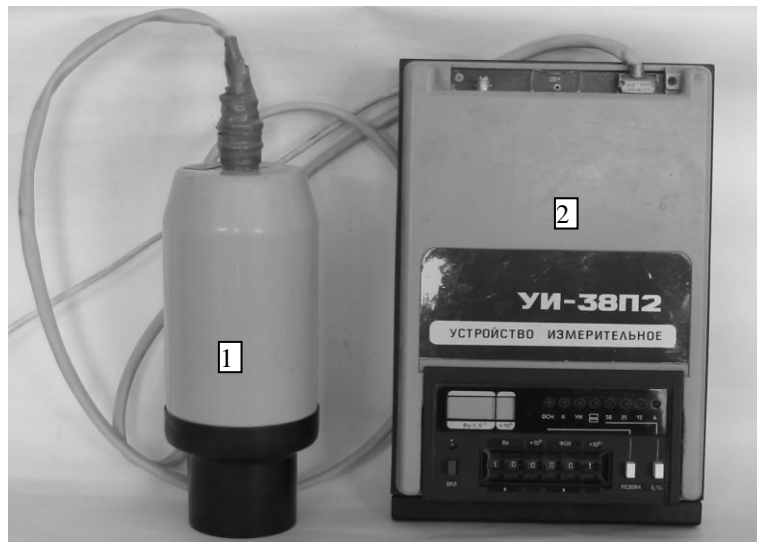


Рис. 13. 1. Стинтиляційний детектор; 2. вимірювальний пристрій радіометру РУБ-01-П6

Принцип дії радіометра заснований на перетворенні світлових спалахів у кристалі йодистого натрію активованого талієм під дією γ -квантів радіоцезію в інтенсивність лічби імпульсів електричного струму.

Радіометр дозволяє проводити вимірювання питомої та об'ємної радіоактивності проб з питомою вагою $0,25-1,5 \text{ г/см}^3$ та будь-якою вологістю, а також може бути використаний для експресного визначення вмісту радіонуклідів цезію в організмі людини.

Діапазон вимірювання становить від 20 до $2 \times 10^5 \text{ Бк/кг}$, Бк/л при об'ємі проби 1 л і від 270 до $2,7 \times 10^6 \text{ Бк/кг}$, Бк/л – при об'ємі проби 0,05 л.

Радіометр вибіркового РИ-АБ (рис. 14) призначений для вибіркового визначення активності α - та β -активних радіонуклідів ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{40}K , ^{239}Pu і ^{241}Am при сумісному і роздільному їх знаходженні в пробах.

Радіометр забезпечує виведення інформації на монітор та її архівування з записом в пам'яті блоку вимірювання.

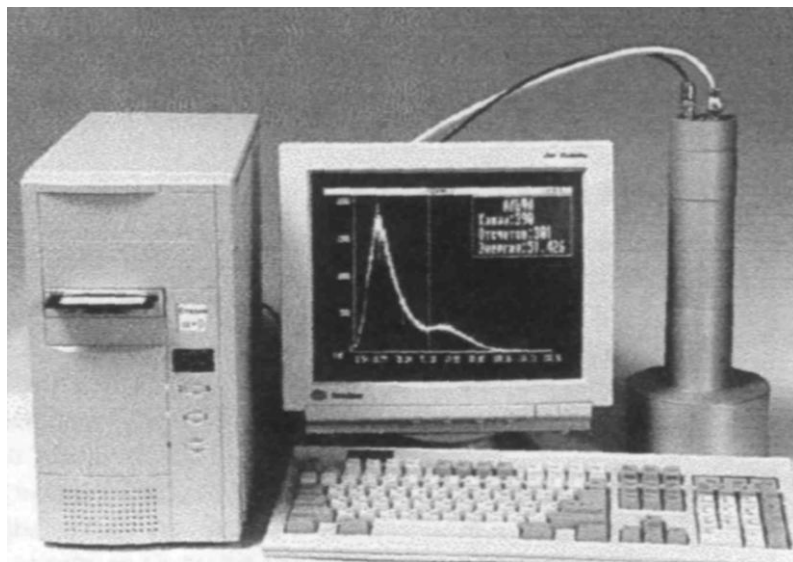


Рис. 14. Радіометр вибіркового РИ-АБ

Діапазон вимірювання активностей (Бк): ^{239}Pu – 3-500000; ^{241}Am – 3-100000; β -випромінювачів (^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{40}K) – 3-80000 при часі вимірювання 30-10800 с.

Мінімальна активність, яка детектується (у малофоновому свинцевому захисті товщиною 100 мм), Бк, для α -випромінювання - 2, для β -випромінювання – 1 за час вимірювання 8 год.

Межа основної відносної похибки при довірчій імовірності 0,95 в діапазоні активностей 3-30 Бк $\leq 40\%$; більше 30 Бк – $\leq 30\%$.

Додаткова відносна похибка вимірювання активності при відхиленні температури від нормальної ($+20^{\circ}\text{C}$) на кожні 10°C не більше 10%; при відхиленні напруги живлення від номінальної (220 В, +10%, -15%) в межах 3%.

Гамма-спектрометр СУГ-1М (рис. 15) призначений для визначення питомої (об'ємної) активності ^{137}Cs у зразках: ґрунтів, грубих кормів (сіна, соломи), молока, м'яса, риби та рибних продуктів, овочів, фруктів, дарів лісу, та у м'язах сільськогосподарських тварин при прижиттєвому контролі.

Діапазони вимірювання питомої (об'ємної) активності ^{137}Cs гамма-спектрометром СУГ-1М складають:

- | | |
|---|-------------------------------|
| - для ґрунтів | - $160-2.6 \cdot 10^4$ Бк/кг; |
| - для прижиттєвого контролю тварин | - $74-1.0 \cdot 10^4$ Бк/кг; |
| - для сільгосппродукції та продукції лісу | - $40-2.0 \cdot 10^4$ Бк/кг. |

Прилад забезпечує визначення питомої (об'ємної) активності ^{137}Cs в зразках і при прижиттєвому контролі тварин в діапазоні вимірювань із основною відотною похибкою $\pm 30\%$ для $P=0.95$.

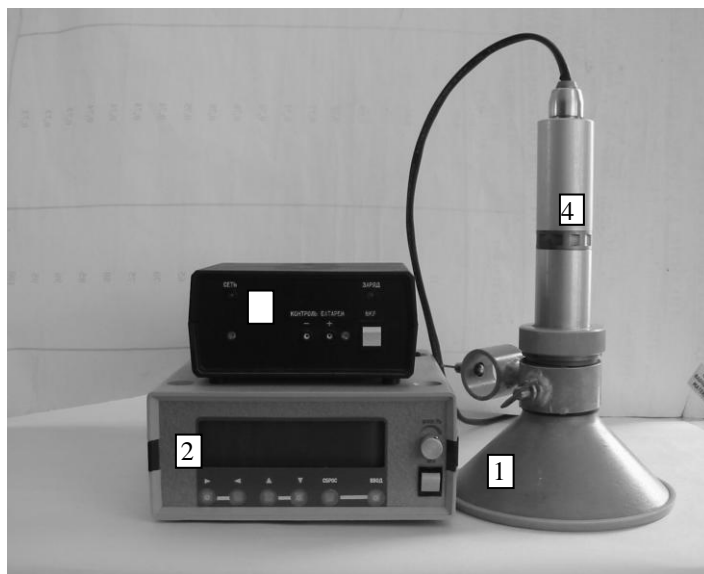


Рис. 15. Загальний вигляд гамма-спектрометра СУГ-1М:

1 – коліматор; 2 – пульт керування; 3 – зарядний пристрій; 4 – блок детектування.

Обов'язковою умовою ефективного використання можливостей гамма-спектрометра є вибір найбільш “чистого” місця для проведення контролю.

Для забезпечення вимірювання із необхідною похибкою активності, що відповідає нижній межі паспортного діапазону вимірювань, потужність еквівалентної дози (ПЕД) зовнішнього γ -випромінювання в місці вимірювання (природний фон плюс додаткове випромінювання, що формується ^{137}Cs) при його використанні не повинна перевищувати 0.2 мкЗв/год (20 мкР/год) - для визначення питомої активності ^{137}Cs у зразках, та 0.3 мкЗв/год (30 мкР/год) - для прижиттєвого контролю тварин.

Гамма-спектрометр польовий малогабаритний СЕГ-05 (рис. 16) призначений для визначення вмісту γ -активних радіонуклідів в об'єктах навколишнього середовища.



Рис. 16. Гамма-спектрометр польовий малогабаритний СЕГ-05.

Гамма-спектрометр виконаний у вигляді двох конструктивних блоків: блоку детектування та блоку вимірювання. Блок детектування складається з сцинтиляційного кристалу NaI(Tl) розмірами 63х63 мм та фотоелектронного множника (ФЕМ-183).

Блок вимірювання конструктивно виконаний у вигляді кейсу. Функціонально він включає в себе модуль АЦП, модуль акумуляторів, мікро-ЕОМ IBM-AT 486. Модуль АЦП включає в себе плату АЦП, плату перетворювача, джерело живлення та плату контролю.

При роботі в польових умовах живлення гамма-спектрометра здійснюється від вмонтованої акумуляторної батареї з напругою 16 В.

Діапазон питомих активностей (геометрія посудини Марієллі), Бк/кг: ^{137}Cs – $3 \cdot 5 \cdot 10^4$; ^{40}K – $50 \cdot 2 \cdot 10^4$; ^{226}Ra – $10 \cdot 2 \cdot 10^5$; ^{232}Th – $5 \cdot 1 \cdot 10^5$.

Мінімальна вимірювальна активність, для довірчої ймовірності 0,95 при вимірюванні у геометрії посудини Марієллі, у стандартному захисті за час - 1 год., Бк: ^{137}Cs – 2; ^{40}K – 40; ^{226}Ra – 5; ^{232}Th – 5.

Межі допустимої основної похибки $\pm 25\%$.

Енергетичний діапазон вимірювань становить 0,05-3,0 МеВ.

Тема 5. Біологічна дія іонізуючих випромінень

Основою взаємодії іонізуючих випромінювань з речовиною, в тому числі з речовинами клітин живих організмів є іонізація, під час якої виникає іонізований стан атомів та молекул, наслідком якого є індукування різних хімічних та біохімічних реакцій в тканинах і органах.

Енергія зв'язку електрона з ядром атома в середньому становить 60 еВ. Енергія ^{137}Cs дорівнює 660000 еВ. Це означає, що при проникненні в клітину лише один квант спричинить утворення 11000 пар іонів ($660000:60=11000$), оскільки взаємодіятиме з її речовинами до повної втрати енергії. При дозі лише 1 Р в кожному 1 см^3 живої тканини виникає $2,8 \cdot 10^9$, а при летальних для ссавців дозах 4-18 Гр - до $5 \cdot 10^{12}$ пар іонів. Але якщо всі ці іонізації виразити у вигляді сумарної теплової енергії, її ледве буде досить, щоб підвищити температуру опроміненої тварини на $0,1^\circ\text{C}$.

Саме ця невідповідність між кількістю переданої живій речовині енергії та відповідною реакцією дістала назву «радіобіологічного парадокса».

5.1. Загальні уявлення про природу дії іонізуючих випромінень на живий організм

На початку 20-х р. німецький фізик Ф. Десауер почав досліджувати причини радіобіологічного парадокса. Він міркував так. В 1 см^3 живої тканини міститься до 10 млрд. (10^9) клітин, у кожній клітині - до 10 млрд. (10^9) біологічно важливих молекул, якщо такими вважати молекули масою понад 5000 (нуклеїнові кислоти, білки та ін.). Отже, в 1 см^3 тканини 10^{18} молекул.

При опроміненні організму летальною дозою в такому об'ємі тканини виникне $5 \cdot 10^{12}$ іонізацій, наслідком яких стане утворення саме такої кількості пар іонів. Така ж кількість молекул зазнає ушкоджень. Відносно загальної кількості молекул ушкодження зазнає 1 з 200000 ($10^{18} : 5 \cdot 10^{12}$). І це призводить до загибелі організму. Це і є радіобіологічним парадоксом.

І Десауер висунув гіпотезу: ушкодження не всякої молекули шкідливе для клітини. Коли воно відбувається в особливо важливих місцях, наприклад в молекулах хромосом, це може призвести до ушкодження всієї клітини. А ушкодження багатьох клітин цілком природно уражує весь організм.

Відомо, що хромосоми складаються з великої кількості молекул дезоксирибонуклеїнової кислоти (ДНК) і що саме молекули ДНК є тими чутливими до іонізуючого випромінювання елементами клітини, так званими «мішенями», що відповідають за радіаційне ураження. Кожна з молекул ДНК є матрицею для синтезу десятків молекул рибонуклеїнової кислоти (РНК). Тому, якщо молекула ДНК дістала ушкодження своєї структури, вона передає його й молекулам РНК, а кожна молекула РНК є матрицею для синтезу десятків молекул білків, яким також передається ушкодження. Таким чином відбувається посилення ушкодження, його множення в сотні і тисячі разів. Більш того, високоенергетичне іонізуюче випромінювання має

властивість розривати не тільки зв'язки між електроном і ядром, а й будь-які хімічні зв'язки в молекулах і спричинювати тривалі реакції в клітинах, які залучають у процеси розвитку променевого ураження велику кількість інших біологічно важливих молекул, прямо не зачеплених опроміненням. Внаслідок цього загальний об'єм молекулярних ушкоджень порівняно з початковим, зумовленим безпосередньо дією випромінювання, збільшується в сотні і тисячі разів, що призводить до ослаблення контролю над окремими процесами, порушення систем обміну речовин і до різних радіобіологічних ефектів.

5.2. Радіобіологічні ефекти

Радіобіологічний ефект - це реакція живого організму на дію іонізуючого випромінювання, що характеризується зміною деяких його ознак та властивостей. Звичайно виділяють два класи радіобіологічних ефектів - соматичні й генетичні. *Соматичними радіобіологічними ефектами є зміни, що відбуваються в організмі протягом його онтогенезу - періоду індивідуального розвитку; генетичними - ушкодження, що передаються нащадкам, тобто реалізуються в наступних поколіннях.*

Серед соматичних ефектів розрізняють такі 5 основних типів: радіаційна стимуляція, морфологічні зміни, променева хвороба, прискорення старіння, що призводить до скорочення тривалості життя, і загибель. Генетичні, або мутагенні, ефекти утворюють самостійний клас.

5.2.1. Радіаційна стимуляція

Радіаційна стимуляція - це прискорення росту та розвитку організму при дії на нього іонізуючого випромінювання в дозах, в десятки, а іноді й сотні разів нижчих за ті, що спричинюють гальмування цих процесів.

Описана вперше французькими вченими М. Мальдінеєм та К. Тувіненом ще в 1898 р. як явище прискорення проростання опроміненого ними насіння. На сьогодні доведено, що в умовах радіобіологічної лабораторії при наявності джерела іонізуючого випромінювання можна підібрати для насіння, проростків, вегетуючих рослин, мікроорганізмів, комах, лабораторних тварин та інших організмів будь-якого виду дозу, при якій спостерігається ефект радіаційної стимуляції. Ці дози варіюють у досить широких межах, що залежить від чутливості організмів до випромінень, їх фізіологічного стану, виду випромінювання та деяких інших факторів. Наприклад, для насіння стимулюючі дози в багато разів вищі, ніж для проростків та вегетуючих рослин, для мікроорганізмів - у десятки і сотні разів вищі, ніж для ссавців та комах. У таблиці 23 наведено значення цих доз для деяких видів живих організмів, що дає змогу порівняти ці величини.

Радіаційна стимуляція рослин виявляється в прискоренні проростання насіння, збільшенні енергії проростання, схожості, наступному прискоренні росту рослин, проходженні фаз розвитку, що в цілому приводить до

скорочення тривалості вегетаційного періоду, прискорення досягання рослин та збільшення їх урожайності.

Про стимулюючу дію іонізуючого випромінювання на організм тварин можна зробити висновок за тими самими критеріями, що й при опроміненні рослин, а саме за прискоренням чи посиленням таких функцій, як ріст, розвиток, продуктивність.

23. Стимулюючі дози γ -опромінення для деяких родів сільськогосподарських рослин та інших організмів, Гр

Рід рослини	Доза	Організми	Доза
Боби (насіння)	1-1.5	Клітини людини в культурі	0.05
Боби (проростки)	0.2		
Горох (насіння)	3.0	Яйця курячі	0.01-0.05
Горох (проростки)	0.35-0.5	Курчата	0.05-1
Кукурудза (насіння)	5-10	Кури	0.05
Кукурудза (проростки)	0.5-1.0	Ікра риби	0.1-0.5
Пшениця (насіння)	5-8	Сперма риби	0.25-0.5
Пшениця (проростки)	1.0-1.5	Поросята	0.1-0.25
Томати (насіння)	5-10	Лабораторні щури	0.1-0.3
Томати (розсада)	0.5-1.5	Лабораторні миші	0.2-0.4
Редис (насіння)	10	Комахи	10-45
Редис (проростки)	3.0	Найпростіші	5-50
		Мікроорганізми	10-100

Найбільш показовими і численними вважаються дослідження опромінення стимулюючими дозами курячих яєць, курчат і дорослих курей. Доведено, що при опроміненні яєць до інкубації, під час інкубації, одночасно або протягом всього періоду інкубації дозами 0,01-0,05 Гр помітно підвищується виводимість курчат, зменшується відхід курчат, прискорюється на 10-12 днів початок періоду яйцекладки, збільшується несучість птиці в цілому. Опромінення курчат дозою 0,25 Гр сприяє збільшенню їх живучості, прискоренню процесів росту й розвитку, початку яйцекладки. Опромінення дорослих курок у дозі 0,05 Гр збільшує несучість.

Численні дані, одержані при роботі з лабораторними щурами, мишами, морськими свинками, свідчать про те, що при малих дозах у ссавців також спостерігаються прискорення росту, збільшення абсолютної маси тіла, підвищення плодючості.

При опроміненні сперми та ікри риби спостерігається прискорення розвитку ембріонів, а при опроміненні мальків - активізація росту й розвитку.

Радіаційна стимуляція спостерігається не тільки при одноразовому, а й при хронічному опроміненні, коли рослини і тварини опромінюються

протягом усього періоду розвитку або значної його частини. Так, спостерігалась стимуляція росту рослин кукурудзи і гречки при опроміненні їх протягом вегетаційного періоду при потужності дози опромінення 0,019 Р/доб. Якщо вважати, що потужність радіаційного фону в середньому становить 10 мкР/год, то збільшення його десь у 100 разів може зумовити стимуляцію росту рослин. Схожа ситуація з радіаційним фоном тривалий час була в деяких регіонах України протягом весняно-літнього періоду 1986 р. після аварії на Чорнобильській АЕС. Не випадково деякі дослідники схильні пояснювати небувалий урожай зернових і деяких інших культур того року саме радіаційною стимуляцією.

5.2.2. Морфологічні зміни

Морфологічні зміни - це зміни зовнішнього вигляду організму, окремих його органів, анатомічної структури, ознак, що відрізняють його від батьківських форм. Ці ознаки не спадкові, а відхилення від норми, потворства, химерності й існують лише в поколінні опромінених організмів.

Особливо характерні вони для листя: збільшення або зменшення розмірів і кількості, зміна форми, скручуваність, зморшкуватість, порушення жилкування, асиметричність, потовщення, зрощення листових пластинок та розсічення листка на частини, зміна кольору, мозаїчність, утворення пухлин, некротичних плям, втрата листової пластинки та ін. Багато з цих ознак можуть виникати і стеблi, корінні, квітках, плодах, насінні, хоча у них через специфіку будови можуть з'являтися й зовсім нові зміни: у стебла - порушення філотаксису (порядку розміщення листків), поява аеральних (повітряних) коренів; у кореня - загибель головного кореня, опушування зони росту, відсутність бічних коренів; у квітів - зменшення або збільшення кількості квіток у суцвітті та ін.

Найрізноманітніші морфологічні зміни рослин спостерігалися в зоні аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 р. У 1987 р. і в наступні роки вони залишились переважно у хвойних рослин, що змінюють хвою раз на кілька років, а також на багаторічних органах, передусім на гілках.

У тварин цей тип радіобіологічних ефектів можна виділити не завжди, хоч різні зміни в окремих органах і тканинах тваринного організму в різні строки після опромінення описано досить змістовно. При опроміненні тварин у стадії ембріогенезу (розвитку зародка) можливі порушення росту кісток, пропорцій розвитку окремих органів, порушення росту і розвитку в цілому, що призводить до виникнення різних потворств.

При опроміненні дорослих особин ушкоджуються клітини тканин, що перебувають у стані поділу. Саме в цих місцях виникають морфологічні зміни: кольору шкіри й волосяного покриву, випадання волосся, припинення росту рогових утворень та їх відшаровування, катаракта (помутніння кришталика ока), зміни розмірів і форм окремих органів, різні ступені дистрофії. Опромінення тварин може зумовити найрізноманітніші виразки на поверхні тіла або у внутрішніх органах з наступним утворенням на їхньому

місці рубців. До цього типу ефектів опромінення відноситься виникнення під дією радіації пухлин на різних органах.

5.2.3. Променева хвороба

Променева, або радіаційна, хвороба - це захворювання, що виникає при дії іонізуючих випромінень на живий організм і характеризується конкретним комплексом ознак свого прояву. Розрізняють гостру й хронічну форми променевої хвороби.

Гостра променева хвороба виникає звичайно при одноразовому загальному опроміненні. За тяжкістю захворювання розрізняють чотири її ступені: перша - легка, у свиней виникає при дозах опромінення 1-2 Гр; друга - середньої тяжкості, при дозах 2-4 Гр; третя - тяжка, розвивається при дозах 4-6 Гр, і четверта - дуже тяжка, спостерігається при дозах, вищих за 6 Гр. Для більш радіочутливих видів тварин, наприклад для великої рогатої худоби, ці форми променевої хвороби спостерігаються в діапазоні доз, що зміщений у бік менших величин - 0,5-5 Гр; для більш радіостійких, наприклад кролів, навпаки - у бік більших величин - 6-12 Гр.

У розвитку гострої форми променевої хвороби виділяють 4 періоди, або фази. *Перший - період первинних реакцій* - може спостерігатись вже через кілька годин після опромінення і триває протягом 3-4 діб. Характерними його ознаками є збудження, яке змінюється пригніченням та слабкістю. Погіршується апетит тварин, порушується ритм роботи серця, виникають задихання, понос, блювання, може підвищитись температура тіла. У крові вже в першу добу після опромінення спостерігається нейтрофільний лейкоцитоз, абсолютна та відносна лімфопенія, збільшення кількості ретикулоцитів. На кінець періоду у стані тварини відмічаються суб'єктивні поліпшення.

Другий період - латентний (прихований), фаза удаваного клінічного благополуччя залежно від тяжкості хвороби триває від кількох діб до 2 тижнів і більше. Чим вища одержана доза або чим тяжча форма променевої хвороби, тим він коротший. При дуже тяжких формах променевої хвороби цього періоду може зовсім не бути.

Стан тварин у цей період розвитку хвороби може здаватися задовільним. Однак в крові виявляються чітка лімфопенія, тромбоцитопенія, зниження кількості нейтрофілів та ретикулоцитів. У кістковому мозку яскраво виражена аплазія. В кінці періоду можуть спостерігатись крововиливи на слизових оболонках, порушення функцій травного каналу, бронхіт, пневмонія, випадання шерсті. Але в кістковому мозку в другій половині періоду при легкій та середній формах хвороби з'являються ознаки регенерації.

Третій період - розпал хвороби - період виявлених клінічних ознак гострої променевої хвороби залежно від її ступеня виявляється через 1-4 тижні. Знову виникає задихання, погіршується функціонування серцево-судинної системи, органів травлення, спостерігається втрата апетиту, понос,

дистрофічні процеси в слизовій оболонці рота, зменшення маси тіла, може виникнути короткочасна лихоманка, що періодично повторюється, підвищується температура тіла. Характерною ознакою цього періоду є геморагічний синдром - крововиливи під шкіру, на слизових оболонках, у травному каналі, у мозку, серці, легенях та інших органах.

Залежно від одержаної дози та індивідуальної чутливості тварин до опромінення третій період триває від 1 до 3-4 тижнів. Наприкінці його розвивається прогресуюча анемія. При опроміненні в напівлетальних дозах у половини тварин в кістковому мозку та лімфатичних вузлах спостерігається явище повної аплазії, що призводить до загибелі. У другій половини в цих органах відмічаються ознаки регенерації та перехід хвороби через 1-1,5 місяця в четвертий період.

Четвертий - період відновлення, при легкому ступені гострої променевої хвороби проходить досить швидко і повною мірою. Він характеризується поліпшенням загального стану тварин, відновленням апетиту, нормалізацією температури. Зникає кровоточивість, слабнуть диспептичні явища, поступово відновлюються показники крові.

При середній тяжкості хвороби період відновлення триває 2-2,5 місяця і в цілому видужання завершується за 3-6 місяців.

При тяжкій формі хвороби період відновлення може затягнутись на 7-9 місяців. Але повністю тварина не видужує: відмічаються зниження імунітету, послаблення відтворної здатності, можливе скорочення тривалості життя. Нерідко гостра форма променевої хвороби переходить в хронічну.

Дуже тяжкий ступінь гострої променевої хвороби у великих сільськогосподарських тварин триває від кількох днів до кількох тижнів і завершується загибеллю їх у першому або третьому періоді. При опроміненні в дозах, що перевищують летальні, загибель може настати вже через 2-4 доби. При дозах, вищих за летальні в 1,5-2 рази, загибель можлива під час опромінення або в найближчі години після нього - так звана «смерть під променем». Причиною загибелі тварин є киснева недостатність, що розвивається внаслідок зменшення кількості гемоглобіну в крові та розвитку токсемії, набряку легенів.

При середньому і тяжкому ступенях гострої променевої хвороби тварини гинуть, як правило, у третьому періоді. Основною причиною цього звичайно є описані вище геморагічні, явища, дистрофічні процеси.

Хронічна променева хвороба - форма радіаційного ураження, що розвивається внаслідок тривалого опромінення організму малими дозами загального опромінення або від радіоактивних речовин, що потрапили всередину.

Виділяють три форми хронічної променевої хвороби: легку, середню і тяжку та періодичність протікання, як і при гострій формі. *Легка форма* хронічної променевої хвороби зумовлена опроміненням у порівняно невеликих дозах і протягом короткого періоду, характеризується звичайно

функціональними порушеннями переважно нервово-рефлекторного характеру. Після припинення опромінення ці зміни можуть швидко зникнути.

Для *середньої форми* хвороби характерними є порушення регуляторних систем, функціональна недостатність органів травлення, нервової, серцево-судинної систем і особливо крові. Але після припинення опромінення також настає відновлення, що характеризується репаративними процесами у найбільш радіовразливих тканинах, а також нормалізацією функціональних порушень, іноді з тим чи іншим ступенем їх недостатності. *Тяжка форма* хронічної променевої хвороби, що спостерігається при тривалому опроміненні, характеризується глибокими морфологічними порушеннями деструктивного порядку в органах кровотворення, травному каналі, нервовій та інших системах. Вона супроводжується поступовим ослабленням діяльності серця, порушенням функцій залоз внутрішньої секреції, виснаженням, зниженням стійкості проти інфекційних хвороб.

При лікуванні променевої хвороби тварин треба орієнтуватись на одержану твариною дозу опромінення і ступінь променевої хвороби. Якщо прогнозується тяжкий ступінь гострої променевої хвороби, то лікувати таку тварину з точки зору економіки недоцільно.

На початку розвитку хвороби рекомендується провести переливання крові, внутрішньовенне введення 25-40% розчину глюкози з аскорбіновою кислотою (вітаміном С) та ціанкобаламідом (вітаміном В₁₂), надалі активно застосовувати для лікування антибіотики, транквілізатори, глобуліни сироватки крові, нуклеїново-кислий натрій, різні антигеморагічні засоби. При надходженні великої кількості радіоактивних речовин через травний канал слід застосовувати адсорбенти - водну суміш кісткового борошна, цеолітів, при надходженні через легені - відхаркувальні засоби.

Головна мета лікування - запобігти патологіям та усунути їх в органах кровотворення, травному каналі, легенях, відтворювальній та нервово-ендокринній системах.

Променева хвороба рослин також характеризується комплексом неспецифічних ознак. Першою ознакою є гальмування росту рослини або окремих її органів під дією випромінювання. Але це вже вторинна реакція рослини на опромінення. Воно є наслідком порушення обміну речовин в результаті ушкодження ферментативних систем, порушення регуляторних зв'язків, що визначають підпорядкованість функцій окремих органів.

У радіочутливих рослин родини бобових (кінських бобів, гороху, квасолі) такі зміни можна виявити вже через кілька годин після опромінення дозами 1-3 Гр. Зміни швидкості поділу клітин виявляються не раніш ніж через 12-24 год., а помітне гальмування росту - ще пізніше.

При дозах, близьких до напівлетальних (для названих культур 4-12 Гр), ці процеси реєструються значно швидше і в частини рослин вже через добу можна спостерігати практично повне припинення поділу клітин та ростових процесів. Однак протягом ще тривалого періоду можуть підтримуватись процеси фотосинтезу, дихання, мінерального та водного обміну.

При променевої хворобі підвищується сприйнятливість рослин до інфекційних хвороб, знижується їх стійкість до несприятливих факторів, зменшується потреба в поживних речовинах, послаблюються відтворювальна здатність і продуктивність.

5.2.4. Прискорення старіння і скорочення тривалості життя

Існує пряма кількісна залежність між скороченням тривалості життя і дозою іонізуючого випромінювання. Проте, прискорення старіння і скорочення тривалості життя не обов'язково повинні бути неминучими або наслідком один одного.

Старіння - це закономірний руйнівний процес вікових змін організму, властивий всім живим організмам на всіх рівнях організації, що веде до пониження його адаптаційних можливостей і збільшення імовірності смерті.

Старіння тварин на рівні організму виявляється у послабленні функцій основних фізіологічних систем (нервової, ендокринної, серцево-судинної, травної та ін.), зниженні контролю за їх діяльністю, зміні реактивності щодо дії гормонів, порушення на етапі надходження інформації в нервові центри.

Старіння рослин також характеризується послабленням функції основних фізіологічних систем (фотосинтезу, дихання, транспортування елементів живлення і метаболітів, водного обміну та ін.), розладом систем регуляції, послабленням реактивності щодо дії специфічних гормонів рослин - фітогормонів.

Усі перелічені процеси змінюються під впливом опромінення іонізуючої радіації і при високих її дозах пригнічуються нею, що й прискорює процес природного старіння організму і скорочення тривалості життя.

5.2.5. Загибель

При високих дозах опромінення, коли видужання від променевої хвороби неможливе, настає *загибель, або смерть, організму - припинення його життєдіяльності як цільної системи.*

Смерть теплокровних зумовлена передусім припиненням дихання і кровообігу. Виділяють два основних види смерті - клінічну й біологічну, або справжню. По закінченні періоду клінічної смерті, коли ще можливе повноцінне відновлення життєвих функцій, настає біологічна смерть - необоротне припинення фізіологічних процесів в клітинах і тканинах організму.

Окремі органи рослин мають автономність, що є однією з принципових властивостей, за якими розрізняють рослинні і тваринні організми. Рослини можуть зберігати деякі функції навіть при загибелі систем і органів, що мають високу чутливість до радіації. У них не настає при цьому загибелі усього організму, як при ураженні деяких органів тварин. Навіть при високих дозах опромінення, що пригнічують поділ клітин опромінені рослини протягом кількох тижнів можуть зберігати життєдіяльність. Тому

zareєструвати загибель рослини не завжди вдається досить швидко і достовірно (явні ознаки загибелі «рудого лісу», що отримав летальну дозу під час аварії на Чорнобильській АЕС протягом квітня - травня 1986 р., стали очевидними лише наприкінці року).

Оскільки причиною загибелі рослин є загибель їх меристем, її можна zareєструвати вже через 2-3 дні після опромінення в смертельних дозах через припинення поділу клітин. Можна констатувати загибель меристем по специфічному побурінню кінчиків коренів та пагонів через 6-10 днів після опромінення.

5.2.6. Генетичні зміни

Соматичні ефекти виявляють тільки у безпосередньо опроміненому організмі. Генетичні, або спадкові, ефекти передаються нащадкам. Вони виникають внаслідок мутацій, тому їх називають ще *мутагенними ефектами*. Мутація - це порушення, що виникають у спадковому матеріалі і призводять до зміни окремих ознак організму або навіть до виникнення нових ознак.

Іонізуюче випромінювання має здатність зумовлювати порушення у спадковому матеріалі і сприяти виникненню мутацій. Вони можуть призводити до появи у наступних поколіннях (до 15-20-го) організмів із зміненими властивостями - виродків.

Залежність кількості виниклих мутацій від дози іонізуючої радіації має лінійний або близький до лінійного характер. З одного боку, це свідчить про те, що ступінь генетичного ушкодження збільшується прямо пропорційно дозі, а з другого - на безпороговість цієї радіобіологічної реакції. Тобто, якою б малою не була доза опромінення, вона індукуватиме мутації. В цьому головна небезпека іонізуючих випромінень - при малих дозах організм не зазнаватиме ніяких соматичних ушкоджень, але вони можуть виявитись у його нащадків.

Мірою генетичної дії іонізуючих випромінень є доза, яка подвоює кількість мутацій. Для сільськогосподарських тварин-савців, деяких радіочутливих видів рослин діапазон цієї дози досить широкий - від 0,1 до 1 Гр. При підвищенні радіаційного фону, ступеня забруднення продуктів харчування і кормів радіоактивними речовинами ймовірність виникнення мутацій зростає.

Мутації, що виникають при опроміненні в статевих клітинах савців, можуть бути настільки серйозними, що плід, який формується з них, може стати нежиттєздатним і загинути. Такі мутації називають *летальними*, тобто *смертельними*. В інших випадках мутаційні зміни можуть бути сумісними з життям, але виявляються у вигляді виродків різного ступеня, спадкових хвороб. З підвищенням дози збільшується небезпека виникнення обох типів мутацій. Особливо велика вона для організмів, що пережили променеву хворобу середнього та важкого ступенів.

5.2.7. Близькі і віддалені наслідки радіаційного ураження

Залежно від часу прояву після опромінення радіобіологічні ефекти поділяють на близькі та віддалені. До *близьких ефектів* належать ті, які виявляються в перші години, дні, тижні, місяці після опромінення. Віддалені наслідки реєструються у більш пізні строки. До близьких наслідків радіаційного ураження відносять радіаційну стимуляцію, яка виявляється одразу після опромінення; більшість морфологічних змін у тканинах і окремих органах, що виникають протягом перших днів, тижнів післярадіаційного періоду; гостру променеву хворобу всіх ступенів тяжкості, що розвивається протягом 1-1,5 місяця, і загибель.

Віддаленими наслідками радіаційного ураження ссавців вважають злоякісні новоутворення - лейкози, ракові пухлини, променеву катаракту, нефросклероз - хвороба, що виникає внаслідок морфологічного переродження тканин і судин нирок при ураженні їх радіоактивними речовинами при їх виведенні з організму, а також скорочення тривалості життя і прискорення старіння, що реалізується в останні періоди життя.

До найвіддаленіших наслідків опромінення як у тварин, так і в рослин відносять *генетичні ефекти*.

Віддалені наслідки променевого ураження мають вірогідний, або випадковий, характер. Завбачити віддалені наслідки опромінення у якомусь конкретному організмі неможливо, їх можна передбачити на основі статистичного аналізу в опроміненій популяції організмів і виразити чисельність уражених осіб у процентах або визначити кількість уражених осіб на тисячу, мільйон. Ймовірність прояву віддалених наслідків радіаційного ураження зростає із збільшенням дози опромінення.

Проте не тільки від дози випромінень залежить прояв радіобіологічних ефектів. Так, дози, що стимулюють ріст і розвиток рослин родини хрестоцвітих, згубні для рослин родини бобових. Дози, безпечні для комах, смертельні для всіх тварин класу ссавців. Тобто, ефекти визначаються чутливістю організмів до іонізуючої радіації, або їх радіочутливістю.

5.3. Радіочутливість організмів

У радіобіології рівноправними є два терміни, що характеризують відношення організму до іонізуючих випромінень, - радіочутливість і радіостійкість. Вони взаємозв'язані і з різних боків характеризують одне явище. Якщо організм має високу радіочутливість, то він характеризується низькою радіостійкістю, і навпаки. Проте ці терміни треба розрізняти. *Радіочутливість організму* - це його здатність реагувати на мінімальні дози іонізуючої радіації. *Радіостійкість* - це здатність організму переносити високі рівні опромінення. Якщо для характеристики радіостійкості можна використовувати рівні доз, при яких після опромінення певна частина організмів (наприклад ЛД₅₀ - півлетальна доза, при якій гине і, відповідно, виживає половина організмів) або гинуть всі (ЛД₁₀₀ - летальна доза), то оцінка радіочутливості поки що утруднена. Тому, характеризуючи

радіочутливість різних організмів чи їх радіостійкість, звичайно застосовують один рівень доз.

5.3.1. Радіочутливість рослин

Іонізуюче випромінювання на рослини діє по-різному. Найбільш радіочутливі рослинні організми - лілейні, соснові, найбільш радіостійкі - деякі види синьозелених водоростей.

Є відомості про радіочутливість більш як 3000 рослин, що належать до різних родин, родів, видів. Але вони здебільшого стосуються насіння - стадії розвитку рослин, в якій вони перебувають у стані глибокого спокою, тому виявляють високу стійкість як проти іонізуючих випромінень, так і проти інших шкідливих факторів. Варто тільки помістити насіння у вологе середовище при кімнатній температурі (18-22°C), як в них активізуються процеси обміну речовин і вони починають проростати. Радіочутливість дводенного проростка порівняно з насінням збільшується в десятки разів і лишається приблизно на тому ж рівні до кінця вегетації. В таблиці 24 наведено дані про радіочутливість насіння і вегетуючих рослин.

24. Порівняльна радіочутливість насіння та вегетуючих рослин

Вид рослин	Насіння		Вегетуючі рослини	
	ЛД ₅₀ , Гр	ЛД ₁₀₀ , Гр	ЛД ₅₀ , Гр	ЛД ₁₀₀ , Гр
Лілія	10	20	0.5-1	2
Сосна	10	120	1-3	4-6
Ялина	20-60	50	3-5	5-10
Боби	50-100	75-125	3-5	7-9
Яблуня	20-70	70-150	4-6	-
Горох	50-250	150-500	5-9	-
Квасоля	100-250	250-500	10-13	20
Ячмінь	150-250	250-500	13-17	35-40
Пшениця	150-250	250-450	13-18	35-40
Кукурудза	100-150	250	18-22	-
Буряки	350-400	700-750	25-30	-
Конюшина	500-1500	1500-2000	25-30	-
Капуста	700-800	1500	25-40	-
Ріпак	750-1000	2000	25-50	-
Редис	2000	3000	50	100-120

Найвища радіочутливість серед рослин і, мабуть, серед усіх живих організмів у лілії. Півлетальна доза для рослин лілії становить лише 0,5-1 Гр, а летальна - 2 Гр, стійкість же насіння лілії до радіації в 10-20 разів більша.

Чутливими до іонізуючих випромінень також є хвойні рослини, і насамперед сосна та ялина, для яких летальні дози становлять, відповідно, 4-6 і 5-10 Гр. Через це під час аварії на Чорнобильській АЕС загинув сосновий ліс на площі 600 га.

Серед сільськогосподарських культур найбільшу радіочутливість мають деякі представники родини бобових, а максимальну серед них –

кінські боби. Для деяких сортів бобів півлетальні й летальні дози майже такі самі, як і для ялини. Досить чутливі до іонізуючої радіації злаки. А роди більшості овочевих, технічних культур мають порівняно високу радіостійкість, тобто низьку радіочутливість.

Максимальна радіостійкість серед вищих рослин у представників родини хрестоцвітих. Так, півлетальна доза для вегетуючих рослин та насіння редису становить, відповідно 50 і 2000 Гр.

Радіочутливість може істотно відрізнятися і в різних сортів. Так, для сортів пшениці півлетальні дози відрізняються в 3 рази, а для гороху - в 5 разів.

Надзвичайно висока радіостійкість у нижчих рослин - грибів, водоростей, лишайників. Найстійкішими серед усіх видів рослин є синьозелені водорості. Півлетальні дози для деяких з їх видів досягають 12-16 кГр.

5.3.2. Радіочутливість тварин

З відомостей про радіочутливість тварин важливими для людини є дані про ссавців. Наявні дані стосуються передусім дрібних лабораторних тварин. Менше відомостей є про радіочутливість великих тварин, дослідження яких пов'язані із значними витратами. Приблизними є також дані про радіочутливість людини, що ґрунтуються на випадкових даних, здобутих під час аварій, в умовах яких точна дозиметрія просто неможлива.

У таблиці 25 наведено узагальнені дані про радіочутливість деяких видів ссавців та інших організмів. Для більшості родів ссавців півлетальна доза не перевищує 5-8, а летальна – 9-10 Гр. До найбільш радіочутливого виду сільськогосподарських тварин відносять овець, мінімальне значення ЛД_{50/30} для яких становить лише 1,5 Гр, а до найбільш радіостійких – кролів, ЛД_{50/30} для яких досягає 8-10 Гр, при цьому радіочутливість молодих тварин вища, ніж дорослих.

Найбільш радіостійким представником ссавців є монгольська піщанка з підродини хом'якових, півлетальна доза для якої досягає 13, а летальна – 18 Гр.

Більшу радіостійкість ніж ссавці мають птахи. Півлетальні дози для більшості їх видів складають 8-25 Гр. Для різних порід курей ці дози коливаються від 10 до 15 Гр, качок – від 12 до 16, риб – від 5 до 20 Гр.

Для амфібій вони трохи вищі – до 25-30 Гр. Широко варіюють ці дози і для плазунів: для найбільш радіочутливих представників цього класу – черепах 15-20, а для найбільш радіостійких – змії 80-200 Гр.

25. Порівняльна радіочутливість ссавців та деяких інших організмів

Ссавці	ЛД ₅₀ , Гр	ЛД ₁₀₀ , Гр	Інші організми	ЛД ₅₀ , Гр	ЛД ₁₀₀ , Гр
Морська свинка	1.5-3	4-6	Риби	5-20	-
Вівця	1.5-4	5.5-7.5	Кури	6-15	10-30
Корова	1.5-5.5	6.5	Качки	10-16	-

Ко́за	2-5.5	7.5	Амфібії	10-30	-
Осел	2-5.5	8	Черепахи	15-20	-
Верблю́д	2.5	-	Молюски	20-200	-
Люди́на	2.5-4	6	Комахи	50-300	100-500
Мавпа	2.5-5.5	4-6	Змії	80-200	-
Сви́ня	2.5-6	8	Членистоногі	100-1000	-
Кінь	2.5-6	-	Дріжджі	200-300	-
Соба́ка	3.5-4	5-6.5	Мохи	200-500	-
Ми́ша	4.5-7	8-10.5	Найпростіші	200-3000	-
Кі́шка	5-7	8-9.5	Бактерії	200-4000	500-10000
Кро́лик	8-10	12-14	Синьо-зелені водорості	500-4000	1000-10000
Монго́льська піщанка	10-13	15-18	Віруси	3000-8000	20000-25000

Набагато вищу радіостійкість виявляють безхребетні тварини. Для більшості видів комах півлетальна доза становить 50-300, а летальна – 100-500 Гр, хоч для деяких видів вона може досягати 1000 Гр. Радіочутливість комах дуже залежить від стадії їх розвитку. Наприклад, для 3-годинних яєць дрозофіли півлетальна доза дорівнює лише 2 Гр, для 4-годинних – 5, для 7,5-годинних – 8, для лялечок – 20-65, а для дорослої особини – 95 Гр.

Для молюсків півлетальні дози варіюють від 20 до 200 Гр, для членистоногих – від 100 до 1000 Гр, для кишковопорожнинних – від 50 до 2500 Гр, для простих (амеб, інфузорій) – від 1000 до 3000 Гр.

5.3.3. Радіочутливість риб

Риби найбільш радіочутливі в ембріональній стадії свого розвитку. Коефіцієнти накопичення радіонуклідів ікрою риб залежать від типу радіонукліда і виду риб і коливаються від 1,2 для ^{90}Sr в ікрі щуки до 40,5 для ^{144}Pr в ікрі лина (з розрахунку на сиру масу ікри). Поглинені дози випромінювання, за весь період розвитку ікри від її відкладення до виходу мальків, в разі об'ємної активності у воді радіонуклідів $3,7 \cdot 10^4$ Бк/л (10^{-6} Кі/л) коливаються від 0,001 Гр (0,1 рад) для ікри лина й окуня в розчині ^{106}Ru - ^{106}Rh до 0,03 Гр (30 рад) для ікри окуня в розчині ^{90}Sr – ^{90}Y . Такі низькі дози зумовлені малими розмірами ікринок і невеликими значеннями коефіцієнтів накопичення радіонуклідів, що в свою чергу пояснює відсутність відмінностей щодо контролю у швидкості розвитку ембріонів і кількості нормальних чи аномальних личинок, що виходять з ікри при її перебуванні у воді, де об'ємна активність радіонуклідів становить $(0,037-3,7) \cdot 10^6$ Бк/л (10^{-5} - 10^{-4} Кі/л). Ікра певних видів риб стійка і до більших доз випромінювання. Зокрема, для ікри щуки, що розвивалася в розчині ^{90}Sr - ^{90}Y активністю $3,7 \cdot 10^7$ Бк/л (10^{-3} Кі/л) цих радіонуклідів, встановлено лише дворазове збільшення виходу виродливих мальків (до 21% порівняно з 10% у контролі). Це пояснюється тим, що дози, отримані ікрою за період розвитку в розчині радіонуклідів, малі і становлять не більш ніж 0,3 Гр. Водночас в разі гострого одноразового опромінення ікри лина на стадії двох бластомерів загибель

личинки можна зареєструвати лише за поглиненої дози 2 Гр і вище, а деяке підвищення виходу аномальних форм - при 0,5 Гр і більше.

Вплив у ембріональний період (на стадії ікри) поглиненої дози випромінювання 0,25-2,5 Гр не супроводжується підвищенням радіочутливості мальків що вивелися, до наступного опромінення. При наступному одноразовому гострому опроміненні таких мальків в дозі 40 Гр виявляється, що найбільш радіочутливими будуть ті з них, які взагалі не були опромінені, і ті, котрі зазнали впливу сумарної дози 2,5 Гр. Мальки ж, що отримали дозу опромінення 0,25-1 Гр, виявляються більш радіорезистентними, ніж неопромінені. Такий ефект попереднього опромінення на різні об'єкти добре відомий і, можливо, пов'язаний із іонізуючою стимуляцією, яка спостерігається внаслідок поглинання біологічними об'єктами відносно низьких доз.

Хронічне ж опромінення ікри риби, що розвивається, за поглиненої дози до 1 Гр не є небезпечним. Накопичення такої дози можливе при потужності поглиненої дози 0,1 Гр/добу в разі хронічного опромінення чи поверхневій активності радіонуклідів $(11,1-14,8) \cdot 10^{12}$ Бк/км², або $(3-4 \cdot 10^2)$ Ки/км².

Загалом, у популяції риби, є величезний «запас міцності» при розмноженні, адже з багатьох тисяч ікринок, викинутих однією самкою, доживає до репродуктивного стану звичайно 1-3. Тому можна вважати, що навіть дози опромінення, що призводять до загибелі частини мальків, не будуть позначатися на життєздатності популяції риби. Доросла ж риба більш радіорезистентна, ніж її ікра, і тому проживання риби у водоймищах, забруднених радіонуклідами в дозах, що не перешкоджають розвитку ікри, є практично нешкідливим.

5.3.4. Радіочутливість амфібій і рептилій

Особливості впливу радіоактивних речовин на рибу майже цілком поширюються на різних амфібій (аксолотлів, жаб, тритонів та ін.), потрібно лише врахувати їхню більшу радіорезистентність. Кількість личинок, що розвиваються з ікри амфібій, також у багато разів перевищує таку, що необхідна для підтримання існування популяції, і загибель частини їх унаслідок опромінення навряд чи матиме значення. За приблизними розрахунками, максимальні поглинені дози випромінювання, що не справляють вплив на життєздатність популяції різних амфібій, становлять 0,1 Гр для одноразового й 10 Гр/рік для хронічного опромінення радіонуклідами, що істотно перевищує радіорезистентність риби.

Рептилії (змії, крокодили, вужі, черепахи) ще більш радіорезистентні, ніж амфібії. Для яєць рептилій поглинену дозу випромінювання, що призводить до загибелі (10-50%) зародків, оцінюють в 10 Гр, а для дорослих тварин - 10^2 Гр при одноразовому опроміненні і 10^3 - 10^4 Гр при хронічному.

Тому в природних умовах забруднення територій радіонуклідами в кількостях, що не спричиняють загибелі лісів, якщо і можливий вплив на

амфібій і рептилій, що там живуть, то насамперед шляхом зміни чисельності тварин чи рослин, якими вони живляться, ніж унаслідок несприятливого впливу на їхній організм.

5.3.5. Радіочутливість бактерій і вірусів

Найнижчу радіочутливість серед живих організмів мають бактерії роду мікрококкус, виявлені в каналі атомного реактора, де потужність дози опромінення становить близько 12 Гр/с, або понад 1 млн Гр/добу. У цих умовах бактерія не тільки виживала, а й розмножувалась. У зв'язку з такою високою радіостійкістю ця бактерія дістала назву «мікрококкус радіостійкий». Для більшості бактерій напівлетальні дози знаходяться в діапазоні 300-2000 Гр. Спори бактерій ще стійкіші до опромінення. Але серед бактерій є представники, для яких напівлетальна доза набагато нижча (300-500 Гр). Так, для кишкової палички LD_{50} становить 30-60 Гр.

Найбільша радіостійкість у вірусів - для них LD_{50} коливається від 4000 до 8000 Гр. У стані спокою їх радіостійкість набагато вища. А летальні дози для них досягають 20 кГр. З урахуванням цих доз визначають дози для радіаційної стерилізації матеріалів і препаратів медичного та ветеринарного призначення, знезаражування продукції рослинництва і тваринництва.

5.3.6. Радіочутливість рослинних угруповань

При дії іонізуючих випромінень на рослинні угруповання навіть при порівняно невисоких дозах в їх структурі можуть статися істотні зміни. Це пояснюється тим, що навіть слабке пригнічення росту й розвитку 1-2 видів рослин може спричинити порушення зв'язків між окремими видами і забезпечити сприятливі умови для розвитку інших видів. У цій ситуації небезпечнішим для фітоценозів є хронічне опромінення, а не гостре, оскільки діючи протягом кількох поколінь на рослину, воно призводить до нашарування постійних відхилень у розвитку того чи іншого виду. А після гострого одноразового опромінення фітоценоз у наступні роки може відновитися, наприклад, за рахунок насіння, що збереглося в ґрунті і має вищу радіостійкість.

Зміни у складі рослинних угруповань можуть виникати не тільки при інгібуючих, а й при стимулюючих дозах. Бо посилення росту і розвитку одних видів створює для них переваги у фітоценозі, що може супроводжуватись погіршенням екологічних умов для розвитку інших видів аж до їх повного випадання.

Основним фактором, що призводить до порушення зв'язків між різними видами рослин, є радіобіологічні реакції найбільш радіочутливих з них. Оскільки зміни фітоценозу виникають переважно внаслідок хронічного опромінення, потужність дози є важливішою характеристикою впливу, ніж загальна доза радіації. Безпечною для рослинного угруповання слід вважати таку потужність дози, при якій опромінення будь-якої тривалості не викликає його змін.

Зміни в структурі фітоценозу позначаються на біоценозі в цілому, впливаючи на його зоологічні та мікробні компоненти, різні регуляторні зв'язки між ними. Це, в свою чергу, може призвести до змін біоценозу регіону і навіть екосистеми.

Господарська діяльність людини замінює природні фітоценози на агроценози. Якщо у фітоценозі складний рослинний покрив, який сформувався історично, то в агроценозі, що створюється штучно, він, як правило, представлений одним сортом культивованої рослини. Чи означає це, що радіочутливість ценозу визначатиметься лише радіочутливістю вирощуваної культури? Значною мірою, але неповністю. В агроценозі, крім культивованої рослини, проростають бур'яни, радіостійкість яких, як правило, вища, ніж сільськогосподарських рослин. Найменше пригнічення їх росту може призвести до посилення розвитку бур'янів. При радіаційній стимуляції бур'янів пригнічення культурних рослин може бути ще більшим. Тому можна припустити, що в умовах навіть незначного підвищення радіаційного фону склад агроценозу та його продуктивність з часом можуть змінюватись. Це зумовлює формування зовсім іншого погляду на ефекти малих доз випромінень.

5.3.7. Особливості дії малих доз іонізуючих випромінень на живі організми

Поняття «малої дози», або мінімальної, здатної викликати реакцію організму на дію радіації, досить відносно і залежить від радіочутливості організму.

Дози 0,01-0,3 Гр на перший погляд не тільки не спричиняють будь-яких уражень в організмі ссавців, а навіть активізують деякі функції (прискорення росту, розвитку, підвищення плодючості тощо). Є дані, що ці дози сприяють навіть збільшенню тривалості життя лабораторних тварин. Більше того, як зазначалося, іонізуючим випроміненням приписується роль основного рушія еволюції, що породив таку різноманітність видів живих організмів.

Так, з одного боку, є відомості про спеціально проведені дослідження в умовах особливих камер, розміщених глибоко під землею приміщеннях, шахтах, які показали, що при зниженні природного радіаційного фону в кілька разів сповільнюються поділ клітин, ріст і розвиток інфузорій, комах, рослин, тварин. Але досить лише за допомогою штучного джерела опромінення відновити звичайний рівень радіації, як процеси росту і розвитку нормалізуються. Отже, для нормального розвитку живих організмів іонізуюче випромінення необхідне. З іншого боку, встановлено, що при дозах, які спричиняють стимуляцію, зростає в кілька разів кількість мутацій. Якщо говорити тільки про сільськогосподарські рослини і сільськогосподарських тварин, опромінених з метою підвищення їхньої продуктивності, то це не має істотного значення. Існуюча система періодичного оновлення посівного матеріалу практично виключає

можливість поширення індукованих мутантів у культурних рослин. Неважко припинити передачу мутацій і у тварин. Але мутації в клітинах людини при малих дозах опромінення можуть призвести до генетичних порушень в наступних поколіннях. Саме на такі факти спирається концепція безпорогової дії іонізуючих випромінень, про яку вже згадувалося.

Відомо також, що живі організми, в тому числі сільськогосподарські рослини і тварини, опромінені малими дозами радіації, більшою мірою, ніж неопромінені, піддаються різним інфекційним захворюванням, менш стійкі до шкідливих факторів навколишнього середовища - приморозків, посух, різних хімічних чинників, тобто у них знижений імунітет.

Існуючі рекомендації та розрахунки ґрунтуються переважно на дослідах з рослинами і тваринами і ще далекі від реальних ефектів. Більше того, будь-який негативний в цьому відношенні факт, навіть один на тисячу позитивних, особливо коли йдеться про здоров'я людини, примушує бути дуже обережним у поспішних і однозначних висновках. І хоч деякі радіобіологи беруть на себе сміливість говорити про якісь нешкідливі дози іонізуючих випромінень, переважна більшість відверто визнає, що наших знань поки що недостатньо, щоб, враховуючи велику відповідальність перед людством, давати певні рекомендації про абсолютно нешкідливі дози опромінення.

5.3.8. Критичні органи

Радіочутливість як рослин, так і тварин визначається чутливістю до іонізуючого випромінення тканин, клітини яких перебувають у стані поділу. Хоч в організмі їх не більше кількох відсотків від усієї маси клітин, але саме вони внаслідок своєї найбільшої ураженості радіацією відповідальні за реакцію на дію випромінень. Тому вони дістали назву критичних органів.

Критичні органи - це життєво важливі органи або системи організму, які першими ушкоджуються і виходять з ладу при опроміненні іонізуючим випроміненням, що зумовлює всі радіобіологічні ефекти, аж до загибелі організму.

Поняття про критичні органи вперше склалося в радіобіології тварин. До критичних відносять такі постійно обновлювані за рахунок поділу клітин органи і тканини, як кровотворні, насамперед *кістковий мозок, епітелій травного каналу, ендотелій судин, статеві залози* та ін. Саме вони є найбільш радіочутливими тканинами ссавців, відповідальними за кінець захворювання, яке виникло за певного рівня променевого ураження, саме їх ушкодження призводить до розвитку кістково-мозкового і травного синдромів, що спричиняють променеву хворобу і загибель організму.

У вищих рослин, до яких належать усі сільськогосподарські культури, подібні властивості мають *меристеми* - утворювальні тканини, клітини яких тривалий час, а інколи упродовж усього життя перебувають у стані поділу і здатні утворювати нові клітини, тканини і органи. Внаслідок цього клітини меристем, як і критичних органів ссавців, надзвичайно високочутливі до

іонізуючих випромінень, їх радіочутливість у десятки і сотні разів вища за радіочутливість інших тканин рослини.

За аналогією з критичними органами ссавців та інших тварин до критичних органів вищих рослин слід віднести і *статеві (генеративні) органи* - такі елементи квітки, як *пиляки, яйцеклітина*, які також мають високу радіочутливість.

5.4. Модифікація радіаційного ураження організму

Під модифікацією радіаційного ураження організму розуміють зміну ступеня прояву радіобіологічного ефекту через втручання в хід його розвитку за допомогою чинників фізичної або хімічної природи до, під час або після опромінення.

Усі дії до або під час опромінення слід відносити до профілактичних. Це протипроменевий біологічний захист і радіосенсибілізація - посилення чутливості до радіаційного ураження. Операції, які проводять після опромінення, треба розглядати як терапевтичні заходи, що впливають на процеси післярадіаційного відновлення.

5.4.1. Протипроменевий біологічний захист

Протипроменевий біологічний захист - це послаблення шкідливої дії на організм іонізуючого випромінення в результаті впливу на нього перед опроміненням або під час опромінення яким-небудь чинником фізичної природи чи хімічної речовини.

Фізичні протипроменеві фактори. Ступінь прояву радіобіологічних ефектів значною мірою визначається такими факторами навколишнього середовища, як газовий склад атмосфери, температура, вологість, освітлення та ін. Вони називаються *фізичними*, бо належать до явищ, які характеризують фізичний стан біосфери і які переважно вивчає фізика.

Газовий склад атмосфери. Радіаційне ураження організму дуже залежить від вмісту в атмосфері кисню, оскільки при зниженні його концентрації зменшується радіаційне ураження. Це явище дістало назву «*кисневого ефекту*».

Максимум радіаційного ураження виявляється звичайно при об'ємній частці кисню в атмосфері 20-21%. При зменшенні концентрації кисню (гіпоксії) ступінь протипроменевого захисту організму наростає і досягає максимуму при повній відсутності кисню (аноксія).

Але в умовах із зниженим вмістом кисню в атмосфері, а тим більше з повною його відсутністю можуть існувати лише деякі види живих організмів і, як правило, нетривалий час. Рослини - дуже зручний об'єкт для дослідження цих проблем. Навіть у вегетуючому стані вони можуть існувати в умовах глибокої багатогодинної гіпоксії. Не випадково відкриття кисневого ефекту було зроблено саме в дослідях з рослинами. Пізніше виявлені закономірності були, підтверджені у дослідях з багатьма іншими

організмами, в тому числі із ссавцями. Кисневий ефект - універсальне явище в радіобіології, яке виявляється у дослідах з усіма біологічними об'єктами.

Кількісним вираженням зміни дії випромінювання на живий організм під впливом кисню є величина, що називається *коефіцієнтом кисневого підсилення* (ККП). Це відношення ефективної дози при опроміненні організму в умовах гіпоксії до ефективної дози, що зумовлює такий самий радіобіологічний ефект при опроміненні в повітрі. Наприклад, якщо LD_{50} в першому випадку становить 7,5 Гр, а в другому - 3 Гр, то $ККП = 7,5 : 3 = 2,5$.

Відкриття кисневого ефекту зумовило переворот в уявленнях про модифікацію променевого ураження, показало, що процесами розвитку радіаційних реакцій можна керувати і, головне, зменшувати ступінь прояву радіобіологічних ефектів. До речі, ступінь протипроменевого захисту, що досягається в умовах гіпоксії, поки що не вдається забезпечити при застосуванні жодного чинника фізичної чи хімічної природи.

Температура. Вплив температури на ступінь прояву радіаційного ураження - складний процес, в якому поєднуються і деякі прямі реакції впливу температури на розвиток радіаційних реакцій, і посередні, зумовлені дією температури на окремі фізіологічні процеси. Тобто, з одного боку, зміна температури може впливати на хід реакцій променевого ураження, а з іншого - на інтенсивність обміну речовин, тим самим сприяючи зміні радіочутливості організму. Так, охолодження насіння, спор та деяких інших об'єктів до температури сухого льоду (-78°C) або рідкого повітря чи азоту (близько -190°C) забезпечує істотний протипроменевий захист. Це пояснюється тим, що при глибокому охолодженні складаються несприятливі умови для поглинання енергії випромінювання речовиною та її переносу.

При зниженні температури навколишнього середовища до $0-5^{\circ}\text{C}$ підвищується радіостійкість вегетуючих рослин, комах, мікроорганізмів, ссавців та деяких інших тварин, що впадають у зимову сплячку. Безперечно, це пов'язано з гальмуванням інтенсивності обміну речовин.

Вологість. Вода відіграє велику роль у променевому ураженні живих організмів. Саме з молекул води під дією іонізуючого випромінювання виникають високоактивні продукти - вільні радикали й пероксиди, які посилюють радіобіологічні ефекти. Але ж у клітинах більшості організмів кількість води більш-менш стала і варіює у досить вузьких межах. Винятком є такі об'єкти, як насіння рослин, спори мікроорганізмів, в яких вміст води може змінюватись від кількох відсотків до більш як 90%, тобто до необхідної для живої клітини кількості. Дані щодо впливу вологості на радіочутливість добуто саме в дослідах з цими об'єктами, переважно з насінням.

Вміст води в насінні за звичайних умов при повітряно-сухому зберіганні становить, як правило, 8-15%. Збільшення вологості призводить до підвищення радіочутливості, і це цілком зрозуміло: з одного боку, збільшується кількість вільних радикалів, що утворюються при опроміненні, а з іншого - посилюються процеси обміну речовин (насіння починає проростати). Логічно, що зниження вологості збільшує радіостійкість, тобто

виявляє радіопротекторну дію. Але парадоксально, що така залежність спостерігається лише до рівня вологості 4-5%. При подальшому його зниженні (до 2-3%) радіочутливість різко підвищується. Пояснення цього явища досить складне і пов'язане з особливостями радіохімічних реакцій, які в підручнику не розглядаються.

Питання про роль вологості в радіостійкості як рослин, так і тварин практично не вивчене. Але на основі найзагальніших залежностей можна припустити, що деяке зневоднення тканин призводитиме до зниження інтенсивності обміну речовин і сприятиме збільшенню радіостійкості.

Освітленість і якість світла. Сонячне світло відіграє важливу роль у житті живих організмів, особливо рослин. Відомі тисячі видів тварин, у тому числі і ссавців, що живуть без світла, але для рослин - це вкрай рідкісний виняток. Тому практично всі дані про залежність радіочутливості від освітлення і якості світла (його складу) стосуються організмів, в яких відбувається фотосинтез, - рослин.

Під впливом сонячного світла змінюється інтенсивність фотосинтезу і відповідно нагромадження окремих речовин. Залежно від інтенсивності і спектрального складу світла можуть змінюватись деякі морфологічні реакції рослин, що позначається на стані їх утворювальних тканин - меристем. Не дивно, що світло істотно впливає на радіочутливість рослин. Але і тут не вдається виявити яких-небудь загальних закономірностей. Як правило, рослини, вирощувані за оптимального режиму освітлення, мають найвищу радіостійкість. Затінення їх на деякий час безпосередньо перед опроміненням і під час опромінення може ще підвищити її, тобто виявляє протипроменевий захист. Це можна пояснити зниженням інтенсивності фотосинтезу і взагалі обміну речовин.

Попереднє опромінення рослин ультрафіолетовими або інфрачервоними променями, що також входять до складу сонячного світла, у деяких ситуаціях теж може виявити радіозахисну дію, однак може і посилювати радіобіологічні ефекти.

Головне, що треба підкреслити, реакція живих організмів на дію іонізуючого випромінювання під впливом деяких фізичних факторів може змінюватись - послаблюватись або посилюватись. Особливого практичного значення ці факти не мають. Лише в деяких ситуаціях може виникнути потреба зменшити вміст кисню, знизити температуру або вологість в організмі. Про масове використання цих факторів не може бути й мови. Тому всі зусилля вчених-радіобіологів були спрямовані на винахід хімічних речовин, препаратів, фармакологічних засобів, за допомогою яких можна було б знизити ступінь радіаційного ураження організму.

Хімічні протипроменеві, або радіозахисні, речовини. У 1949 р. практично водночас радіобіологи З. Бак і А. Ерве із Бельгії і Г. Патт із США повідомили наукову громадськість світу про дві хімічні сполуки, введення яких лабораторним тваринам перед рентгенівським опроміненням підвищує їх виживання. Перші виявили, що таку дію має добре відома дуже сильна

отрута ціанід натрію, ін'єкція якого мишам у дозі, в кілька разів меншій за летальну, безпосередньо перед опроміненням знижувала ступінь радіаційного ураження в 1,5 рази. Г. Патт навів дані про широко відому біологам і медикам амінокислоту цистеїн, яка приблизно такою самою мірою, як і ціанід натрію, захищала тварин від опромінення. Так було відкрито перші радіозахисні речовини, що дістали назву радіопротекторів.

Радіопротектори - це хімічні речовини, введення яких в організм перед опроміненням або під час опромінення сприяє послабленню радіаційного ураження.

Кількісною характеристикою дії радіопротекторів є величина, названа фактором зміни дози (ФЗД). *Фактор зміни дози* - це відношення ефективної дози при опроміненні організму з радіопротектором до ефективної дози, що зумовлює такий самий радіобіологічний ефект у контролі, тобто без радіопротектора.

Це визначення нагадує сформульоване вище визначення ККП. ККП - це окремий випадок ФЗД, коли в ролі радіопротектора виступає гіпоксія. Тому ФЗД оцінюють за допомогою тієї ж простої арифметичної дії, що й ККП.

Природно, що коли хімічна речовина захищає організм від іонізуючого випромінювання, значення ФЗД повинно бути більшим за одиницю. Якщо воно менше за одиницю, це свідчить про посилення дії випромінювання - радіосенсибілізацію, а коли дорівнює одиниці, то речовина не діє ніяк – тобто є нейтральною.

Через 2 роки після відкриття перших радіопротекторів З. Бак зі своїми співробітниками виявили, що одна з похідних сполук цистеїну - цистеамін набагато більше зменшує ступінь променевого ураження як при ін'єкціях, так і при годівлі тварин. При введенні мишам лише 150 мг/кг маси тіла цистеаміну, що майже в 10 разів менше за дозу цистеїну, ФЗД досягає 2, Це означає, що при використанні цього препарату дозу опромінення потрібно збільшити удвічі, щоб мати такий самий радіобіологічний ефект, як без його використання. Тобто він підвищує радіостійкість організму у 2 рази (табл.26).

26. Ефективність радіопротекторів при гострому опроміненні савців

Радіопротектор	Тварина	Спосіб введення	Захисна доза, мг/кг	ФЗД
Цистеамін	Собака	Внутрішньовенно	50-100	1.7-2.0
	Миша	Оральнo	200-500	1.6-1.8
Цистеїн	Вівця	Внутрішньочеревно	1000-1500	1.4-1.5
	Щур	Під шкіру	1000-1200	1.5
Ціанід натрію	Миша	Внутрішньочеревно	0.2-0.5	1.3-1.5
Серотонін	Кролик	Внутрішньочеревно	95	1.5-1.8
Аміноетитізотіуроній	Миша	Внутрішньочеревно	250-480	1.8-2.0
	Щур	Оральнo	1500	1.6-1.8
Триптамін	Свиня	Під шкіру	30-150	1.4-1.6
Резерпін	Щур	Під шкіру	4	1.5
Препарат WR-2721*	Миша	Внутрішньочеревно	300-500	1.5-2.5

* - складний радіопротектор

Багатьма дослідженнями було доведено універсальність радіозахисних властивостей радіопротекторів, які вводили різними способами: ін'єкціями під шкіру, внутрішньовенно, внутрішньочеревно, орально, через середовище культивування або обприскуванням (у дослідях з рослинами і мікроорганізмами). Протипроменева дія виявлялася завжди.

Досі на протипроменеву дію випробувано десятки тисяч хімічних речовин. Сотні з них виявились досить ефективними радіопротекторами. Але дія жодної з них не була ефективнішою за дію цистеаміну.

Класифікація радіопротекторів. Існує багато різних класифікацій радіопротекторів, серед яких виділяють десятки різних груп. У даній книзі наведено лише ті з них, що мають чіткі радіопротекторні властивості. До радіопротектора звичайно ставлять три основні вимоги:

- 1) висока дозова ефективність;
- 2) нетоксичність - введення в організм не повинно супроводжуватись будь-якими негативними реакціями;
- 3) стабільність дії - зберігання протипроменевих властивостей протягом тривалого часу.

Виділяють такі основні класи радіопротекторних сполук (речовин):

Сульфгідрильні сполуки. До них належать цистеїн і цистеамін, а також багато інших сполук, у складі яких є сульфгідрильні (SH-) групи: глутатіон, тіосечовина, аміноетилізотіуроній. З часу відкриття радіозахисних властивостей сульфгідрильних сполук і досі їх вважають найефективнішими і найкраще вивченим класом радіопротекторів. Сульфгідрильні сполуки виявляють максимальний радіозахисний ефект відносно рослин і тварин - значення ФЗД при їх використанні найбільше.

Радіозахисні речовини звичайно вводять ін'єкціями під шкіру або внутрішньочеревно, а також орально з їжею чи водою. Тому захисну дозу препаратів зазначають у міліграмах на 1 кг маси тіла.

В рослини радіопротектори частіше вводять через коріння, занурюючи рослини перед опроміненням на кілька годин у поживні речовини з радіопротектором. Концентрації розчину зазначають у молях на 1 л розчину.

Проте, виявляючи найвищу протипроменеву дію серед усіх класів радіопротекторів, сульфгідрильні сполуки мають досить високу токсичність. Крім того, вони є сильними відновниками (з чим нерідко пов'язують їх радіозахисні властивості), тому швидко окислюються, втрачаючи свою радіозахисну дію. Тому максимальний ефект радіозахисту спостерігається через 5-15 хв. після введення сульфгідрильних сполук в організм тварин, а потім він різко знижується і через 40-60 хв. майже не фіксується.

Біогенні аміни. До них належать насамперед дві сполуки з високою радіозахисною дією: триптамін - один з продуктів бактеріального розкладу амінокислоти триптофану й серотонін - похідне триптаміну, важливий продукт метаболізму тваринних організмів. Біогенні аміни виявляють досить високий протипроменевий ефект, хоч вони помітно поступаються перед цистеаміном. Але токсичність біогенних амінів набагато менша, а

стабільність вища. Менш виражені радіозахисні властивості в амінів мексаміну й гістаміну.

Відновники. Механізми ушкодження іонізуючим випроміненням значною мірою зумовлені розвитком у клітинах процесів окислення. Крім сульфгідрильних сполук, є багато хімічних речовин інших класів, що мають відновні властивості. Деякі з них виявляють і радіозахисні властивості. Це такі відомі відновники, як гідросульфід натрію, тіосульфат натрію, метабідросульфід натрію. Істотну протипроменеву дію мають такі сильні відновники, як аскорбінова кислота (вітамін С), ретинол (вітамін А), токоферол (вітамін Е).

Добре відомі відновні властивості спиртів. Деякі з них справді мають протипроменеві властивості - метиловий, етиловий, пропиловий, бутиловий. Але щоб забезпечити радіозахист за допомогою етилового спирту, треба створити концентрацію його в організмі 3-5 мл абсолютного, тобто 100%, алкоголю на 1 кг маси тіла. Для людини це доза, лише у 2 рази менша за смертельну. При цьому можна досягти значення ФЗД лише 1,2.

Протипроменева ефективність більшості відновників середня або слабка. Майже всі відновники нестабільні, багато з них досить токсичні.

Солі металів. Метали відіграють велику роль у збереженні структури нуклеїнових кислот і білків, по-різному впливаючи на проникність клітинних оболонок і мембран, активність ферментів, до складу яких вони входять. Є чимало препаратів, створених на основі металів, які за всіма показниками можна віднести до радіопротекторів. Так, серед радіопротекторів на основі кобальту відомі такі, як кобамід, кобадекс, кобамін, кобалін; нікелю - нікавіт, нікаміндон; міді - мідіанокс, мідікостерон. Відомі радіопротектори на основі заліза, цинку, марганцю, комплексів з двох або трьох металів.

ФЗД при використанні солей зазначених вище металів досягає в окремих випадках 1,5-1,7, тобто ці солі можна вважати ефективними радіопротекторами. Однак перелічені вище метали-радіопротектори належать до важких металів, серед яких цинк, мідь, кобальт є високотоксичними. І хоч як радіопротектори їх використовують у низьких концентраціях, не можна не зважати на їх токсичність.

Відомо також, що солі і сполуки металів у водних розчинах довго зберігають свої хімічні властивості. Отже, радіопротектори на їх основі мають порівняно високу стабільність.

Інгібітори метаболізму. До цієї дуже строкатої групи радіопротекторів належать багато речовин - інгібіторів метаболізму, які, пригнічуючи окремі процеси біосинтезу, розриваючи послідовний ланцюг складних перетворень одних продуктів на інші, зумовлюють стан організму, близький до шокowego, в якому він, аналогічно до стану анабіозу, набуває підвищеної радіостійкості. Такі властивості мають інгібітори синтезу нуклеїнових кислот - оксисечовина, 5-аміноурацил; інгібітори синтезу білків і ферментів - гідроксиламін, хлорамфенікол; інгібітори дихання - азид натрію, амітал та ін.

Протипроменева ефективність більшості інгібіторів метаболізму вважається слабкою і середньою; всі вони токсичні для організму; стабільність їх середня або низька.

Природні метаболіти. Велика кількість радіопротекторів певною мірою токсична для всіх організмів. Це стосується не тільки відкритих першими ціанідів і сульфгідрильних сполук, інгібіторів метаболізму, солей металів, а й багатьох радіопротекторів інших класів, про які не згадувалось. Багато які з них виявляють протипроменеву дію саме в токсичних концентраціях, з чим нерідко пов'язують їх радіозахисні властивості. Тому дедалі більше приваблює увагу радіобіологів можливість використання як радіопротекторів природних для організму речовин - його метаболітів, серед них - насамперед нуклеїнових кислот, гормонів, білків і ферментів, вітамінів, вуглеводів, фізіологічно активних речовин.

Чітко виражені радіопротекторні властивості мають ДНК і РНК. У дослідях з тваринами, рослинами встановлено, що незалежно від походження ДНК та РНК і нуклеотиди, з яких вони складаються, мають радіозахисні, навіть лікувальні властивості, тобто можуть зменшувати наслідки променевого ураження і в післярадіаційний період. Пояснюється це тим, що протипроменева дія препаратів нуклеїнових кислот, як і білків, ферментів, амінокислот, ґрунтується на тому, що вони є готовими елементами у пошкоджених ділянках молекул цих речовин. Тому ефективність їх виявляється при введенні не тільки до, а й після опромінення.

Надзвичайно великий інтерес до питань радіозахисту й лікування променевої хвороби у людини за допомогою гормонів, вітамінів, різних біологічно активних речовин. Протипроменеві властивості мають ретинол (вітамін А), аскорбінова кислота (вітамін С), токоферол (вітамін Е). Радіопротекторним ефектом характеризуються й інші вітаміни - тіамін (вітамін В₁), піридоксин (вітамін В₆), ціанкобаламін (вітамін В₁₂), рутин (вітамін Р), тілохінон (вітамін К) та різні їх сполуки.

При опроміненні рослин сильні радіозахисні властивості виявляють фітогормони: абсцизова кислота й особливо етилен. ФЗД останнього може перевищувати навіть дію найефективніших радіопротекторів сульфгідрильної природи. Проте, фітогормони неефективні при опроміненні тварин.

До гормонів тварин, що мають радіозахисну дію, належать згадані вище біогенні аміни та багато інших, у тому числі статеві гормони - андрогени й естрогени; гормони надниркових залоз - адреналін і норадреналін; гормон підшлункової залози - інсулін та гормон щитовидної залози - тироксин.

Високу радіозахисну дію має природний акумулятор і переносник хімічної енергії в живих клітинах аденозинтрифосфат (АТФ) і регулятор клітинного метаболізму циклічний аденозинмонофосфат (цАМФ), ФЗД яких досягає 1,5-1,7.

Всі названі метаболіти нетоксичні і досить стабільні.

Поживні речовини. Забезпечення організму поживними речовинами, впливаючи на інтенсивність обміну речовин, синтез і нагромадження метаболітів, формує певний ендogenous (внутрішній) фон радіостійкості. Цей фон, що створюється тисячами різних органічних і неорганічних речовин та їх сполук, дуже утруднює пояснення причин зниження або збільшення радіочутливості організму при введенні окремих поживних речовин. Ці речовини впливають і на перебіг процесів відновлення після опромінення. Безліч фактів свідчать про те, що ефекти іонізуючої радіації значною мірою залежать від забезпеченості організму поживними речовинами як перед опроміненням, так і після нього.

Зокрема, встановлено, що при вирощуванні на високому агрофоні опромінені рослини виживають краще, ніж на низькому. Значно підвищує радіостійкість рослин внесення при вирощуванні більшої кількості фосфорних, калійних і магнієвих добрив порівняно з нормою. Протипроменева ефективність солей багатьох металів свідчить про те, що внесення у ґрунт мікродобрив також сприяє підвищенню радіостійкості рослин.

Оптимізація умов живлення, збільшення в раціоні вмісту калію, кальцію, магнію, вітамінів сприяють зниженню ступеня радіаційного ураження тварин.

Відомі й інші класи хімічних радіозахисних речовин: амідифосфортіоати, ціаніди, нітрили, окислювачі, антимулагени, комплексні сполуки та ін.

Краще застосовувати радіопротектори в суміші, поєднуючи позитивні властивості представників різних їх класів: високу ефективність одних, наприклад сульфгідрильних сполук; низьку токсичність других, наприклад природних метаболітів; стабільність третіх, наприклад солей металів. При таких комбінаціях вдається за рахунок зменшення концентрацій знизити негативні властивості окремих радіопротекторів і, крім того, збільшити дію протипроменевого захисту. За таким принципом виготовлено радіопротектор WR-2721 (табл. 26).

Проте описані ефекти радіопротекторів, значення їх ФЗД як для тварин, так і для рослин стосуються одноразового гострого опромінення іонізуючим випроміненням γ -, β - і рентгенівського джерела. Тому, після аварії на Чорнобильській АЕС найважливішим завданням радіобіологів є пошук засобів протипроменевого захисту для умов хронічного опромінення, яке триває роками, десятиріччями, все життя - радіопротекторів так званої пролонгованої дії.

Радіопротектори пролонгованої дії. В умовах хронічного опромінення захисну дію повинні мати тільки радіопротектори, які протягом тривалого часу зберігають свої властивості, тобто високостабільні. Якщо цієї властивості нема, то найефективніші при гострому опроміненні радіопротектори більшості класів, у тому числі й сульфгідрильні сполуки, при хронічному опроміненні не виявляють захисної дії.

Досить високу стабільність дії мають солі металів. Але вона вважається високою лише порівняно із згаданими нестійкими сполуками. Багато металів через деякий час можуть окислюватись, брати участь в обміні речовин і виводитись з організму. Тому періодично виникає потреба у введенні нових доз радіопротекторів, що може призвести до різних токсикозів.

Порівняно ефективними радіозахисними засобами пролонгованої дії вважаються радіопротектори з природних метаболітів і поживних речовин. Застосування комплексних препаратів, виготовлених на основі гормонів, вітамінів та інших біологічно активних речовин, а також макро- і мікроелементів (кальцію, калію, заліза, цинку, кобальту, марганцю, молібдену, міді) сприяє стабілізації гормонального та імунного статусу організму, підвищує його неспецифічну стійкість проти різних несприятливих чинників, у тому числі і дії іонізуючої радіації.

5.4.2. Радіосенсибілізація

Радіосенсибілізація - це штучне збільшення радіочутливості біологічних об'єктів, яке супроводжується посиленням шкідливої дії іонізуючого випромінювання.

Радіосенсибілізатори являють собою хімічні речовини, введення яких в організм перед опроміненням або під час опромінення призводить до посилення радіаційного ураження. Унікальні радіосенсибілізуючі властивості, як уже зазначалось, має кисень, який порівняно з аноксичними умовами може посилювати радіаційне ураження всіх живих організмів в 2,5-3 рази і більше. Майже так само діє оксид азоту NO.

Останнім часом активно вивчаються радіосенсибілізуючі властивості більш складних хімічних сполук, що діють на організм подібно до кисню, але які можна було б вводити звичайними способами, як протектори, а не за допомогою складної апаратури. Серед найефективніших радіосенсибілізаторів таку властивість мають похідні дуже сильного окислювача нітроімідазолу - метронідазол і мізонідазол. Вони можуть посилювати променеве ураження, тобто знижувати ефективну дозу більш як у 2 рази.

Особливий інтерес викликає сенсибілізація дії іонізуючої радіації специфічною сполукою - йодацетамідом. Він може зв'язувати сульфгідрильні групи білків, послаблюючи тим самим радіостійкість організму, забезпечену природними сульфгідрильними сполуками. Йодацетамід посилює радіаційне ураження майже удвоє.

Застосування радіосенсибілізаторів на практиці досить вузьке. Найважливішою сферою їх використання в медицині є радіаційна терапія злоякісних пухлин, коли для зменшення радіаційного ураження здорових тканин радіосенсибілізатори вводять безпосередньо в зону опромінення.

Розробка способів радіосенсибілізації дуже важлива для багатьох радіаційно-біологічних технологій, в тому числі й для тих, що використовуються у сільському господарстві і потребують високих доз

опромінення (радіаційна обробка кормів, радіаційне знезараження стічних вод та ін.). Використання радіосенсибілізаторів у цьому разі за рахунок зменшення дози дає змогу скоротити тривалість опромінення, а в деяких випадках - і затрати енергії.

Перспективним є застосування радіосенсибілізаторів у радіаційному мутагенезі рослин. За їх допомогою вдається підвищити генетичний ефект опромінення, зберігаючи при цьому досить високе виживання рослинних організмів.

5.4.3. Післярадіаційне відновлення організму

Післярадіаційне відновлення організму - це нормалізація після радіаційного ураження функцій клітин його критичних органів, що забезпечує нормалізацію їх функціональної діяльності і одужання його як цілісної системи. Таке визначення поняття "відновлення" відбиває суть процесів, що приводять до нормалізації функцій багатоклітинного організму, пошкодженого іонізуючими випромінюваннями. І з таких позицій під відновленням критичних тканин рослин - меристем слід розуміти відновлення здатності їх клітин до поділу, а меристеми в цілому - до проліферації.

Явище післярадіаційного відновлення являє собою багаторівневий процес, і те, що сприймається як відновлення організму, як одужання від променевої хвороби, звичайно відображає функціонування чисельних складних систем відновлення, які діють на різних рівнях організації.

В 1972 р. Д.М. Гродзинським і І.М. Гудковим була запропонована схема основних шляхів післярадіаційного відновлення рослин (рис. 17). Згідно неї, загальне відновлення рослини досягається за рахунок чотирьох способів післярадіаційного відновлення: репараційного, репопуляційного, регенераційного і компенсаторного.

Репараційне, або поклітинне, відновлення, досягається за рахунок відновлення макромолекул клітини, в першу чергу ДНК, та окремих структур клітини - хромосом, мембран та інших. Репопуляційне відновлення забезпечується розмноженням клітин, які в момент опромінення перебували в радіостійкому стані і зберегли здатність до поділу. Це - клітини, що знаходяться у радіостійких періодах клітинного циклу та поза циклом - стані спокою. Регенераційне відновлення відбиває, з одного боку, проліферацію тканин, що знаходяться в стані спокою (наприклад, центру спокою кореня), і з іншого - органів, що знаходяться в стані спокою (наприклад, сплячих бруньок). На відміну від інших організмів цей тип відновлення у вищих рослин відіграє дуже важливу роль. І, нарешті, компенсаторне відновлення може досягатися за рахунок того, що функції пошкоджених клітин (тканин, органів), несучи підвищене навантаження, виконують неушкоджені клітини (тканини, органи), та за рахунок дедиференціації спеціалізованих клітин і тканин у проліферуючі.

Таким чином, можливі різні шляхи післярадіаційного відновлення на різних рівнях організації організму. Але при опроміненні такого багатоклітинного утворення як вища рослина, доводиться зустрічатися з дуже складним переплетенням цих шляхів і далеко не завжди є можливість відрізнити їх один від одного.

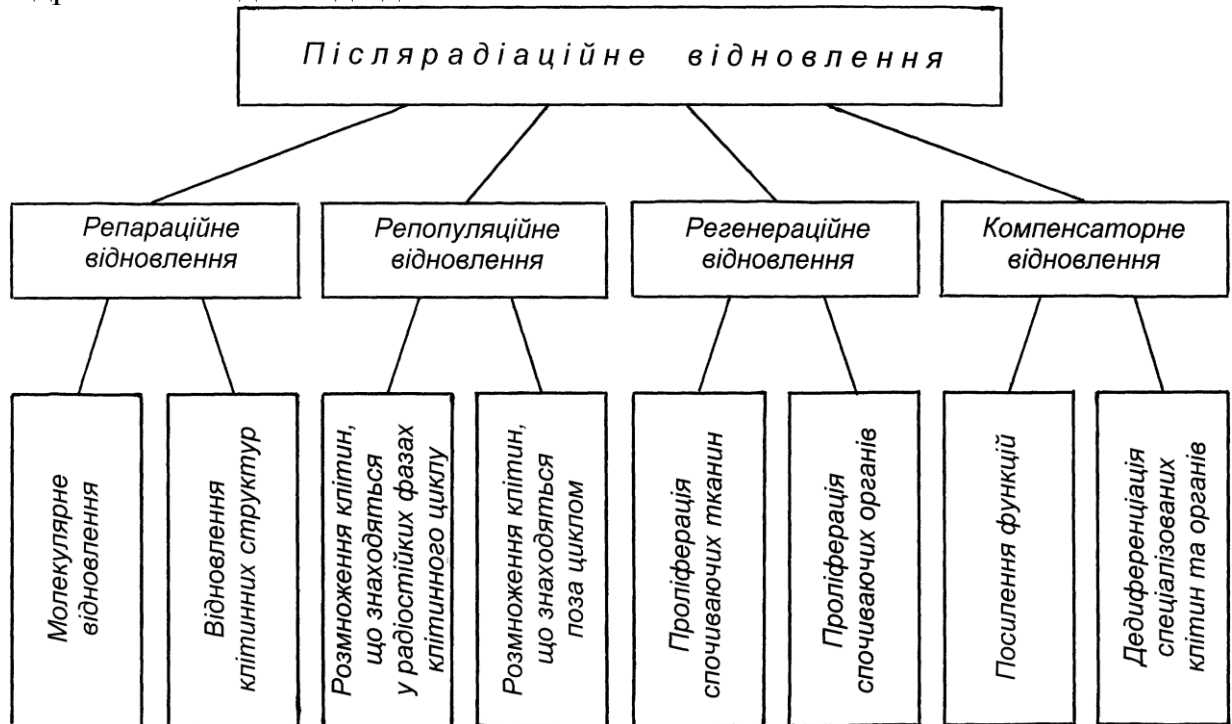


Рис. 17. Шляхи (типи) післярадіаційного відновлення живих організмів.

Репараційне відновлення. Досить переконливі докази можливості репараційного, або поклітинного, відновлення окремих пошкоджених іонізуючими випромінюваннями клітин були одержані порівняно недавно - лише в 60-х рр. і то тільки для одноклітинних організмів і клітин в культурі. Але ще добре десятиліття не було підстав говорити про конкретні механізми молекулярного відновлення і відновлення клітинних структур, хоча передумови для цього існували. Головною з них є репарація сублетального пошкодження.

В опроміненій клітині розрізняють два типи пошкодження – потенційно летальне та сублетальне. Потенційно летальними пошкодженнями називають такі, які можуть привести до загибелі клітини, але в певних умовах можуть бути відновлені. Під сублетальними розуміють такі типи пошкоджень, які самі по собі ще не приводять до загибелі клітини, але при наступному опроміненні здатні її викликати.

Відповідно розрізняють два типи репарації - від потенційно летальних і від сублетальних пошкоджень. Можливість репарації від сублетальних пошкоджень звичайно доводиться дослідами по фракціонованому опроміненню, в основі яких лежить гіпотеза про те, що якби радіаційне ураження носило повністю незворотний характер, то ефект, викликаний фракціонованим опроміненням при певній сумарній дозі, був би таким же, як

і при одноразовому опроміненні у тій же дозі. Але це не так. Величезна кількість даних, одержаних в дослідженнях з найрізноманітнішими організмами, в тому числі і з рослинами, свідчить про те, що при фракціонуванні дози ступінь радіаційного ураження, як правило, зменшується. При цьому ураження тим слабше, чим більший проміжок часу розділяє фракції і чим більша кількість фракцій, на які розділена доза

Як випадок максимального ступеня фракціонування дози можна розглядати опромінення при зниженні потужності дози. Результати досліджень багатьох авторів, які проводили опромінення рослин і тварин за різних потужностей доз, однозначно свідчать про те, що з її зменшенням дія опромінення, як правило, значно знижується. Слід відмітити, що в сухих системах (насінні, спорах, пилку), при обмеженні доступу кисню ефект фракціонування і потужності дози не проявляється або значно послаблюється. І найбільш переконливе пояснення цього явища можна знайти саме у визнанні реальності існування поклітинного відновлення, обов'язковою умовою якого є підтримування в клітинах активного обміну речовин.

Хоча існують і інші спроби пояснення цих ефектів. Деякі автори вважають, що перша фракція дози може переводити клітину у більш радіостійкий стан, наприклад, індукуючи затримку поділу і роблячи її менш чутливою до наступного опромінення. Інші вважають, що при першій фракції дози може відбуватися стимулювання процесів репарації, що зумовлює меншу пошкоджуваність при опроміненні другою фракцією. Але обидві ці гіпотези ні в якій мірі не суперечать ідеї поклітинного відновлення, тому що підвищення радіостійкості при затримці поділу нерідко пояснюють саме створенням придатних умов для процесів репарації.

Таким чином, дослідження по фракціонованому опроміненню однозначно свідчать про наявність відновних процесів в клітинах рослин.

Молекулярне відновлення. Основним молекулярним пошкодженням клітини при дії іонізуючих випромінень, як уже не раз відзначалось, є пошкодження молекул ДНК. Головним структурним пошкодженням ДНК - одно- і двониткові (одиначні і подвійні) розриви її полінуклеотидних ланцюгів. Репарація цих типів пошкоджень, яким приписується головна роль в загибелі клітини, вперше була показана в дослідах з бактеріями, які дають змогу одержувати штами, дефектні за окремими ферментами, що контролюють певні етапи репарації.

На першому етапі після утворення розриву відбувається виявлення місця пошкодження за допомогою спеціальних контролюючих систем. Потім ділянка полінуклеотидної нитки з пошкодженими нуклеотидами з обох боків надрізається за допомогою спеціальних ферментів ендонуклеаз, вищеплюється з молекули - *інцизія* і видаляється - *ексцизія*. Останній етап здійснюється за допомогою ферментів, які називаються екзонуклеазами. Розмір утвореного розриву буває різним - від декількох одиниць до декількох тисяч нуклеотидів. Після звільнення молекули від пошкодженої

ділянки відбувається комплементарний синтез ДНК на місці бреші з використанням залишку непошкодженої нитки ДНК в ролі матриці - так звана репаративна реплікація. Цей етап контролюється ферментами ДНК-полімеразами, які беруть участь і у звичайному реплікативному синтезі ДНК. І, нарешті, відбувається зшивання кінців синтезованої ділянки з полінуклеотидною ниткою.

Тип репарації, що йде за наведеною схемою, одержав назву *ексцизійної репарації*. Але описані й інші типи репараційного синтезу ДНК. Більшість з них хоч і має певні особливості, в цілому нагадують дану схему, суть якої визначається принципом "*вищепління-заміщення*".

Для репарації двониткових, або подвійних, розривів ДНК необхідно, щоб клітина мала активну систему рекомбінації і непошкоджені ділянки ДНК, гомологічні тим ділянкам, які мають подвійні розриви.

Але до недавнього часу не було чітких доказів існування молекулярної репарації ДНК в рослинних клітинах. Більше того, в зв'язку з тим, що спроби виявити систему ферментів репарації в рослинах і процеси репаративної реплікації завершилися невдало, у 60-ті рр. було висловлене припущення про принципову відмінність тваринних і рослинних клітин, яка полягає нібито саме у відсутності у останніх механізмів репарації ДНК.

Заперечення існуванню молекулярної репарації у рослин виглядало досить несподівано, так як суперечило загальним принципам організації живого на молекулярному і клітинному рівнях, виключало існування в клітинах рослин дуже важливого механізму, покликаного слідкувати за незмінністю структури ДНК, стабільністю генетичного коду. Тому пошуки репаруючих систем у рослин тривали. І хоча в зв'язку з відсутністю у вищих рослин відповідних мутантних форм, як у бактерій, не було одержано прямих даних про послідовний хід етапів реплікативної репарації, було здобуто досить багато фактів, що свідчать про її існування.

Важливим доказом наявності у вищих рослин механізмів молекулярної репарації ДНК стало встановлення можливості відновлення її молекулярної маси за допомогою методу центрифугування в лужному градієнті сахарози. Суть його полягає в тому, що при центрифугуванні препаратів ДНК стан її окремих фракцій за молекулярною масою описується відповідною седиментограмою з характерним піком у максимумі молекулярної маси. При виникненні в ДНК при опроміненні розривів її молекулярна маса зменшується. На седиментограмі це відображується зміщенням піку в бік більш легких фракцій. У дослідях з найрізноманітнішими видами рослин було цілком однозначно показано, що зі збільшенням часу між опроміненням рослин і виділенням ДНК профіль її седиментації все в більшій мірі повертається до нормального, тобто первинного стану.

Доказом можливості молекулярної репарації ДНК є демонстрація додаткового включення попередників в ДНК опромінених клітин - так званого позапланового синтезу ДНК, який відбиває етап комплементарного синтезу на місці пробілу в молекулі, що виник після вищеплення

пошкодженої ділянки. Так як інтенсивність репаративного синтезу ДНК в порівнянні з реплікативним досить низька, його звичайно встановлюють в ДНК-несинтезуючі періоди клітинного циклу (в пре- та постсинтетичну фази) по включенню специфічного міченого попередника синтезу ДНК тимідину (^3H -тимідину). Це можна зробити тільки на клітинах, які діляться синхронно, тобто при роботі з тканиною або клітинною популяцією, в якій всі клітини водночас проходять фази клітинного циклу, чого практично не буває в природних умовах, але чого почасти можна досягти в умовах лабораторії за допомогою синхронізаторів поділу. Але навіть кращі з них дають змогу досягти не більш як 80-90% синхронності поділу. Не залучені ж в одночасний поділ клітини, синтезуючи ДНК в будь-який слушний для них час, не дають можливості показати існування позапланового синтезу ДНК.

Але відомо, що в зародках насіння, яке перебуває в стані спокою, до 100% клітин можуть знаходитися у так званій G_0 -фазі. При набуханні і проростанні насіння вони переходять в пресинтетичну G_1 -фазу і тільки пройшовши її - в ДНК-синтезуючу S-фазу. При проростанні насіння при кімнатній температурі перші ДНК-синтезуючі клітини з'являються, як правило, тільки через 10-30 годин. До цього періоду склад клітин меристем зародка не змінюється і практично повністю представлений клітинами, які знаходяться у пресинтетичній фазі чи, точніше, перехідному G_0 - G_1 -періоді. І було доведено, що γ -опромінення насіння в цей період індукує додатковий позаплановий синтез ДНК в клітинах зародкового кореня. Ступінь включення міченого тимідину залежав від дози: з її збільшенням він зростав, досягав максимуму (5-7% клітин порівняно з 0,5% у контролі) і при подальшому збільшенні дози зменшувався.

Існують дані і про молекулярне відновлення РНК, деяких білків, зокрема, ядерного білку хроматину, окремих основ ДНК. Але і в їх основі лежать механізми, аналогічні репарації ДНК. Тому репарація ДНК вважається основним механізмом молекулярного відновлення. Саме за його допомогою ліквідуються індуковані випромінюваннями генетичні пошкодження.

Відновлення клітинних структур. Ще в 50-х рр. була висунута гіпотеза про можливість відновлення радіаційних пошкоджень на рівні хромосом. Вона була заснована на підставі багатьох експериментальних даних про те, що при фракціонуванні дози опромінення кількість аберацій хромосом на клітину суттєво залежить від інтервалу часу між фракціями дози. Але якщо при невеликих інтервалах, вимірюваних хвилинами - годинами, практично завжди спостерігається збільшення числа аберацій, то при подальшому зростанні часу між фракціями або кількості фракцій результати виявляються досить суперечливими: в одних випадках відбувається очікуване монотонне їх зменшення до певного рівня, а в інших - після зменшення знову спостерігається збільшення. Іноді зустрічаються і менш чіткі залежності, які не відносяться ні до першого, ні до другого випадку, та як виняток -

обернена залежність: збільшення кількості аберації хромосом при фракціонуванні.

В цілому ж вважається, що в післярадіаційний період відбувається відновлення хромосом. Але досі ще не встановлено якихось певних механізмів їх репарації.

Є дані і про репараційне відновлення деяких інших структур клітини і, зокрема, мембран, які відіграють важливу роль в розвитку радіаційного ураження. Встановлено, що структура мембран, її проникливість, пошкоджені іонізуючими випромінюваннями, можуть з часом відновлюватися. Але молекулярні механізми цього процесу досліджені поки що слабо.

Яку роль відіграє репараційне відновлення в загальному відновленні організму і, зокрема, рослин, поки що невідомо. Досить переконливо не показана кореляція між радіостійкістю видів вищих організмів та їх здатністю до репарації. Відомі лише окремі роботи, в яких на основі дуже вузьких досліджень висловлюється версії про можливість такого зв'язку. Але в цілому, не заперечуючи важливої ролі процесів поклітинного відновлення в житті всіх організмів, можна з усією впевненістю стверджувати, що прямої кореляції між здатністю клітин меристем до репарації і радіостійкістю рослин не існує.

Розгляд часових характеристик кінетики відновлення меристем у післярадіаційний період і відновлення постійно оновлюваних тканин ссавців свідчить про те, що для нормалізації здатності критичних тканин до виконання своїх функцій необхідні, як мінімум, декілька клітинних циклів, тобто декілька діб, а не кілька годин, достатніх для поклітинного відновлення. І післярадіаційне відновлення будь-якої багатоклітинної системи є не стільки функцією репарації окремих її клітин, скільки розмноженням клітин, які зберегли здатність до поділу - репопуляції.

Репопуляційне відновлення. Джерелом репопуляційного відновлення є клітини, які зберегли репродуктивну здатність після опромінення. З одного боку, це клітини, що в момент дії радіації перебували в радіостійких періодах клітинного циклу, а з іншого боку - клітини, що знаходилися в стані спокою - "поза циклом".

Розмноження клітин, які перебувають в радіостійких фазах клітинного циклу. Радіостійкість клітин меристем в залежності від фази і періоду клітинного циклу може розрізнятися в 2-3 рази. Тому завдяки асинхронності поділу, що є нічим іншим, як механізмом підтримки стійкості твірних тканин до ушкоджуючих факторів, в меристемах рослин в будь-який момент часу присутні клітини на різних фазах клітинного циклу. І популяція клітин меристеми після опромінення являє собою досить строкату картину, так як в ній в залежності від радіочутливості окремих клітин будуть присутні три основних їх пули (рис. 18): клітини, що були пошкоджені і втратили здатність до поділу (які перебували в момент опромінення в найрадіочутливіших періодах циклу); клітини практично не пошкоджені (що знаходились в найрадіостійкіших періодах), і клітини, що несуть

потенціально летальні пошкодження, які в залежності від умов і ситуації можуть перейти як в клас 1, так і в клас 2 (які перебували в проміжних за радіочутливістю періодах клітинного циклу).

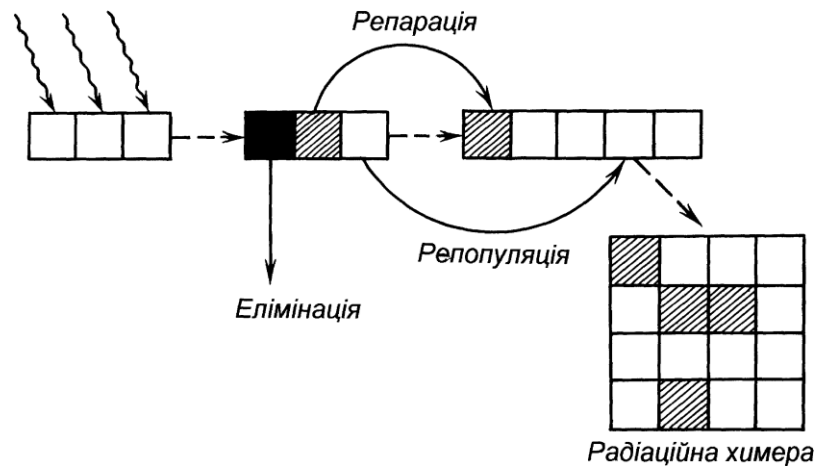


Рис. 18. Схема репопуляційного відновлення опроміненого організму (Д.М. Гродзинський, 1972).

Клітини, які зберегли здатність до поділу, продовжують розмножуватися. Більше того, „відчувши” нестачу клітин в меристемі при елімінації тих, що втратили здатність до поділу, вони діляться з більшою швидкістю, ніж в нормі. Було показано, що тривалість клітинного циклу клітин меристеми кореня, котрі зберегли здатність до поділу, в такій ситуації скорочувалась з 17 до 13 годин. І через декілька днів, тобто після кількох клітинних циклів, спостерігається її відновлення.

Розмноження клітин, які знаходяться поза циклом поділу. Резервом репопуляції такого відновлення рослин є клітини меристем в стані спокою - клітини, що перебувають поза циклом поділу. У таких клітин є дві принципові можливості по відношенню до своєї подальшої долі: з припиненням дії чинника, який примусив їх вийти зі стану спокою або після відновлення пошкодження, якщо зупинка була його наслідком, знову повернутися на шлях поділу, або під впливом відповідного стимулу перейти до диференціації. Яким саме з цих шляхів піде клітина, багато в чому визначається міжклітинними взаємодіями, які складаються в популяції.

Перебуваючи в стані спокою, клітини меристеми мають більш високу стійкість до γ -випромінювання, ніж клітини, що діляться. І при дії на рослини іонізуючих випромінень в дозах, що ведуть до втрати репродуктивної здатності у всіх або в певної кількості клітин, що діляться, до процесів репопуляційного відновлення підключаються клітини, які перебувають поза циклом поділу. Саме тому перехід клітин в стан спокою варто розглядати як спосіб створення клітинних резервів тканини, які є фондом її репопуляційного відновлення.

Можливість репопуляційного відновлення і його темпи залежать від розміру пулу клітин, що зберегли здатність до поділу. Із збільшенням дози опромінення його об'єм зменшується і імовірність відновлення цим шляхом знижується. Теоретично репопуляційне відновлення можливе при наявності в популяції навіть однієї клітини, яка зберегла здатність до поділу. І дійсно, в дослідях з ссавцями було показано, що ті крипти кишкового епітелію, в яких при опроміненні вижила хоча б одна клітина, можуть повністю відновлюватися за рахунок її поділу і розмноження.

Отже, розмноження клітин, які зберегли здатність до поділу після опромінення, становить суть репопуляційного відновлення. Звичайно, серед здорових клітин можуть зустрічатися групи клітин, утворені від частково пошкоджених, але таких, що зберегли здатність до поділу, клітин, а також репарованих, які можуть мати ознаки радіаційного ураження. За термінологією Д.М. Гродзинського, організм, що сформувався після опромінення, являє собою радіаційну химеру.

Слід відзначити, що найефективніший на теперішній час прийом лікування променевої хвороби людини, який полягає у трансплантації кісткового мозку здорового індивідууму хворому, являє собою ні що інше, як репопуляційне відновлення кровотворної тканини за рахунок розмноження непошкоджених радіацією клітин донора. Цей прийом застосовується саме тоді, коли при високих дозах опромінення втрачають повністю здатність до поділу стовбурові кровотворні клітини кісткового мозку - найрадіочутливішої тканини хребетних.

Регенераційне відновлення. Якщо перші два шляхи післярадіаційного відновлення - репарація і репопуляція властиві всім багатоклітинним організмам, як рослинам, так і тваринам, то регенераційне відновлення - переважно лише рослинам. Так, поряд з такою надійною формою захисту виду, як існування надзвичайно стійкої фази їх онтогенезу – насіння, рослини мають потужну систему регенерації - здатність до відновлення втрачених органів і навіть всієї рослини за рахунок спеціальних тканин і органів, клітини яких, аналогічно клітинам насіння, знаходяться у стані спокою і мають високу стійкість до всіх уражуючих чинників.

В різних частинах рослини є тканини і органи, які протягом певного періоду онтогенезу, а часом і всього її життя, знаходяться в стані спокою. Клітини таких тканин заблоковані в G_0 -фазі. Але їх проліферацію можна індукувати, подавивши поділ клітин в тканинах і органах, що активно ростуть. І тут саме і приходить зійти з дуже цікавими явищами біології рослин - регенерацією і регенераційним відновленням. Тут будуть розглянуті два основні типи регенерації у вищих рослин - регенерація тканин, які перебувають в стані спокою, і регенерація органів, які перебувають в стані спокою.

Регенерація тканин, які перебувають в стані спокою. На самому кінчику кореня, на межі з кореневим чохлаком знаходиться особлива група клітин, яка має форму півсфери або двояко випуклої лінзи. Клітини цього

утворення, яких, як правило, нараховується не більше 1-2 тисяч, діляться дуже рідко - раз на 200-500 годин, в той час як тривалість клітинного циклу переважної кількості оточуючих їх проліферуючих клітин меристеми складає лише 12-24 години. Англійський ботанік і фізіолог рослин Ф. Клаус, який відкрив і перший почав дослідження цієї ділянки кореня у 1954 р., назвав його центром спокою.

Функції центру спокою до кінця не з'ясовані. Але дослідники вважають його основою меристеми, з якої походять всі типи клітин кореня. Припускається, що він є місцем синтезу деяких фізіологічно активних речовин і, зокрема, цитокінінів. Крім того, вважається, що клітини центру спокою є надзвичайним клітинним резервом меристеми. При пошкодженні меристеми і втраті здатності до поділу всіх її клітин клітини центру спокою починають ділитися і протягом декількох циклів можуть відновити початковий клітинний об'єм.

Існує певний критичний рівень пошкодження меристеми, при якому індукується поділ клітин центру спокою. Тільки при втраті здатності до поділу у певної кількості клітин до процесів репопуляційного відновлення можуть підключатися клітини центру спокою. Очевидно, це є результатом міжклітинних взаємодій, що існують між субпопуляціями клітин, які діляться і які перебувають в стані спокою. Можливо, ці взаємодії мають гормональну природу, швидше за все цитокінінову, і визначаються кількістю клітин, які знаходяться в різних станах.

Після повного відновлення меристеми, коли кількість клітин, що діляться, досягає в ній рівня норми, виникає новий центр спокою.

Регенерація органів, які перебувають в стані спокою. Верхівкова меристема пагона вищих рослин, яка активно росте, в значній мірі, а іноді і повністю, придушує поділ клітин в меристемах бокових бруньок. Це явище отримало назву апікального домінування. Видалення верхівки приводить до зняття апікального домінування і посилення проліферативної активності тканин, які перебувають в стані спокою, пробудженню бокових бруньок і навіть процесів дедиференціації деяких тканин. Всі ці явища належать до регенераційних.

Апікальне домінування в основному визначається гормональним типом впливу на точки росту. Це підтверджується чисельними дослідженнями, в яких за допомогою таких рістактивуючих речовин, як кінетин і гетероауксин, вдавалося знімати апікальне домінування або, навпаки, відновлювати його при видаленій верхівковій меристемі.

Опромінення рослин іонізуючою радіацією веде до більшого пошкодження верхівкових меристем, клітини яких активно діляться і ростуть. І якщо у рослини існують органи, які перебувають в стані спокою і мають підвищену радіостійкість, то загибель цих меристем повинна викликати їх регенерацію. Описані в радіобіологічній літературі факти, які свідчать про сильне гілкування опромінених рослин, активацію утворення

бокових коренів, про підвищення кущування та інше, пояснюється саме зняттям апікального домінування і посиленням регенераційних процесів.

У рослин є багато різноманітних центрів, відповідальних за процеси регенерації. Так, корені можуть виникати із клітин періциклу, епідермальних клітин, калуса, клітин кори. Часті випадки регенерації клітин листків, які мають ділянки перебуваючих в стані спокою меристем в субепідермальних шарах клітин листка, який формується, або ділянок меристем, які зберігаються в пластинці дорослого листка вздовж жилок, епідермальних клітин і паренхімних тканин в черешковій листка або стебла. Навіть клітини мезофілу можуть бути місцем закладання твірних тканин.

Таким чином, в основі регенерації різних частин рослин лежить активація проліферації тканин і органів, які перебувають в стані спокою і до певного моменту знаходяться в неактивному стані. Регенерація починається тоді, коли клітини цих тканин у відповідь на гальмування і припинення проліферації в активній (звичайно апікальній) зоні вступають у фазу поділу.

Найбільш часто апікальне домінування проявляється у рослин з моноподіальним і симподіальним типами гілкування, які властиві практично для всіх видів сільськогосподарських рослин. Найкраще воно вивчене у бобових, які мають чітке апікальне домінування як в пагонах, так і коренях. Бокові бруньки у бобових розміщені в пазухах листків і тому називаються пазушними. За нормальних умов росту і розвитку вони знаходяться в стані спокою протягом всього онтогенезу. Але при знятті апікального домінування, наприклад, шляхом механічного видалення верхівкової бруньки (декапітація), одна (іноді дві) бокова брунька вступає в ріст і розвивається в пагін, який повністю повторює організацію головного пагона і формує в подальшому всю рослину.

Аналогічна ситуація виникає при опроміненні рослин, як і при пошкодженні апікальної бруньки хімічними агентами, її усиханні, відмерзанні і дії інших чинників. Існує мінімальне порогове значення дози опромінення, при якій апікальне домінування повністю знімається. Воно залежить від видової і індивідуальної радіочутливості рослини і визначається тим рівнем дози, який веде до припинення поділу у певної критичної кількості клітин і інгібування синтезу фітогормонів, що пригнічують ріст пазушних бруньок. Саме тоді клітини меристем пазушних бруньок приступають до проліферації.

Хід появи пагонів з пазушних бруньок при опроміненні суттєво не відрізняється від того, який спостерігається при знятті апікального домінування іншими способами. Але якщо при мінімальних значеннях доз нові пагони практично не несуть якихось ознак радіаційного ураження, то при близьких до максимальних вони відростають більш повільно, а листя набуває характерних морфологічних змін: скручується, зморщується, змінює форму, колір.

Регенераційне відновлення дійсно слід віднести до найпотужнішої системи відновлення вищих рослин, котрі не мають можливості захищатися

від пошкоджень за допомогою інших засобів. В його основі лежать неспецифічні пристосувальні реакції, які розширюють межі зміни умов життя рослин, і механізм регенераційного відновлення ефективний при дії будь-якого пошкоджуючого агента.

Компенсаторне відновлення. Цей тип післярадіаційного відновлення є найменш вивченим в радіобіології, хоча компенсаторне посилення окремих функцій у опромінених іонізуючими випромінюваннями організмів, в тому числі і рослин, доводиться спостерігати нерідко. Серед них можна виділити два основних типи компенсаторних реакцій. Перший з них зв'язаний з виконанням непошкодженими внаслідок опромінення клітинами, тканинами, органами не властивих їм функцій. Другий - з посиленням функцій, коли непошкоджені клітини, тканини, органи посилюють власне навантаження з метою надолуження функцій інших, які втратили їх внаслідок опромінення.

Дедиференціація спеціалізованих клітин і тканин. У перебігу розвитку організму в ньому відбувається формування спеціалізованих клітин, тканин і органів за рахунок виникнення протягом морфогенезу відмінностей між однорідними клітинами і тканинами - процес диференціації. Так, меристематична клітина після здійснення декількох (п'яти-семи) поділів переходить до розтягнення, в процесі якого змінюється її форма і збільшуються розміри, потім до диференціації, при якій зовнішньо однакові клітини набувають різних властивостей та формують різні типи тканин, і далі до спеціалізації, яка характеризується різними рівнями метаболічної активності і ступенем структурної організації тканин і органів.

Молекулярно-генетичною основою диференціації є активність специфічних для кожної тканини генів. І хоча всі соматичні клітини рослини чи будь-якого організму мають однаковий набір генів, в кожній тканині активна лише частина їх, відповідальна за даний етап розвитку. Роль факторів диференціації зводиться до вибіркової активації одних і пригнічування других генів. Багато з цих факторів не вивчені. Але відомо, що хід диференціації залежить від фітогормонів, зокрема ауксинів і цитокінінів. Найбільш поширена думка, що диференціація контролюється співвідношенням між окремими фітогормонами і іншими фізіолого-активними речовинами.

Звичайно, диференціація необоротна. Але в умовах пошкодження тканин, при злоякісному рості і деяких інших ситуаціях, що ведуть до зміни балансу фізіолого-активних речовин, природний хід руху клітин по життєвому циклу порушується, і вони можуть набути здатності до диференціації в зворотному напрямі, тобто дедиференціації. Саме такі умови можуть скластися при опроміненні рослин, коли, як згадувалося, змінюється баланс фітогормонів, і клітини меристеми втрачають здатність до поділу. При цьому дедиференційовані клітини починають ділитися і стають джерелом відновлення меристеми або виникнення нових твірних тканин. На інтактних - цілісних рослинах це явище ще не одержало чітких експериментальних доказів, хоча вже є непрямі дані, що свідчать про

можливість переходу до поділу клітин зони розтягнення кінчика кореня при репродуктивній загибелі клітин меристеми. Але вона показана для клітин і тканин в культурі. В цих умовах вдається за допомогою іонізуючих випромінень індукувати здатність до поділу у різних типів диференційованих тканин: паренхіми, склеренхіми, флоєми, епідермісу, мезофілу та інших. Саме на здатності клітин диференційованих тканин до поділу і знову до диференціації оснований спосіб одержання рослин із культури клітин і тканин, клонового розмноження рослин та інші, які лежать в основі найновіших біотехнологій вирощування клітинної біомаси і одержання унікального матеріалу для селекції.

Дедиференціація – один з найяскравіших прикладів компенсаторного відновлення, коли після опромінення клітини набувають не властивих їм функцій.

До компенсаторного шляху післярадіаційного відновлення слід віднести нерідко констатоване після опроміненні *посилення функцій* клітин, тканин і органів, які залишились непошкодженими. Так, при опроміненні кущових форм злаків на тлі зменшенні числа стебел доводиться спостерігати, що ті, які вижили, як правило, бувають більш рослими і міцнішими, ніж окремі стебла в неопроміненому контролі. При пошкодженні генеративних органів і зменшенні кількості зав'язі на рослині сформовані колоски, стручки, плоди виявляються більш продуктивними, ніж в контролі. При зменшенні кількості зерен в колосі, суцвітті, коробочці ті, що залишились, за абсолютною масою перевищують контрольні.

Ці факти можна пояснити з позицій зміни характеру перерозподілу поживних речовин, що надходять з кореневої системи - те, що призначалося для семи, дістається одному. В цьому відношенні не менш ілюстративними, але однозначно трактованими з позицій компенсаторного посилення функцій, є дані, одержані на рівні клітин, окремих тканин. Зокрема, вище згадувалось, що при γ -опроміненні рослин в дозах, при яких кількість клітин в меристемах зменшується в 2-3 рази, різко зростає швидкість їх поділу. Виявляється, що клітини, які залишаються непошкодженими або відновлюють здатність до поділу, намагаючись поновити початковий клітинний об'єм меристеми, починають активно розмножуватися (репопуляційне відновлення). В цей період після короточасного гальмування швидкість поділу клітин суттєво зростала - майже на чверть скорочувалась тривалість їх клітинного циклу. Потім, по мірі досягнення меристемою норми, вона поступово збільшувалась і досягала початкового рівня.

Таке, навіть короточасне, але досить суттєве посилення швидкості поділу клітин є характерним прикладом прояву компенсаторних явищ на рівні клітинної популяції.

Свідченням компенсаторного типу відновлення може бути тимчасове посилення синтезу нуклеїнових кислот, білків, фітогормонів, ферментів, макроергічних та інших біологічно активних сполук організму після

опромінення у пошкоджуючих дозах. Саме наслідком всіх цих процесів і є посилення поділу клітин, яке можна вважати їх інтегральним показником.

В цілому, розуміючи під терміном "відновлення" сукупність процесів, що забезпечують збереження рослини від пошкодження або загибелі при дії іонізуючої радіації як організму, якому притаманне виконання певних функцій, варто уважно вивчати особливості прояву різних його реакцій, спрямованих на відновлення саме втрачених функцій. Управляючи цими процесами, можна сприяти більш або менш значному відновленню опромінених рослин у післярадіаційний період.

Управління процесами післярадіаційного відновлення. До 60-х рр. була поширена думка, що наслідки радіаційного ураження не піддаються модифікації у післярадіаційний період. І хоча часто описувались зміни реакцій опромінених рослин і тварин протягом часу, їх залежність від різних факторів, це пояснювали звичайно дією на організм умов навколишнього середовища, які не мають безпосереднього відношення до процесів формування радіобіологічних ефектів.

Так, було встановлено, що післярадіаційне прогрівання насіння, спор, вегетуючих рослин або вирощування опромінених рослин при підвищених температурах веде до зниження ступеня радіаційного ураження. Зберігання опроміненого насіння при температурах, нижчих за оптимальні, також зменшує його. Пошкодження насіння зменшується із збільшенням його вологості у післярадіаційний період. Зниження вмісту в атмосфері кисню також сприяє зменшенню ступеня пошкодження. Зміна інтенсивності освітлення, спектрального складу світла, дія магнітних і електричних полів не тільки до, під час, але й після опромінення також може змінювати ступінь прояву реакції рослин на опромінення.

Є не мало даних і про те, до багато хімічних речовин - ті ж сульфгідрильні сполуки та інші відновники, солі різних металів і елементи живлення, гормони, ферменти, макроергічні сполуки та інші фізіологічно-активні речовини, інгібітори окремих процесів метаболізму здатні суттєво впливати на хід розвитку радіаційного пошкодження при введенні їх в поживне середовище у післярадіаційний період.

Механізми дії більшості модифікаторів радіаційного ураження як фізичної, так і хімічної природи пов'язують з їх впливом не на віддалені етапи розвитку радіаційного ураження, а саме на первинні. Так, дія підвищених температур, вологості, газового складу, хімічних відновників пояснюється збільшенням швидкості рекомбінації вільних радикалів - фактором пошкодження, що реалізується в близькому післярадіаційному періоді. З відновлювальними ефектами на рівні репарації молекул ДНК і хромосом часто зв'язується дія низьких температур, ультрафіолетової радіації, високочастотного опромінення та деяких інших чинників. З інгібуванням метаболізму і блокуванням поділу клітин, які створюють сприятливі умови для репараційних процесів, нерідко пояснюється дія ряду факторів, здатних індукувати зупинку клітинного циклу.

Дія деяких чинників хімічної природи, які застосовують перед опроміненням, може тривати і після нього, впливаючи на відновлювальні процеси. Так, безпосередньою участю в процесах післярадіаційного відновлення пояснюється протирадіаційна дія препаратів ДНК, окремих нуклеотидів, ферментів, гормонів та інших.

З інгібуванням процесів репараційного відновлення пов'язана радіосенсибілізуюча дія ряду хімічних речовин. Таку властивість, зокрема, мають специфічні інгібітори репарації ДНК кофеїн, акрифлавін, аміноптерін.

Ефективність репопуляційного та регенераційного відновлення визначається, головним чином, темпами розмноження клітин, які зберегли здатність до поділу після опромінення. Тому, діючи на швидкість їх поділу, можна управляти цими шляхами післярадіаційного відновлення. Так, створюючи оптимальні умови для вирощування рослин за допомогою регулювання температурного і газового режиму, освітленості, забезпечення елементами мінерального живлення можна сприяти ходу цих процесів. Додавання в поживне середовище фітогормонів-активаторів росту, і в першу чергу цитокінінів або некоренева обробка ними рослин прискорюють поділ клітин, зумовлюючи підвищення темпів репопуляційного та регенераційного відновлення.

Таким чином, можливі різні шляхи післярадіаційного відновлення організму і різні способи управління ними.

При аварійних ситуаціях на підприємствах ядерного паливного циклу і деяких інших гострому зовнішньому опроміненню і тривалому радіонуклідному забрудненню можуть бути піддані живі організми на досить значних територіях, що приводить до суттєвого радіаційного ураження біоценозу. Заходи, спрямовані на прискорення його післярадіаційного відновлення, повинні носити комплексний характер і по відношенню до рослинного компоненту визначатися двома основними прийомами:

- створенням для опромінених рослин в післярадіаційний період оптимальних умов для росту і розвитку;
- застосування фізіологічно-активних сполук, які прискорюють хід всіх типів післярадіаційного відновлення і головним чином розмноження клітин, проліферацію тканин і органів, що зберегли ці функції.

Це може значно знизити наслідки радіаційного ураження рослин фітоценозів, в тому числі і лісових угруповань, в умовах господарювання на забруднених радіоактивними речовинами територіях.

Тема 6. Радіоекологія

Радіоекологія - це розділ радіобіології, що вивчає концентрації та міграцію радіоактивних речовин в біосфері та вплив їх іонізуючого випромінювання на живі організми та їх угруповання. Сільськогосподарська радіоекологія – аналогічно в об'єктах сільськогосподарського виробництва і вплив їх на сільськогосподарські рослини і тварин.

Особливо важливим є розв'язання наступних проблем у галузі радіоекології: міграція радіонуклідів у харчових ланцюжках організмів і насамперед у ланцюжку ґрунт - сільськогосподарські рослини - сільськогосподарські тварини - людина; припинення чи послаблення екологічних зв'язків на будь-якій ділянці цього шляху як наслідок дезактивації сільськогосподарських угідь, водойм, забруднених радіонуклідами, або створення спеціальних засобів запобігання та зниження надходження їх у тваринні і людські організми; виявлення територій суші й акваторій, забруднених радіоактивними речовинами.

Головні завдання сільськогосподарської радіоекології - вивчення міграції радіоактивних речовин в об'єктах навколишнього середовища і сільськогосподарського виробництва, шляхів, якими радіоактивні речовини потрапляють в організми сільськогосподарських рослин і тварин і нагромаджуються в них; дії іонізуючого випромінювання інкорпорованих (що потрапили в організм) радіоактивних речовин на сільськогосподарські рослини і тварин; розробка заходів щодо запобігання надходженню та нагромадженню радіоактивних речовин у продукції сільськогосподарського виробництва.

6.1. Джерела радіоактивного забруднення об'єктів навколишнього середовища

На живі організми в навколишньому середовищі можуть водночас діяти кілька джерел іонізуючого випромінювання, серед яких основними є: 1) природне випромінювання, 2) випромінювання внаслідок використання штучних радіонуклідів, 3) випромінювання від джерел, що застосовуються в медицині і побуті, і 4) професійне опромінювання. Перші дві групи джерел стосуються опромінювання всього живого, в тому числі і об'єктів сільськогосподарського виробництва, дві останні - лише людини.

6.1.1. Природні джерела

Природне випромінювання є складовою частиною біосфери, екологічним фактором, який впливає на всі живі організми і створює таким чином *природний радіаційний фон*. Воно утворюється за рахунок трьох джерел: 1) космічного випромінювання, 2) випромінювання зовнішніх земних джерел і 3) випромінювання внутрішніх джерел.

У *космічному випромінненні* виділяють *галактичне випромінювання*, яке являє собою потік частинок високої енергії, переважно протонів - первинне випромінювання, а також створене ними в атмосфері Землі внаслідок взаємодії з атомними ядрами її компонентів - вторинне випромінювання, в якому зустрічаються нейтрони, протони, електрони, мезони, мюони та ін. Більшість частинок первинного космічного випромінювання має енергію понад 10^9 eV (1 GeV), а енергія окремих з них досягає 10^{20} - 10^{21} eV і більше. Для порівняння, енергія рентгенівського випромінювання становить $0,12 \cdot 10^3$ eV.

Сонячне космічне випромінення, яке порівняно з галактичним має низьку енергію (близько $4 \cdot 10^{10}$ еВ), не спричинює помітного збільшення дози випромінення на поверхні Землі, значною мірою затримуючись і розсіюючись в атмосфері. Внаслідок цього, звичайно, інтенсивність космічного випромінення залежить від географічного розташування об'єкта і збільшується відповідно до висоти морського рівня.

В результаті взаємодії космічного випромінення з ядрами атомів кисню, азоту, аргону атмосфери утворюються космогенні радіонукліди, що потім надходять на земну поверхню з атмосферними опадами. Ця група представлена радіонуклідами з періодами напіврозпаду від 32 хвилин до $7,4 \cdot 10^5$ років (таблиця 27).

27. Характеристика радіонуклідів, індукованих космічним випроміненням

Радіонуклід	Швидкість утворення, ат/см ² ·с	Період піврозпаду	Енергія випромінень, Ев, кеВ
³ H	0.20	124 року	18.6
⁷ Be	$8.1 \cdot 10^{-2}$	53 дні	3.3
¹⁰ Be	$4.5 \cdot 10^{-2}$	$2.5 \cdot 10^5$ років	555
¹⁴ C	2.5	5730 років	156
²² Na	$8.6 \cdot 10^{-5}$	2.6 року	545 (β ⁺)
²⁴ Na	$3.0 \cdot 10^{-5}$	15 год	1389
²⁸ Mg	$1.7 \cdot 10^{-4}$	21.2 год	460
²⁶ Al	$1.7 \cdot 10^{-4}$	$7.4 \cdot 10^5$ років	1170 (β ⁺)
³¹ Si	$4.4 \cdot 10^{-4}$	2.6 год	1480
³² Si	$1.6 \cdot 10^{-4}$	700 років	210
³² P	$8.1 \cdot 10^{-4}$	14.3 дні	1710
³³ P	$6.8 \cdot 10^{-4}$	25 днів	248
³⁵ S	$1.4 \cdot 10^{-3}$	87 днів	167
³⁸ S	$4.9 \cdot 10^{-5}$	2.87 год	3000
³⁴ Cl	$2.0 \cdot 10^{-4}$	32 хвилини	2480 (β ⁺)
³⁶ Cl	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$3.1 \cdot 10^5$ років	714
³⁸ Cl	$2.0 \cdot 10^{-3}$	37.3 хвилини	4910
³⁹ Cl	$1.4 \cdot 10^{-3}$	55.5 хвилини	3450
³⁹ Ar	$5.6 \cdot 10^{-3}$	270 років	565

Найбільш значущі в радіоекологічному відношенні радіонукліди - ³H, ⁷Be, ¹⁴C, ²²Na і ²⁴Na.

Випромінення зовнішніх земних джерел визначається радіоактивністю земної кори, води й атмосфери за рахунок природних радіоактивних елементів, передусім таких, як ²³⁸U, ²³⁵U, ²³²Th, ²²²Rn і ²²⁰Rn, ²¹⁰Po, ⁴⁰K, ⁴⁸Ca, ⁸⁷Rb, ¹⁴C, ³H, ⁷Be та інші.

Вміст природних радіонуклідів у різних місцях Землі варіює в широкому діапазоні. Відповідно значно змінюється і природний радіаційний фон. Осадкові породи, як правило, мають невисоку радіоактивність. Вивержені породи (граніт, базальт) містять велику кількість радіоактивних елементів. Дуже багаті на торій і радій так звані монацитові піски, основою яких є мінерал монацит - фосфат рідкоземельних елементів переважно групи

церію. Відомі також високорадіоактивні водні джерела. В регіонах, де вони є, радіаційний фон може набагато перевищувати природний. Якщо, наприклад, потужність дози природного фону в різних частинах нашої планети варіює у межах 1,5-15 мкР/год, то у деяких регіонах Франції, Швеції, США – 30-50 мкР/год, а в Індії, Бразилії, Ірані є провінції, де потужність дози природного радіаційного фону досягає сотень мікрорентген на годину.

Внутрішніми джерелами випромінення є радіонукліди, що потрапляють у рослини, а також в організми тварин та людей разом з повітрям, водою, їжею. Найбільше внутрішнє опромінення спричиняють ^{222}Rn і ^{220}Rn , ^{40}K , ^{14}C , ^{87}Rb , ^{226}Ra , ^{210}Po .

Отже, живі організми постійно відчувають вплив іонізуючого випромінення з трьох зазначених вище джерел, які становлять природний радіаційний фон. Він є одним з головних факторів природного мутагенезу, який відіграє важливу роль у процесі еволюції живих організмів. Це радіаційне середовище є також однією з причин виникнення злоякісних новоутворень і спадкових захворювань.

Починаючи з минулого століття природний радіаційний фон поступово зростає. Це є наслідком діяльності людини й індустріалізації господарства, які спричинили видобуток з надр Землі та надходження у навколишнє середовище великої кількості радіонуклідів разом з такими корисними копалинами, як кам'яне вугілля, нафта, газ, металеві руди, солі, що становлять основу мінеральних добрив.

6.1.2. Джерела штучних радіонуклідів

Штучні радіонукліди утворюються в процесі ядерних реакцій, які відбуваються під впливом опромінення (бомбардування) звичайних елементів або їх природних ізотопів частинками високих енергій (від кількох мільйонів до десятків мільярдів електрон-вольт). Досі одержано 1880 радіоактивних ізотопів більш як 80 хімічних елементів.

Велика кількість радіоактивних речовин утворюється під час вибуху атомної бомби, основою якого є саморозвиваюча ланцюгова реакція поділу ^{235}U або ^{239}Pu . Після вибуху в атмосфері атомної бомби середньої потужності (10-15 Мт) близько половини утворених радіоактивних продуктів випадає в районі вибуху на земну і водну поверхню в радіусі 100 км, а інші потрапляють в тропосферу й стратосферу. З тропосфери частинки протягом місяця випадають на Землю в зоні, що визначається вже радіусом 250-450 км від місця вибуху (залежно від сили і напрямів вітру). Радіонукліди, які потрапляють в стратосферу, поширюються навколо всієї земної кулі і випадають на поверхню Землі значно пізніше, хоч початок випадання їх можна виявити через 2-3 тижні, а повне випадання відбувається протягом 1,5-2 років. За цей час короткоживучі радіонукліди розпадаються, і в опадах переважають довгоживучі радіонукліди ^{90}Sr (стронцій) та ^{137}Cs (цезій) з періодами піврозпаду відповідно 29 і 30 років.

Після підписання в 1963 р. Московського договору про заборону ядерних випробувань у трьох середовищах - атмосфері, космосі й воді - навколишня біосфера стала швидко звільнятися від радіоактивних речовин.

Певну частку у забруднення навколишнього середовища вносять підприємства атомної енергетики, робота яких пов'язана з видобутком уранової руди, її переробкою на збагачене ядерне паливо, виробництвом твелів, переробкою відпрацьованого палива для наступного використання, переробкою і захороненням радіоактивних відходів. Перелічені виробничі операції становлять ядерний паливний цикл (ЯПЦ).

На всіх етапах ЯПЦ можливе потрапляння радіонуклідів у навколишнє середовище. Інтенсивність впливу радіаційного фактора на об'єкти природного середовища в різних його частинах неоднакова. Навіть на перших етапах цього циклу (видобуток і переробка уранової сировини й виготовлення твелів), коли не відбуваються ядерні реакції поділу й нейтронної активації і не утворюються штучні (техногенні) радіонукліди, в навколишнє середовище викидаються важкі природні радіонукліди і «нормальна» інтенсивність їх кругообігу змінюється. На наступних етапах ЯПЦ - (під час роботи АЕС, переробки відпрацьованого палива, коли утворюється велика кількість штучних радіонуклідів, а також під час захоронення радіоактивних відходів) інтенсивність впливу радіаційного фактора на навколишнє середовище може зростати.

Атомна енергетика, враховуючи небезпеку ядерного випромінення, будується за принципом замкнутого циклу, завдяки чому в навколишнє середовище потрапляє лише незначна кількість важких для вловлювання радіоактивних речовин. Так, під час видобутку уранової руди і вилучення урану 99% породи потрапляє у відвали, спричиняючи лише локальне забруднення середовища ураном, радієм, радоном та деякими іншими радіонуклідами. Під час роботи реакторів у навколишнє середовище можуть потрапити газоподібні летючі радіонукліди ^{14}C , ^3H , ^{85}Kr та ^{129}I . Однак практично їх можна вловлювати за допомогою спеціальних фільтруючих систем. Радіоактивні відходи зберігаються в ізольованих місцях. В результаті проведення цих заходів в нормальних безаварійних умовах роботи частка викидів підприємствами атомної енергетики у природному радіаційному фоні незначна - не перевищує кількох відсотків.

Ядерні реактори АЕС, що працюють у багатьох країнах світу, є джерелом незначного забруднення навколишнього середовища радіоактивними відходами навіть безпосередньо біля них.

Слід зазначити, що мешкання поблизу вугільної ТЕС, якщо врахувати викиди в атмосферу не лише радіоактивних, а й хімічних речовин, набагато шкідливіше для здоров'я людини, ніж мешкання поблизу АЕС такої самої потужності. І хоч доза опромінення внаслідок викиду з АЕС зростає щороку внаслідок збільшення їх кількості й потужності, частка випромінення за їх рахунок у загальному радіаційному фоні залишається, як і раніше, незначною

(за даними Міжнародного агентства з атомної енергії, вона не перевищує 4%).

Радіоекологічні проблеми загострюються в умовах порушення технологічних процесів на підприємствах ЯПЦ, що супроводжується аваріями з викидом радіоактивних речовин в навколишнє середовище. Внаслідок цього радіоактивне забруднення може потрапити в природні екосистеми, на сільськогосподарські угіддя і призвести до важких радіоекологічних і соціально-економічних порушень.

Найбільш тяжкими вважаються аварії на сховищі радіоактивних відходів на Південному Уралі та на Чорнобильській АЕС. Під час цих аварій були забруднені великі території внаслідок того, що в обох випадках викид радіонуклідів відбувався на значну висоту (до 1 км на Південному Уралі й до 7 км у Чорнобилі). Радіоекологічна обстановка в районі аварії на Південному Уралі зумовлена забрудненням території довгоживучим радіонуклідом ^{90}Sr , внаслідок чого сільськогосподарські угіддя на площі понад 100 тис. га на довгі роки були вилучені із землекористування.

Територія, у десятки разів більша, ніж на Південному Уралі, була забруднена довгоживучими радіонуклідами ^{90}Sr , ^{137}Cs та ^{239}Pu і ^{240}Am внаслідок найбільшої за всю історію розвитку атомної енергетики аварії на Чорнобильській АЕС.

6.2. Міграція радіонуклідів у навколишньому середовищі

Радіоактивні речовини, які потрапляють в атмосферу, поступово випадають на поверхню Землі. Залежно від характеру викиду продуктів поділу, породних умов, ґрунтового покриття, хімічних та фізичних властивостей радіонуклідів їх кількість у сільськогосподарських об'єктах може коливатися в дуже широкому діапазоні.

Важливу роль у поширенні радіоактивних речовин відіграють атмосферні опади і рух повітря. В зв'язку з цим розрізняють «вологе» (надходження речовин на поверхню Землі з дощем і снігом) і «сухе» (осідання частинок лише під впливом сили тяжіння) випадання радіоактивних речовин.

Атмосферні опади можуть у десятки разів прискорювати випадання радіоактивних речовин. Дуже впливає на їх поширення рух повітря. Вітром радіоактивні речовини швидко поширюються на тисячі кілометрів від місця викиду й іноді випадають у несподіваних місцях.

Радіоактивні речовини, що випали на поверхню земної кулі, стають складовою частиною біологічних циклів природного кругообігу речовин, потрапляючи через харчові ланцюжки в людський організм. Вони концентруються на трьох головних об'єктах: ґрунті, рослинах і у водоймах. З поверхні ґрунту радіоактивні речовини, розчиняючись в атмосферних опадах чи поливних водах або механічно з током води, потрапляють у підземні води. Швидкість їх вертикальної міграції (углиб ґрунту) залежить від багатьох факторів і насамперед від кількості атмосферних опадів, фізико-механічних

та фізико-хімічних властивостей ґрунту, розчинності радіоактивних речовин. Так, у зоні аварії на Чорнобильській АЕС на неораних дерново-підзолистих піщаних ґрунтах легкого механічного складу на кінець 1992 р. 90% кількості усієї радіоактивності припадало лише на 10-см шар ґрунту. На ґрунтах більш важкого механічного складу з багатим вбирним комплексом вертикальна міграція радіонуклідів відбувається ще повільніше.

Радіоактивні опади у вигляді аерозолів з об'ємною масою, як правило, більше одиниці, потрапляючи на поверхню водойм, швидко опускаються на дно, концентруючись у мулових відкладеннях, де їх може нагромаджуватись 95-98% від загальної кількості радіоактивних опадів на водяне дзеркало. Проте частина їх з часом розчиняється у воді, забруднюючи її.

Радіоактивні речовини, що потрапили на рослини, можуть адсорбуватись їх поверхнею шляхом дифузії або проникати всередину рослин через продихи, залучаються в шляхи руху речовин і нагромаджуються в органах, які мають господарське і харчове значення. Найактивніше радіоактивні речовини поглинаються листям (листова поглинання), суцвіттями (флоральне поглинання) та поверхневим корінням (поглинання з дернини).

Для багатьох видів важливим є також флоральне поглинання. Обсяг його залежить від розміру квітки, її форми, місця розміщення (в суцвітті, на рослині). Як правило, великі квітки розоцвітих, суцвіття хлібних злаків, розміщені на відкритих частинах рослин, вбирають більше радіоактивних речовин, ніж рослини, що мають невеликі квітки, розміщені поодинокі. При флоральному поглинанні можливе механічне захоплення радіоактивних частинок елементами квітки і послідовне проникнення їх у плід. Поглинання за допомогою поверхневого коріння властиве тільки для рослин, які мають таке коріння.

Значна, якщо не більша, частина радіоактивних речовин потрапляє в рослини через кореневу систему.

В організм сільськогосподарських тварин радіоактивні речовини потрапляють переважно із забрудненим кормом та водою відкритих водойм.

В організм людини радіоактивні речовини можуть потрапляти з їжею або з водою. Вважається, що головним джерелом їх є продукція тваринництва, особливо молоко та молочні продукти (60-90%). Проте, за оцінками деяких дослідників, до 50% радіоактивних речовин може надходити з рослинною їжею. Частка радіоактивних речовин, що потрапляють в організм людини через органи дихання після радіоактивних опадів, незначна.

Більшість радіоактивних речовин не потрапляє у продукти тваринного походження, а разом з екскрементами повертається у ґрунт і може знову надходити у рослини. Так само можуть повертатися у ґрунт разом з компостами, попелом та рослинними рештками радіоактивні речовини, які нагромаджуються в рослинах. На суходолі радіоактивні речовини переносяться харчовими ланцюжками рослина - людина, рослина - тварина -

людина і навіть ґрунт - рослина - тварина - людина так швидко, що навіть ті з них, період напіврозпаду яких становить кілька діб (наприклад ^{131}I - 8 діб), можуть нагромаджуватись у людському організмі в значних кількостях.

Коли забруднену воду рослини, тварини, людина не використовують безпосередньо, шляхи міграції розчинених в ній радіоактивних речовин продовжуються (вода - планктон - бентос - невеликі риби - промислові риби - тварина чи людина) або зменшуються (вода - водяні рослини - риби - тварина чи людина). Тому в харчовій продукції прісних і морських водойм міститься менше радіоактивних речовин, ніж у продукції, яку виробляють на суші.

6.3. Особливості надходження радіонуклідів у водні екосистеми

Водна оболонка біосфери є найважливішим депо надходження і захоронення природних і штучних радіонуклідів. При осіданні радіонуклідів з атмосфери за інших однакових умов значна частина радіонуклідів потрапляє на дзеркало води. Цей ефект пов'язаний із тим, що аерозолі, які їх переносять, мають позитивний електричний заряд, а поверхня Землі має негативний електричний заряд. При цьому негативний заряд дзеркала води дещо більший, ніж суші, внаслідок чого сили електростатичної взаємодії зумовлюють осідання з атмосфери значної частки радіонуклідів на поверхні води. Відомо, що щільність випадань радіонуклідів на океанічну поверхню вища, ніж на наземну, зокрема для ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{141}Ce і ^{144}Ce , у 2-7 разів.

Річна поверхнева активність радіонуклідів у стоці, за даними експериментів із глобальними випаданнями і викидами Чорнобильської аварії, становить 0,2-4% концентрації ^{90}Sr на водозбірній площі і 0,01-0,4% вмісту ^{137}Cs , що випали на водозбірну площу.

Стік радіонуклідів із поверхні ґрунтів річкового басейну залежить від часу. В міру збільшення періоду контакту радіонуклідів із ґрунтом коефіцієнт стоку ^{90}Sr знижується за експонентою з періодом півзменшення приблизно 2,4 року. Коефіцієнт поверхневого стоку ($K_{\text{ПС}}$) ^{137}Cs приблизно в 10 разів менший, ніж ^{90}Sr .

У природі радіонукліди, що випали на дзеркало водоймища з атмосфери і принесені з поверхневим рідким та твердим стоком, швидко перерозподіляються і значною мірою переходять із водної фази в донні відкладення, що відбувається протягом кількох днів після надходження у водоймище.

У лісостеповій зоні в непроточних озерах (глибина 5-7 м, площа 5 км²) вміст ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{106}Ru , ^{144}Ce у донних відкладах після разового надходження становить відповідно 84,4; 98,8; 92; 99,3%, а у воді - 9,9; 1,2; 8,0; 0,4%. Інша частина радіонуклідів накопичується на суспензіях і в гідробіонтах.

Розподіл радіонуклідів серед елементів екосистеми прісноводного водоймища описують коефіцієнтами накопичення - відношенням питомої активності радіонуклідів у системах: вода - донні відкладення; вода - гідробіонти; донні відкладення - гідробіонти тощо.

Морське та океанічне середовище є важливим резервуаром депонування радіонуклідів. У відкритому океані (глибини понад 1 км) активність радіонуклідів досить рівномірно розподіляється до глибини 300 м, а потім зменшується за експонентою до глибини 700-800 м.

У воді закритих морів, як правило, активність радіонуклідів ^{90}Sr і ^{137}Cs у 6-10 разів вища, ніж в океані, в якому діє ефект розведення. У прибережній зоні радіонукліди потрапляють у донні відкладення моря, що мають високу сорбційну ємність, яка призводить до накопичення в них радіонуклідів. За міцністю зв'язування і сорбцією радіонукліди у донних відкладеннях можна розмістити в такій послідовності: $^{45}\text{Ca} < ^{90}\text{Sr} < ^{238}\text{U} < ^{137}\text{Cs} < ^{86}\text{Rb} < ^{65}\text{Zn} < ^{59}\text{Fe}$, ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{144}Ce , $^{54}\text{Mn} < ^{106}\text{Ru} < ^{147}\text{Pm}$.

Високий рівень мінералізації води в морі зменшує накопичення радіонуклідів у морській біоті, і тому коефіцієнти накопичення для прісноводних організмів, як правило, вищі, ніж для морської, (таблиця 28).

28. Коефіцієнти накопичення радіонуклідів в основних компонентах морської екосистеми

Компонент	Коефіцієнт накопичення радіонуклідів								
	^{144}Ce	^{137}Cs	^{95}Nb	^{239}Pu	^{106}Ru	^{90}Sr	^{132}Te	^{65}Zn	^{95}Zr
Донні відкладення	5000	1000	10000	10000	10000	30	-	2000	10000
Водорості	5000	100	2000	20000	2000	100	1000	2000	2000
Ракоподібні	1500	50	500	1000	500	50	100	4000	500
Молюски	1500	50	1000	1000	2000	20	100	80000	1000
Риби	100	50	50	100	10	5	10	5000	30

Накопичувальна здатність морської і прісноводної біоти залежить також від концентрації біомаси в одиниці об'єму води. Чим вищий вміст біомаси в 1 м^3 води, тим більша частка активності радіонуклідів може бути зосереджена в біотичній складовій водоймища (таблиця 29).

29. Розподіл радіонуклідів між гідробіонтами і водою, %, залежно від Кн і кількості біомаси в одиниці об'єму

Біомаса, г/м^3	Розподіл радіонуклідів за різних значень Кн, %						
	1	10	100	1000	10000	100000	1000000
0.01	0	0	0	0	0	0	1
0.1	0	0	0	0	0	1	10
1	0	0	0	0	1	10	50
10	0	0	0	1	10	50	90
100	0	0	1	10	50	90	99
1000	0	1	10	50	90	99	100
10000	1	10	50	90	99	100	100
100000	10	50	90	99	100	100	100

При високих концентраціях біомаси - від 10 г/м^3 і більше - і Кн радіонуклідів >1000 , властивих гідробіонтам, можна очікувати

концентрування від 10 до 99% запасу радіонуклідів в біомасі. Щодо прісноводних водоймищ, то така ситуація властива прибережним нагінним зонам.

Основними ж особливостями надходження радіонуклідів у прісноводну екосистему є їх швидкий перерозподіл у водному середовищі з одночасним інтенсивним залученням радіонуклідів до біотичного колообігу, та осадження значної частини радіонуклідів, що випали, у донних відкладеннях.

6.4. Розподіл радіонуклідів у морській екосистемі

Роль морів і океанів у підтриманні стабільності всієї біосфери величезна. Для розуміння цієї ролі розглянемо явище транспортування радіонуклідів, трейсерів (міток) чи маркерів, що характеризують екосистеми.

Найбільші надходження радіонуклідів у моря й океани були під час випробувань ядерної зброї в 1950-1960 рр. Додаткове локальне забруднення морських екосистем відбувається від скидань і викидів ядерних реакторів, заводів із виробництва ядерного палива, від захоронення у морях радіоактивних відходів, аварій та ін. Природні радіонукліди потрапляють у моря внаслідок ерозії гірських порід.

Більшість ядерних військових випробувань проводилися на континентальному шельфі й островах Тихого океану в 1946-1962 рр. Так, Велика Британія провела кілька ядерних випробувань на Тихому океані в 1952-1958 рр., Росія проводила ядерні випробування на полігонах у полярних морях біля Кольського півострова і на Новій Землі.

Ядерні випробування у Тихому океані призвели до локальних радіонуклідних забруднень. Дослідники вважають, що внаслідок таких випробувань у океани і моря випало більше радіонуклідів, ніж на сушу. Частина радіонуклідів, що випали на сушу, потрапляє в океан через вітровий і поверхневий стоки.

Найважливішою складовою поверхневого стоку радіонуклідів у морські екосистеми є стік рік. Так, стік Дніпра є визначальним в оцінці депонування радіонуклідів, зумовлених Чорнобильською аварією, в Чорному морі й Світовому океані. За проведеними оцінками активність стоку радіонуклідів у Чорне море становить $(185-740) \cdot 10^{10}$ Бк (50-200 Ки) на рік.

У морській воді містяться також природні радіонукліди. Це насамперед калій-40, уран, торій, радій і рубідій. Штучні радіонукліди представлені продуктами поділу урану і радіонуклідами, що утворилися зі стабільних елементів після активації нейтронами. Найважливішими продуктами поділу ядер, що виявлені в морській воді та біоті, є ^{90}Sr , ^{90}Y , ^{137}Cs , ^{144}Ce , $^{95}\text{Zr-Nb}$, $^{103,106}\text{Ru}$, $^{103,106}\text{Rh}$ та короткоживучі ізотопи - ^{131}I і ^{140}Ba . Основні продукти активації - це ^{55}Fe , ^{59}Fe , ^{65}Zn , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{54}Mn . У низьких концентраціях містяться в морській воді ^{51}Cr , ^{14}C і ^3H , в дуже низьких - ^{239}Pu та інші трансуранові елементи.

Фізико-хімічні форми радіонуклідів значною мірою впливають на їх міграцію в природному середовищі. Різноманітність речовин, що містяться у

морській воді, утруднює передбачення фізичних і хімічних форм перебування для більшості радіонуклідів. Так, ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{95}Zr існують в морській воді в іонній формі, а для ^{103}Ru , ^{144}Ce , ^{65}Zn , ^{90}Y , ^{95}Nb і ^{59}Fe - характерна тенденція перебування у вигляді колоїдів. Установлено, що радіонукліди ^{57}Co , ^{54}Mn і ^{59}Fe містяться в морській воді в нерозчинній формі. Розчинні радіонукліди, такі як ^{90}Sr , можуть необоротно зв'язуватися із Ca і переходити в нерозчинний стан.

Інший важливий чинник міграції радіонуклідів у морях і океанах - хімічний склад води. Встановлено, що вміст H , O , Na , Cl досягає 10-19 г/л, а K і Ca - 380-400 мкг (у прісній воді їх вміст становить близько 10^{-8} г). Унаслідок цього прісноводні організми, у тому числі риби, поглинають значно більше ^{137}Cs і ^{90}Sr , ніж морські.

Інша причина меншого накопичення цих радіонуклідів у морських організмах полягає в тому, що море, на відміну від прісноводних водоймищ, містить величезний об'єм води для розведення радіонуклідів. Радіонукліди ^{137}Cs і ^{90}Sr у морській воді містяться в розчинній формі й унаслідок високої концентрації хімічних аналогів (носіїв) у незначній кількості входять до складу морської біоти. У відкритому океані, де мала кількість біоти, радіонукліди перерозподіляються між водою та різними суспензіями. Дослідження розподілу радіонуклідів за глибиною показали, що значна частина радіонуклідів міститься на глибині менш ніж 100 м, а решта - до 1000 м (таблиця 30).

Біота також впливає на міграцію радіонуклідів. Ступінь біотичного впливу залежить від радіонуклідів та інших чинників середовища. Так, планктон і вищі організми накопичують радіонукліди в значній кількості і захоронюють їх завдяки екскреції. Популяції малих організмів, наприклад фітопланктон, для якого характерні швидкі процеси обміну, переносять значні кількості радіонуклідів у глибокі шари води й у седименти після відмирання (рис. 19).

Підсумовуючи дані щодо накопичення радіонуклідів у морях і океанах, можна зробити висновок, що продукти розподілу й активації, що існують переважно в колоїдній формі, краще захоронюються в морських екосистемах, ніж ^{137}Cs і ^{90}Sr . У прісноводних водоймищах навпаки. Незважаючи на нерозчинну форму, ^{103}Ru , ^{144}Ce і ^{65}Zn легко акумулюються в морських фільтруючих організмах, у тому числі зоопланктоні й молюсках.

Радіонукліди ^{65}Zn , ^{59}Fe , ^{57}Co і ^{54}Mn легко акумулюються в морському планктоні, але тільки ^{65}Zn і ^{59}Fe добре акумулюються вищими консументами і хижаками. Радіонукліди ^{95}Zr , ^{59}Fe , Al , ^{14}C і ^{32}P можуть концентруватися в морських трофічних ланцюгах, оскільки їх вміст у морі є незначним. У коралах добре концентрується ^{90}Sr .

Отже, морські організми концентрують практично всі радіонукліди, тоді як континентальні - в основному ^{137}Cs і ^{90}Sr .

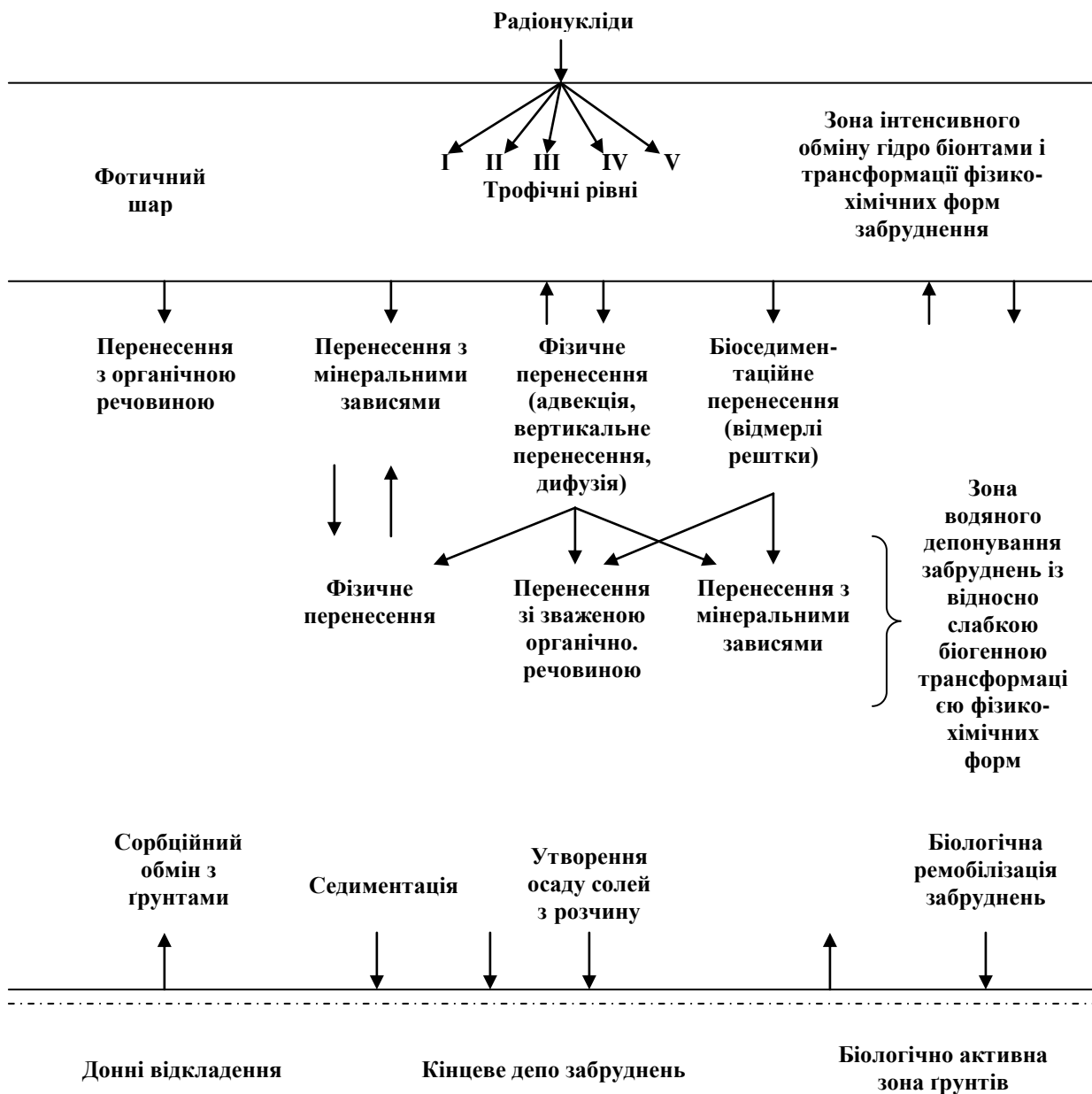


Рис. 19. Схема розподілу і міграції радіонуклідів за глибиною водойми.

30. Типові коефіцієнти накопичення (K_H) ^{137}Cs і ^{90}Sr в деяких компонентах морської і прісноводної екосистем

Компонент	K_H для екосистеми			
	^{137}Cs		^{90}Sr	
	Прісноводної	Морської	Прісноводної	Морської
Молюски	600	8	600	1
Риби	3000	15	200	0.1
Ракоподібні	4000	23	200	1

Виділяють дві основні причини різної міграції радіонуклідів у морських, континентальних і прісноводних екосистемах: 1) ^{137}Cs і ^{90}Sr більше розбавляються K і Ca в морській воді, ніж у ґрунтах і прісноводних

водоймищах; 2) фільтрувальні організми (зоопланктон і молюски) здатні активно накопичувати нерозчинні форми радіонуклідів.

6.5. Міграція радіонуклідів у прісноводних екосистемах

Прісноводні екосистеми за міграцією в них радіонуклідів істотно відрізняються від морських. По-перше, вміст біоти в них значно нижчий, ніж у морських екосистемах. По-друге, об'єм шару донних відкладень, що сорбує радіонукліди, в цілому відповідає об'єму води. Ці обставини зумовлюють особливості прісноводних екосистем, що будуть розглянуті нижче. Третя відмінність прісноводних екосистем від морських полягає в різних їхніх хімічних характеристиках, що може виявлятися різними коефіцієнтами накопичення.

6.6. Загальні властивості прісноводних екосистем

Основними шляхами надходження радіонуклідів у даний тип екосистем є повітряний шлях, поверхневий стік і вторинний вітровий перенос, що однаково стосується і морських, і прісноводних екосистем.

Практично в усіх прісноводних екосистемах містяться ^{137}Cs і ^{90}Sr , що надійшли з глобальних випадань, а також радіонукліди, які потрапили у водоймища після значних аварійних викидів, таких як аварія на ЧАЕС.

Після потрапляння радіонуклідів у водоймища і водотоки реалізуються процеси з трьома основними властивостями:

1) активність радіонуклідів у воді швидко зменшується, паралельно зростає активність їх у біотичних і абіотичних компонентах водоймища;

2) швидкість переходу основних радіонуклідів ^{137}Cs і ^{90}Sr у біологічні об'єкти значно змінюється за часом і варіює для різних видів живих організмів;

3) через деякий час після потрапляння в прісноводну екосистему активність радіонуклідів у її компонентах стабілізується.

Загальна для всіх типів екосистем закономірність - стійка залежність між активністю радіонуклідів та їхніх стабільних аналогів-носіїв властива і прісноводним екосистемам. При цьому чим вищий трофічний рівень в ієрархії трофічного ланцюга, тим суворіше дотримується це співвідношення. Встановлено чітку кореляцію між активністю у компонентах прісноводної екосистеми ^{90}Sr і Ca .

Процеси депонування радіонуклідів у компонентах водних екосистем пов'язані із седиментами (суспензіями), перифітоном (мікроскопічні рослини, що прикріплені до поверхні дна), кореневою вегетацією рослин, та із тваринними організмами. Значна частина радіонуклідів утримується у водному середовищі внаслідок інкорпорування у вільноіснуючих організмах, таких як фітопланктон, а також детриті.

Можливі типи акумуляції радіонуклідів у водних екосистемах передбачають різні фізичні процеси - адсорбцію на поверхні, абсорбцію через мембрани клітин із водної фази і при живленні. Тоді як водні рослини

поглинають мінеральні солі прямо з води, водні тварини можуть накопичувати радіонукліди по трофічних ланцюгах і внаслідок прямої адсорбції з водної фази.

Встановлено, що адсорбція та абсорбція є механізми накопичення радіонуклідів у безхребетних тварин і рослин, тоді як найважливішим шляхом накопичення радіонуклідів для хребетних і практично єдиним шляхом для м'ясоїдних є харчування.

6.7. Розподіл радіонуклідів серед компонентів прісноводних водоймищ

Штучні й природні радіонукліди у водоймищі поглинаються донними відкладеннями, а також живими організмами, частинами рослин і тварин, що відмирають, у процесі утворення детриту. Згодом більше ніж 90% радіонуклідів концентрується в донних відкладеннях і біомасі водоймища, а активність їх у воді різко знижується. На цьому явищі власне ґрунтується ідея використання водоймищ для дезактивації води при скиданнях на атомних станціях. При вивченні розподілу різних радіонуклідів серед компонентів водоймища усі досліджувані радіонукліди прийнято розподіляти на чотири основних типи.

1. *Гідротрони*, що залишаються у воді (^{35}S , ^{51}Cr , ^{71}Ge).
2. *Еквітрони*, що рівномірно розподіляються серед компонентів водоймищ (^{60}Co , ^{86}Rb , ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{131}I).
3. *Педотрони*, що переважно накопичуються в ґрунті й донних відкладеннях (^{59}Fe , ^{69}Zn , ^{90}Y , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{137}Cs).
4. *Біотрони*, що переважно накопичуються в гідробіонтах (^{32}P , ^{115}Cd , ^{144}Ce).

Концентрація радіоактивних речовин у процесі міграції, як правило, зменшується. Наприклад, концентрація більшості радіоактивних речовин в рослинах нижча, ніж у ґрунті, на якому ростуть ці рослини; радіоактивність молока і м'яса тварин нижча, ніж рослин, які тварини поїдають. Але бувають і протилежні явища. Зокрема, вміст таких радіонуклідів, як ^{90}Sr або ^{137}Cs , внаслідок переходу з ґрунту в рослини у багатьох випадках може збільшуватися. У цьому разі можна говорити про нагромадження (аккумуляцію) радіоактивних речовин.

6.8. Надходження радіонуклідів у сільськогосподарські рослини та організм сільськогосподарських тварин

Практичне значення вивчення руху радіоактивних речовин, зокрема штучних, у навколишньому середовищі зумовлене насамперед можливими радіаційними наслідками потрапляння їх у харчові продукти.

6.8.1. Надходження радіонуклідів у сільськогосподарські рослини

Рослини можуть нагромаджувати значні кількості радіоактивних речовин, концентрація яких у сільськогосподарських рослинах може у десятки разів перевищувати їх вміст у ґрунті, внаслідок чого стає

неможливим використання врожаю для харчування людини або годівлі тварин.

При дослідженні цих закономірностей було виявлено, що ^{90}Sr поводить себе подібно до кальцію, а ^{137}Cs - калію; що максимальна концентрація ^{90}Sr завжди у тих видів рослин і органах тварин, які багаті на кальцій (кальцієфіли - рослини родини бобових, деякі представники родин розоцвітих, жовтецевих; кісткова тканина тварин, шкаралупа яєць, черепашки молюсків), а найбільша кількість ^{137}Cs - у багатих на калій (калієфіли - картопля, буряки, капуста, кукурудза, овес, льон, виноград; м'язова тканина ссавців). Це пояснюється тим, що стронцій належить до другої головної підгрупи елементів періодичної системи Д. І. Менделєєва, як і кальцій, а цезій - до першої головної підгрупи, як і калій. Внаслідок цього стронцій має властивості, аналогічні кальцію, а цезій - калію. При цьому треба враховувати, що кальцій і калій належать до найбільш поширених природних елементів (кількість першого в земній корі дорівнює 2,96%, другого - 2,5%), а стронцій і цезій - до категорії мікроелементів (кількість стронцію в земній корі дорівнює $3,5 \cdot 10^{-2}$, цезію - $3,7 \cdot 10^{-4}\%$).

Радіоактивні речовини надходять до рослин двома основними шляхами: 1) внаслідок прямого забруднення надземних органів радіоактивними частинками, що випадають з повітря, з наступним поглинанням їх тканинами вегетативних та репродуктивних органів (некореневе, або аеральне, надходження); 2) через кореневу систему з ґрунту (кореневе надходження). Слід розрізняти ці шляхи забруднення рослин радіоактивними речовинами, оскільки надходження радіоактивних речовин в рослини через надземні органи можливе здебільшого лише в період випадання частинок, тоді як поглинання їх корінням може відбуватися протягом десятків років. Ступінь радіоактивного забруднення продуктивних частин рослини може істотно змінюватися залежно від шляху надходження радіоактивних речовин і місця їх поглинання (наприклад, для злаків, овочів при некореновому надходженні радіоактивних частинок ймовірність забруднення врожаю більша, ніж при кореновому, в той час як для коренебульбоплодів - навпаки).

Позакореневе надходження радіонуклідів у рослини було встановлено ще у дослідях з некореновим підживленням мінеральними елементами. Інтенсивність проникнення і включення в обмін як звичайних, так і радіоактивних речовин значною мірою пов'язані з їх розчинністю і хімічними властивостями. Обов'язковою умовою для проникнення цих речовин углиб рослини є волога на поверхні листя. Зволоженість листя залежить від його форми, опушування, товщини кутикули, наявності жирів у ній, віку листя, наявності води в самому листі. Чим довше волога затримується на поверхні листя, тим більше радіоактивних речовин надходить у нього. Крізь поверхню молодого листя радіонукліди проникають порівняно швидше, ніж крізь листя, старше за віком. Товста кутикула та підвищений вміст у ній жирів затримують проникнення радіонуклідів.

Радіоактивні речовини надходять у листя шляхом поглинання та обміну з кутикулою і стінками клітин. Певну роль можуть відігравати також продири. Частина поглинутих радіоактивних речовин може залишатися в регіоні їх проникнення в рослину, а частина - переміщуватись і нагромаджуватись у різних органах, у тому числі й господарсько-корисних, їх частка залежить від хімічних властивостей, фізіологічної ролі, специфіки виду рослини, її фізіологічного стану. Інтенсивніше переміщуються радіонукліди калію, цезію, рубідію, йоду; повільніше - стронцію, церію, рутенію, цирконію, ніобію, барію. Найрухомішим є ^{137}Cs . Потрапляючи на листя та інші частини рослини, він швидко переміщується до інших органів і здатний у значних кількостях нагромаджуватись у зерні злаків і зернобобових, бульбах картоплі та коренеплодах.

Поглинання калію листям відбувається дуже швидко і він легко переноситься до різних органів. Подібно до калію поводить себе і його хімічні аналоги - цезій і рубідій. Роль кальцію в організмі рослини скромніша. Він бере участь у значно меншій кількості обмінних реакцій. Тому стронцій надходить і нагромаджується в рослинах у менших кількостях. Незначну участь бере в обмінних процесах і церій. Досить інтенсивно переміщуються по рослині радіонукліди йоду.

Позакореневе надходження радіоактивних речовин у рослини значною мірою залежить від наявності листя у рослин, пов'язаного з фазою їх розвитку в період випадання радіоактивних опадів. У фізіології рослин існує поняття «листового індексу», яке є кількісною характеристикою площі листя відносно одиниці посівної площі. Для більшості посівів сільськогосподарських культур оптимальне значення листового індексу становить 2-7. Чим вище показник листового індексу, тим більшим буде ступінь затримання радіоактивних речовин поверхнею листя і вищим їх надходження до рослин.

Значно впливає на рух радіонуклідів в рослині вік листя. Вони не тільки краще поглинаються молодим листям, а й інтенсивніше потрапляють до рослини і переміщуються по ній, оскільки такі речовини нагромаджуються в окремих його частинах у значно більших кількостях.

На позакореневе надходження радіоактивних частинок впливають погодні умови - вони можуть змиватися дощем, здуватися вітром. Утримання радіоактивних речовин на рослинах здебільшого залежить від форми окремих органів, їх механічних властивостей. Радіоактивні частинки нагромаджуються у великих кількостях в пазухах листя та квітів і легко здуваються та змиваються з поверхні неопушеного листя або стебла.

Внаслідок переносу вітром радіоактивного пилу та штучного зрошення дощуванням стає можливим вторинне забруднення надземних частин рослин радіоактивними речовинами. Слід враховувати це під час розробки заходів щодо зменшення їх надходження у рослини.

Загалом рівень забруднення рослин радіонуклідами при прямому потраплянні на їх надземні частини визначається кількістю свіжих

радіоактивних опадів. Водночас їх проникнення через кореневу систему залежить від загальної кількості опадів на поверхню ґрунту, і якщо з часом позакореневе надходження радіоактивних речовин зменшується, то проникнення їх з ґрунту зростає.

6.8.2. Надходження радіонуклідів у рослини з ґрунту

Ґрунт - сильний поглинач різних елементів, у тому числі й радіоактивних речовин. Найвищу здатність до поглинання має його поверхневий шар з основною частиною ґрунтового вбирного комплексу. Тому природні угіддя затримують основну масу радіоактивних речовин у поверхневому шарі ґрунту, а на орних землях вони рівномірно розміщуються по всьому профілю шару ґрунту. Їх залучення до біологічного кругообігу речовин зумовлене, з одного боку, міцністю зв'язку з частинками ґрунту, а з другого - здатністю поглинатися корінням рослин.

Висока міцність зв'язування радіоактивних речовин характерна для важких ґрунтів - чорноземів, каштанових, суглинків, багатих на органічні та мінеральні колоїди, які становлять основу вбирного комплексу. Мінімальна вона у легких піщаних ґрунтів.

Щодо здатності коріння рослин поглинати радіоактивні речовини, то вона визначається багатьма факторами: специфікою виду, розвитком кореневої системи, фазою розвитку, фізіологічним станом рослин, вологістю ґрунту, наявністю в ньому поживних речовин. Поглинання радіонуклідів ґрунтом та рослинами значно затримує їх вимивання і перенесення до ґрунтових вод, вони фіксуються біля поверхні ґрунту у зоні розміщення основної маси коріння.

Механізм поглинання радіоактивних речовин корінням рослин не відрізняється від механізму засвоєння звичайних елементів мінерального живлення. Поглинання радіоактивних речовин корінням, переміщення їх по рослині і розподіл по окремих органах зумовлені їх хімічними властивостями. Радіонукліди цезію та стронцію подібні до калію і кальцію - елементів, які відіграють важливу роль у мінеральному живленні рослин і надходять до рослин з ґрунту у найбільших кількостях. Тому цезій і стронцій легко і швидко переміщуються по рослині, в той час як інші ізотопи - ^{144}Ce , ^{60}Co , ^{91}Y (ітрій), ^{95}Nb (ніобій), ^{95}Zr (цирконій), ^{106}Ru (рутений) нагромаджуються у кількостях на 2-3 порядки менших, переважно у корінні і далі практично не переміщуються.

Розподіл радіонуклідів у надземних частинах рослини відбувається також по-різному. Близько половини їх кількості нагромаджується в стеблі, значно менше - в листі, ще менше - в колосі і лише кілька відсотків - у зерні. Є така закономірна залежність: чим далі по транспортному ланцюжку від коріння знаходиться орган, тим менше радіоактивних речовин він нагромаджує. Для зернових і зернобобових культур ця залежність позитивна. А коли продуктивними органами є листя, і особливо коренеплоди чи

цибулини, продукція буде більш забрудненою. Бульби, які є підземними стеблами, забруднюються менше, ніж коріння.

За характером надходження радіоактивних речовин до рослини через коріння і нагромадження в окремих органах їх поділяють на дві групи: 1) радіонукліди, які надходять швидко і нагромаджуються у надземних частинах рослин; 2) радіонукліди, які надходять повільно, концентруються переважно у корінні і незначно переміщуються в надземні органи. Для характеристики цього процесу використовують коефіцієнт накопичення (K_H).

Для більшості радіонуклідів нагромадження становить десяті й соті частки, тобто концентрація їх у рослині не відбувається. Але для ^{90}Sr і ^{137}Cs його значення в сільськогосподарських культурах досягає значних показників, бо ці радіонукліди як аналоги кальцію і калію беруть активну участь у процесі обміну речовин, внаслідок чого нагромаджуються у значних концентраціях у всіх органах, у тому числі й у зерні. Останнє особливо стосується ^{137}Cs , K_H якого в зерні і соломі зернобобових, плодах овочевих може досягати 2-5 і більше.

Кількість радіоактивних речовин, що надійшли в рослини з ґрунту, знаходиться у прямопропорційній залежності від кількості їх у ґрунті. Поведінка ^{137}Cs при надходженні з ґрунту в рослину пов'язана з наявністю в ньому обмінного калію. При збільшенні його кількості в ґрунті надходження ^{137}Cs зменшується. А рослини, які накопичують більше калію (калієфіли), як правило, нагромаджують більше ^{137}Cs . Так, коренеплоди столових буряків нагромаджують цезію у 3-6 разів більше, ніж коріння пшениці.

У вегетативній масі деяких видів накопичення також може бути досить високим. Так, листя гречки містить до 30% калію, а пшениці - лише 10-15%. Тому в соломі гречки вміст ^{137}Cs у 2-3 рази перевищує його вміст у соломі пшениці.

У міру зниження вмісту ^{137}Cs в продовольчих частинах окремі види рослин розміщуються в такій послідовності – зернові та зернобобові: гречка-соя-боби-квасоля-горох-овес-жито-пшениця-ячмінь-просо-тритикале-кукурудза; кормові (зелена маса): люпин жовтий-капуста кормова-вика-соняшник-конюшина-тимофіївка-костриця безоста-кукурудза; технічні: редька олійна-ріпак-буряки цукрові-соняшник-льон; овочеві: капуста-буряки столові-салат-морква-картопля-огірки-гарбузи-помідори.

Від забезпеченості ґрунту обмінним кальцієм залежить надходження до рослин ^{90}Sr . Акумуляція ^{90}Sr в рослинах також залежить від їх здатності нагромаджувати кальцій. Рослини-кальцієфіли нагромаджують значно більше кальцію, ніж індіферентні до нього види, тому можуть набагато більше нагромаджувати і ^{90}Sr .

Вивчення закономірностей поведінки радіоактивних речовин у системі ґрунт-рослина, зв'язків між їх вмістом у ґрунті і нагромадженням рослинами, особливостей і хімічних властивостей окремих радіонуклідів, а також можливих шляхів руху їх по рослині мають важливе практичне значення при прогнозуванні нагромадження їх врожаєм, а також у процесі розробки

заходів щодо запобігання їх надходженню і нагромадженню у продукції рослинництва.

6.8.3. Надходження радіонуклідів у організм сільськогосподарських тварин

Надходження радіоактивних речовин у організм сільськогосподарських тварин відбувається через органи травлення (пероральний), дихання (інгалаційний) і крізь шкіру (перкутантний). Інгалаційний шлях надходження радіонуклідів має значення лише в період випадання радіоактивних опадів, незначним є й проникнення крізь шкіру. Основним шляхом їх надходження у тваринний організм є пероральний, тобто з кормами. Значно менше надходить їх з водою.

Радіоактивні речовини разом з кров'ю надходять в органи і тканини тварини, де частково затримуються, вибірково концентруючись в окремих органах. Але більшість їх відразу виводиться з організму.

Частка радіоактивних речовин, що беруть участь в обміні, неоднакова. Вони затримуються у тих тканинах і органах, де є стабільні елементи з аналогічними хімічними властивостями. Оскільки хімічний склад тканин сільськогосподарських тварин вивчений добре, можна передбачити де затримається радіонуклід.

Розрізняють такі типи розподілу радіоактивних речовин в організмі ссавців: скелетний, ретикулоендотеліальний, тіреотропний та дифузний. Скелетний тип властивий елементам лужноземельної групи – кальцію і його хімічному аналогу стронцію. У мінеральній частині скелета нагромаджуються радіонукліди барію, радію, плутонію, урану. Ретикулоендотеліальний розподіл властивий для радіонуклідів рідкоземельних металів: церію, празеодиму, прометію, а також цинку, торію і трансуранових елементів. Тіреотропний – для йоду. Дифузний - для радіонуклідів лужних елементів: калію, натрію, цезію, рубідію, а також водню, азоту, вуглецю, полонію та ін.

Деякі радіоактивні елементи мають високий ступінь нагромадження в окремих органах і тканинах. Так, радіонукліди йоду нагромаджуються у щитовидній залозі через специфіку обміну речовин цього органа.

Ступінь радіаційного впливу інкорпорованих радіоактивних речовин на окремі органи і в цілому на організм залежить від їх терміну перебування в ньому. Ті, що приєднуються до процесу обміну в тканинах з прискореним метаболізмом, швидко виводяться з організму разом з продуктами метаболізму. Так, тритій, який бере участь у водному обміні, за кілька тижнів виводиться з організму ссавців з сечею, а ^{45}Ca та ^{90}Sr , які беруть участь у формуванні кісткової тканини, перебувають в організмі тварини все життя.

Для характеристики терміну перебування в організмі радіоактивних речовин є поняття *періоду піввиведення радіоактивного ізотопу*. Це час, протягом якого кількість нагромадженого в організмі радіонукліда зменшується вдвічі внаслідок процесів біологічного виділення.

Це поняття не застосовується до рослин, тому що виведення ізоотопу з рослинного організму замасковане його розбавленням у тканинах за рахунок збільшення маси клітин під час онтогенезу. Ріст рослини - чутливий процес і залежить від багатьох факторів навколишнього середовища та відбиває найменші зміни метаболізму. Тому період піввиведення радіоактивних ізоотопів з рослин може змінюватись багато разів залежно від умов їх вирощування.

І для ссавців тривалість періоду піввиведення радіонукліда значною мірою залежить від характеру метаболізму. Так, для людини залежно від віку період піввиведення ^{137}Cs коливається від 30 днів у дітей до 90-100 днів у людей похилого віку, а ^{90}Sr - від 25 до 70 років.

6.9. Накопичення радіонуклідів гідробіонтами

Найбільш інтенсивно накопичуються гідробіонтами такі радіоактивні ізоотопи як ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{90}Y , ^{95}Zr , ^{144}Ce , ^{147}Pr , ^{97}Mg . Коефіцієнти накопичення для цих елементів досягають десятків тисяч одиниць в перерахунку на суху масу. Меншою мірою накопичуються радіонукліди ^{35}S , Ca , ^{51}Cr , ^{71}Ge , ^{106}Rb , ^{90}Sr , ^{115}Cd , K_H для яких не перевищують кількох сотень одиниць.

Рівень накопичення радіонуклідів визначається не тільки фізико-хімічними властивостями радіонуклідів, а й біологічними властивостями різних гідробіонтів. Серед гідробіонтів виділяють окремі види, які є специфічними щодо накопичення тих чи інших радіонуклідів. Порівняння різних груп гідробіонтів за їхньою накопичувальною здатністю показало, що рослини мають більші K_H , ніж тварини, а одноклітинні й нитчасті водорості накопичують радіонукліди більше, ніж вищі рослини.

Дослідження коефіцієнтів накопичення природних радіонуклідів ^{238}U , ^{232}Th і ^{226}Ra для прісноводної флори виявило, що середній K_H для ^{238}U у вищих рослин ($\text{K}_\text{H} = 80$) значно більший, ніж у водоростей ($\text{K}_\text{H} = 9$). Для ^{226}Ra у вищих рослин K_H становить 120 і також дещо вищий, ніж в одноклітинних і нитчастих водоростей ($\text{K}_\text{H} = 55$), а для ^{232}Th спостерігається протилежне: найбільший K_H (120) виявлений в одноклітинних водоростях. За накопиченням усіх природних радіонуклідів в цілому перше місце посідають одноклітинні водорості ($\text{K}_\text{H} = 200-600$).

У водоймищах радіонукліди активно поглинаються не тільки живими організмами, а й частинами тварин і рослин, що відмирають, при утворенні детриту. Для ^{137}Cs і ^{90}Sr у живих і відмерлих рослин K_H практично не відрізняються, а для ^{106}Ru і ^{144}Ce у відмерлих рослин вищі, ніж у живих. Унаслідок цього останні радіонукліди міцно захоронюються в донних відкладеннях, а ^{137}Cs і ^{90}Sr відносно легко можуть десорбуватися з донних відкладень і залучатися до біологічного колообігу.

Проведені численні дослідження K_H для штучних радіонуклідів за умов акваріума й природного озера дали схожі результати. При цьому з'ясувалося, що в природних умовах K_H , як правило, більший, ніж у лабораторних.

Установлено залежність накопичення ^{137}Cs і ^{90}Sr від екологічних особливостей існування рослин (табл. 31).

31. Середні коефіцієнти накопичення (K_H) ^{90}Sr і ^{137}Cs для рослин різних екологічних груп

Група рослин	K_H	
	^{90}Sr	^{137}Cs
Ті, що плавають на поверхні води	860	3440
Занурені у воду, що не мають зв'язку з дном	670	830
Занурені у воду, прикріплені до дна	420	590
Занурені у воду, прикріплені до дна, з листям, що плаває	270	790
Прибережно-водянні	150	600

Отже, найбільший K_H мають рослини, що плавають на поверхні води, а найменший - прибережно-водянні та занурені у воду і прикріплені до дна.

Серед великої кількості чинників, що впливають на K_H радіонуклідів гідробіонтами, виділяють як основні: 1) концентрацію у воді ізотопних і неізотопних носіїв; 2) фізико-хімічний стан радіонуклідів у розчині й рН середовища; 3) температуру та освітленість води.

Результати більшості досліджень щодо вивчення залежності накопичення радіонуклідів від концентрації у воді ізотопних носіїв дають змогу стверджувати, що в зонах малих концентрацій (об'ємна активність радіонуклідів менше ніж $3,7 \cdot 10^5$ Бк/л, або 10^{-5} Кі/л) вміст елемента в гідробіонтах прямо пропорційний його концентрації у воді й, отже, K_H залишаються постійними. В зонах значних концентрацій (10^{-5} - 10^{-4} моль/л) спостерігається обернена залежність K_H від концентрації хімічного елемента у водній фазі.

Встановлена залежність K_H радіонуклідів гідробіонтами від концентрації у воді відповідних радіонуклідних носіїв. Так, K_H ^{90}Sr перебуває в оберненій залежності від вмісту у воді його хімічних аналогів (Ca і Mg), а K_H ^{137}Cs - від вмісту K у середовищі. Ці явища в радіоекології дістали назву процесів дискримінації, і для їх опису запропоновано коефіцієнти дискримінації, що визначають за формулою

$$K_d = \frac{K_1}{K_2}$$

де K_1 — співвідношення вмісту ^{90}Sr і Ca в організмі;

K_2 - у воді.

Аналогічно обчислюють коефіцієнт дискримінації для пари ^{137}Cs - K. У таблиці 32 наведено для прикладу коефіцієнти накопичення і дискримінації ^{90}Sr у водній рослині водопериці (*Myriophyllum spicatum* L.) залежно від вмісту Ca у воді.

Загалом, коефіцієнти дискримінації відрізняються певною сталістю за значних коливань вмісту Ca в середовищі і є видовою характеристикою гідробіонта, його здатності накопичувати Ca і K.

32. Залежність коефіцієнтів накопичення (K_H) і дискримінації (K_D) ^{90}Sr у водопериці від вмісту кальцію у воді

Вміст Са у воді, мг/л	K_H Са	K_H ^{90}Sr	K_D ^{90}Sr -Са	Вміст Са у воді, мг/л	K_H Са	K_H ^{90}Sr	K_D ^{90}Sr -Са
19.7	1432	1012	0.7	191.0	205	140	0.7
26.2	1292	754	0.6	226.2	165	95	0.6
43.7	631	519	0.8	287.2	134	75	0.5
83.4	327	292	0.9	331.3	106	75	0.7
128.8	264	168	0.6	633.2	75	42	0.5

6.10. Прогнозування надходження радіонуклідів у сільськогосподарські рослини та організм тварин

Існує кілька методів оцінки можливого забруднення врожаю сільськогосподарських культур радіоактивними речовинами.

Найпоширеніший з них полягає у використанні коефіцієнта накопичення (K_H) радіоактивних речовин продуктивними органами рослин, які ростуть на різних ґрунтах. За цим показником кількість радіонукліду в 1 кг сухої чи вологої речовини рослин дорівнюватиме добутку від множення його вмісту в 1 кг відповідно сухого чи вологого ґрунту на K_H . Порівнюючи це значення з допустимими рівнями забруднення даним радіонуклідом продуктів харчування, можна зробити висновок про можливість вирощування тієї чи іншої культури в даних умовах радіоактивного забруднення.

Цей метод можна використати для прогнозування нагромадження у рослинах ^{137}Cs і будь-яких інших радіонуклідів. Для цього слід знати значення їх K_H . Чим точнішими і диференційованими будуть значення K_H окремих радіоактивних ізотопів, тим з більшою точністю можна передбачити їх можливе накопичення в продукції рослинництва.

Існують також інші способи прогнозування надходження радіоактивних речовин у врожай сільськогосподарських рослин, проте всі вони потребують попередньої спеціальної роботи щодо оцінки різних коефіцієнтів і показників, а інколи й проведення спеціальних лабораторних досліджень.

На аналогічних розрахунках ґрунтуються і методи прогнозування надходження і накопичення радіоактивних речовин в організмі сільськогосподарських тварин. Існують коефіцієнти переходу і накопичення радіонуклідів у різних тканинах тварин, які враховують їх вміст в кормах і дають змогу визначити вміст у продукції тваринництва.

Надходження радіоактивних речовин у сільськогосподарські рослини, а з ними в організм тварин залежить від багатьох факторів, про які вже говорилося вище, і насамперед від майже непередбачених погодних умов року. Тому всі методи прогнозування надходження радіонуклідів у продукцію рослинництва і тваринництва досить відносні і дають лише приблизне уявлення про можливе її забруднення.

6.11. Особливості ураження організму інкорпорованими радіоактивними речовинами

При потраплянні в організм радіоактивних речовин, які зумовлюють внутрішнє опромінення, залежно від їх фізичних характеристик, кількості і тривалості перебування в організмі, можуть спостерігатися такі самі радіобіологічні ефекти, що й при еквівалентних поглинених дозах зовнішнього опромінення: радіаційна стимуляція, морфологічні зміни, променева хвороба, прискорення старіння і скорочення тривалості життя, загибель, генетична дія. У 40-50-х рр., в умовах недостатньої кількості джерел зовнішнього опромінення у практиці сільського господарства користувалися розчинами різних радіоактивних ізотопів для індукції ефекту радіаційної стимуляції у рослин, а також практикували намочування посівного матеріалу для одержання мутантів при селекційній роботі. При вирощуванні рослин на розчинах, які мають високі концентрації нуклідів з коротким періодом піврозпаду і досить жорстким випромінюванням, наприклад ^{32}P , виникає типова променева хвороба. Вона супроводжується характерними порушеннями метаболізму і морфологічними змінами, які аналогічні із змінами при загальному зовнішньому опроміненні і можуть призводити до загибелі рослин і тварин.

Підвищена небезпека від радіоактивних речовин, які потрапили в організм, зумовлена різними причинами. Головною з них є здатність деяких з них вибірково нагромаджуватись в окремих тканинах і органах. Якщо при зовнішньому опроміненні всі тканини опромінюються рівномірно, то при внутрішньому відбуваються процеси формування високих локальних доз для тканин. Це зумовлюється хімічними властивостями радіоактивних речовин і специфікою метаболізму виду. Активну роль у формуванні таких процесів відіграють фізіологічні особливості самого організму. На радіоавтографах цілих рослин добре видно нерівномірність розподілу радіонуклідів по окремих органах, а також місця високої їх локалізації, як правило, у тканинах, що мають високу метаболічну активність. Зокрема, це властиво для критичних тканин рослин - меристем. Аналогічні зони високої локалізації радіонуклідів особливо характерні для окремих тканин і органів хребетних тварин. Так, до 30% радіоактивного йоду нагромаджується у щитовидній залозі, яка становить лише 0,02-0,05% маси тіла. В ній йод входить до складу гормону тироксину. Майже виключно у кістках скелета нагромаджується ^{90}Sr , що створює умови для хронічного опромінення найважливішого критичного органа - кісткового мозку.

Другою важливою особливістю інкорпорованих радіоактивних речовин є збільшення небезпеки дії α - і β -випромінювачів, які внаслідок низької проникної здатності не становлять загрози або мало впливають на внутрішні тканини організму при зовнішньому опроміненні, проте стають надзвичайно сильними джерелами іонізуючої радіації при потраплянні всередину організму. Особливо це стосується радіонуклідів - джерел α -випромінювання: плутонію, америцію, радію, урану та інших, які, маючи високу відносну

біологічну ефективність (ВБЕ), можуть призвести до важких радіаційних ушкоджень. Так, рухаючись крізь кишки ссавців, вони уражують їх епітелій; при всмоктуванні у кров - ендотелій судин; при нагромадженні в скелеті - кістковий мозок.

Третьою особливістю дії інкорпорованих радіоактивних речовин є, як правило, тривале опромінення організму. Періоди піврозпаду і піввиведення багатьох радіоактивних речовин, зокрема ^{90}Sr та ^{239}Pu , дуже тривалі - під їх впливом організм сільськогосподарських тварин зазнає хронічного опромінення протягом усього життя.

Важливою особливістю внутрішнього опромінення є і те, що від нього важко захиститися за допомогою звичайних протипроменевих засобів, які використовують при зовнішньому опроміненні. Можливості прискорити виведення з організму радіоактивних речовин невеликі.

Перелічені специфічні властивості радіаційного ураження інкорпорованими радіонуклідами стосуються здебільшого організму тварин і особливо людини. Рослина є проміжною ланкою.

Специфічність внутрішнього опромінення рослин і тварин, зумовлена дуже різкою нерівномірністю розподілу інкорпорованих радіоактивних речовин у різних тканинах та органах, дуже обмежує його дозиметрію. Як правило, для цього використовують різні методи із застосуванням спеціальних, досить складних розрахунків, але й вони дають лише дуже приблизні дані щодо справжньої поглинутої дози.

Наведені особливості біологічної дії інкорпорованих радіоактивних речовин дають уяву про ту небезпеку, яку вони становлять для живого організму. Терапевтичні засоби їх виведення малоефективні, і тому основним захистом від інкорпорованих радіоактивних речовин є запобігання їх надходженню в організм. Це можна зробити на будь-якому етапі їх надходження в організм людини. Але найефективнішим є запобігання їх надходженню і нагромадженню у сільськогосподарській продукції на етапах ґрунт-рослина та рослина-тварина, що треба особливо враховувати при веденні сільськогосподарського виробництва на забруднених радіоактивними речовинами територіях.

Тема 7. Ведення сільськогосподарського виробництва на забруднених радіонуклідами територіях

Сільськогосподарська діяльність є невід'ємною частиною життя сільського населення, і тому його проживання на забруднених радіоактивними речовинами територіях доцільне і можливе лише за умови, що радіаційна обстановка допускає безпечно для здоров'я проведення робіт у рільництві й тваринництві, а також виробництво в приватних господарствах продукції, придатної для необмеженого використання як у харчуванні, так і в промисловості.

7.1. Основні принципи організації ведення сільського господарства на забруднених радіонуклідами територіях

Ведення сільськогосподарського виробництва на забруднених радіонуклідами територіях має здійснюватись згідно з положеннями концепції проживання населення на території України з підвищеними рівнями радіаційного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи, з додержанням норм радіаційної безпеки і основних санітарних правил і забезпечувати виробництво продуктів харчування, вміст в яких радіоактивних речовин не перевищує допустимих рівнів.

У господарствах на забруднених радіонуклідами територіях необхідно вирішувати наступні завдання:

1. Виробництво сільськогосподарської продукції, споживання якої без обмежень не призведе до перевищення середньорічної ефективної еквівалентної дози опромінення людини 0,1 сЗв (0,1 бер) на рік понад дозу, яку вона отримувала у доаварійний період.

2. Впровадження у виробництво заходів щодо зменшення вмісту радіонуклідів у продукції до рівня, що не перевищує встановлених рівнів, з урахуванням їх економічної доцільності.

3. Проведення протиерозійних заходів запобігання міграції радіонуклідів на незабруднені угіддя, у водойми, на території населених пунктів тощо.

Різні рівні забруднення території зумовлюють формування кількох зон. У законі України «Про правовий режим території, яка зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи» визначені наступні категорії територій:

1. *Зона відчуження* – територія, де проведено евакуацію населення у 1986 р.

2. *Зона безумовного (обов'язкового) відселення* – з щільністю забруднення ґрунту в порівнянні з доаварійним рівнем ^{137}Cs більше 15 Кі/км², ^{90}Sr – більше 3 Кі/км², де розрахункова ефективна еквівалентна доза опромінення людини з урахуванням коефіцієнтів міграції радіонуклідів в рослини та інших факторів може перевищити 5 мЗв (0,5 бер) за рік понад дозу у доаварійний період.

3. *Зона гарантованого добровільного відселення* - з щільністю забруднення ґрунту в порівнянні з доаварійним рівнем ^{137}Cs від 5 до 15 Кі/км², ^{90}Sr – від 0,15 до 3 Кі/км², де розрахункова ефективна еквівалентна доза опромінення людини з урахуванням коефіцієнтів міграції радіонуклідів в рослини та інших факторів може перевищити 1 мЗв (0,1 бер) за рік понад дозу у доаварійний період.

4. *Зона посиленого радіоекологічного контролю* - з щільністю забруднення ґрунту в порівнянні з доаварійним рівнем ^{137}Cs від 1 до 5 Кі/км², ^{90}Sr – від 0,005 до 0,01 Кі/км², де розрахункова ефективна еквівалентна доза опромінення людини з урахуванням коефіцієнтів міграції радіонуклідів в

рослини та інших факторів може перевищити 0,5 мЗв (0,05 бер) за рік понад дозу у доаварійний період.

Зональний принцип ведення сільськогосподарського виробництва залежно від щільності забруднення угідь не є підставою для вирішення питань про евакуацію чи реевакуацію населення, проведення тих чи інших робіт. Тому точнішим показником має бути величина поглинутої населенням ефективної еквівалентної дози як головного чинника, що визначає радіобіологічні ефекти.

Еквівалентна доза опромінення населення визначається не тільки щільністю радіоактивного забруднення території, а й комплексом екологічних факторів, що впливають на міграцію радіонуклідів по харчовому ланцюжку. Залежно від них в окремих видах сільськогосподарської продукції може бути однакова концентрація радіонуклідів при виробництві на площах з різними рівнями забруднення. На деяких територіях можуть бути одержані продукти, що містять більшу кількість радіонуклідів, ніж одержані на площах з вищими рівнями забруднення. Тому рішення про можливість проживання і ведення сільськогосподарського виробництва на забруднених територіях приймається не тільки на підставі даних про рівень забруднення ґрунту, а й з урахуванням комплексу екологічних факторів.

Залучення радіонуклідів в харчові ланцюжки на територіях з рівнями забруднення, що допускають ведення сільськогосподарської діяльності, хоч і не призводить до перевищення дози опромінення окремих осіб, проте зумовлює опромінення великих контингентів населення низькими дозами, які визначають імовірність віддалених радіобіологічних ефектів. За цих умов істотним фактором радіаційної загрози стає колективна еквівалентна доза опромінення населення, яка визначається кількістю дозоутворюючих радіонуклідів, що містяться у вироблених на забрудненій території валовій кількості продуктів харчування. Тому основним критерієм для визначення спеціалізації сільськогосподарського виробництва на цих територіях є колективна еквівалентна доза опромінення населення.

Оптимізація структури сільськогосподарського виробництва на територіях, де забруднення продукції не призводить до перевищення меж індивідуальних доз опромінення населення, полягає у досягненні мінімального вмісту радіонуклідів у продуктах харчування людини в межах економічної доцільності.

Це забезпечують насамперед такими заходами:

- 1) підвищенням загальної культури ведення сільськогосподарського виробництва;
- 2) перепрофілюванням напрямів сільського господарства;
- 3) проведенням меліоративних робіт.

Якщо впровадження цих заходів не забезпечує виробництва продукції, що відповідає санітарно-гігієнічним нормативам, ведення сільськогосподарського виробництва на цій території припиняється.

Відмінності у концентрації радіонуклідів в окремих видах сільськогосподарської продукції, отриманих на площах з однаковим рівнем радіоактивного забруднення, дають змогу змінювати напрями виробництва. Обсяг перепрофілювання виробництва треба визначати як за радіологічними параметрами, так і за економічною доцільністю. В останньому випадку керуються концепцією «ризик-користь» або «користь-шкода».

Особливо велику увагу слід приділяти виробництву критичних сільськогосподарських продуктів, споживання яких формує основну частину дози внутрішнього опромінення (насамперед це стосується молока і м'яса).

Виведені із сільськогосподарського обороту угіддя можна заліснити. Це дасть змогу у майбутньому використати деревину, а також обмежити міграцію радіонуклідів із забруднених зон.

До раціонального мінімуму має бути зведене вивезення сільськогосподарської продукції за межі забрудненої зони.

Загалом, важливою умовою успішної організації ведення сільськогосподарського виробництва на забруднених радіонуклідами територіях і реалізації заходів, що зменшують нагромадження радіоактивних речовин в продукції, є забезпеченість сільськогосподарських підприємств і установ висококваліфікованими радіологами.

7.2. Зниження надходження радіонуклідів у продукцію сільського господарства

Запобігання надходженню радіоактивних речовин у сільськогосподарські рослини та організми тварин і розробка шляхів їх виведення з організму тварин є одним з головних завдань сільськогосподарської радіоекології. Ці заходи є найважливішою складовою протипроменевого захисту рослин, тварин і людини. Розв'язання цієї проблеми починається з комплексу заходів щодо зниження надходження радіоактивних речовин у сільськогосподарські рослини.

7.2.1. Засоби зниження надходження радіонуклідів у сільськогосподарські рослини

Залежно від властивостей ґрунту і ступеня його забруднення радіоактивними речовинами, а також виду сільськогосподарських культур, шляхів використання врожаю та інших умов застосовують різні засоби, які можуть забезпечити зменшення радіоактивності продуктів рослинництва. За однією класифікацією вони поділяються на дві групи: 1) загальнозживані у сільському господарстві; 2) спеціальні.

За іншою класифікацією розрізняють засоби механічні, агротехнічні, хімічні, агрохімічні та біологічні. Такий поділ їх звичайно умовний, оскільки на практиці важко визначити межу між механічними та агротехнічними засобами, хімічними й агрохімічними, агротехнічними та біологічними тощо. Крім того, при організації та проведенні заходів щодо запобігання надходженню радіоактивних речовин у рослини, як правило, доводиться

мати справу з комплексом засобів, які технологічно тісно пов'язані між собою. Тому доцільно визначити п'ять головних комплексних систем зниження надходження радіоактивних речовин у рослини: 1) обробіток ґрунту; 2) застосування хімічних меліорантів і добрив; 3) зміна структури сівозміни; 4) управління режимом зрошення; 5) внесення спеціальних речовин і сполук.

Обробіток ґрунту. На окультурених ґрунтах радіоактивні речовини нагромаджуються здебільшого в орному шарі. Тому ефективним заходом у перші дні і тижні після аварії було загортання забрудненого шару ґрунту плантажним плугом на глибину 40-50 см з наступним окультурюванням вивернутого підорного шару. Це зумовило зниження нагромадження рослинами радіоактивних продуктів поділу у 5-10 разів і забезпечує зниження рівня зовнішнього випромінювання в 10 разів і більше. Ефективність такої оранки вища на важких ґрунтах, для рослин з мичкуватою кореневою системою, при поливі дощуванням. Тому такий обробіток ґрунту рекомендовано переважно для зон з достатньою вологістю і для регіонів, де застосовується зрошення.

При глибокій оранці можна очікувати істотного зниження родючості ґрунтів. Однак, при внесенні достатньої кількості органічних та мінеральних добрив компенсується природна родючість зораного шару і врожай сільськогосподарських культур у сівозміні може не знижуватись.

Дуже ефективним є корінне поліпшення луків. Сіно зернових і зернобобових культур після такого обробітку в середньому містить ^{90}Sr у 1,5-5 разів менше, а ^{137}Cs – в 10-15 відповідно.

Оскільки в перші тижні, а при сухій погоді протягом багатьох місяців радіоактивні опади розподіляються лише на поверхні ґрунту або в шарі товщиною не більше кількох сантиметрів, рекомендують його знімати. Для цього використовують дорожньо-збиральну, дорожньо-будівельну або спеціально сконструйовану техніку - бульдозери, грейдери, скрепери.

При видаленні поверхневого шару ґрунту (5 см) доводиться вивозити до 500 м³ ґрунту з 1 га. А якщо ґрунти пухкі,- то й більше в 2-3 рази. Таку кількість ґрунту важко не тільки знімати, а й захоронювати. Тому цей захід можна рекомендувати тоді, коли вміст радіоактивних речовин набагато перевищує допустимі рівні, або обробіток ґрунту звичайними сільськогосподарськими знаряддями малоефективний.

При порівняно невисоких рівнях забрудненості ґрунтів достатньо їх переорати відвальними плугами на звичайну глибину. Змішування забрудненого поверхневого шару ґрунту з більш глибокими пластами зменшує поширення радіоактивних речовин вітром та надходження їх у рослини у 2-4 рази. При дуже високих рівнях забруднення рекомендується глибоке (до 0,5-1 м) засипання поверхневого радіоактивного шару чистим ґрунтом або сумішкою його з соломою та соломи з глиною. Але такі заходи важко провести на великих територіях.

Застосування хімічних меліорантів і добрив. Роль мінеральних та органічних добрив, як постачальників головних поживних речовин в умовах радіоактивного забруднення не змінюється. Розглянемо вплив деяких основних агрохімічних заходів на надходження радіоактивних речовин у сільськогосподарські рослини.

Вапнування. Радіоактивні речовини іноді надходять у навколишнє середовище у вигляді нерозчинних і важкорозчинних частинок. Проте з часом при контакті з киснем повітря і водою вони переходять у розчинні форми. Цьому особливо сприяє кисла реакція середовища. З кислих ґрунтів у рослини надходить більше ^{90}Sr й ^{137}Cs , ніж із слабкокислих або нейтральних. Тому вапнування кислих ґрунтів, крім поліпшення умов росту рослин, знижує надходження радіоактивних речовин з ґрунту.

Основним компонентом вапняних матеріалів є кальцій - хімічний аналог стронцію. Внаслідок антагонізму між ними надходження в рослини ^{90}Sr зменшується більшою мірою, ніж ^{137}Cs .

Вапнування застосовують на підзолистих, дерново-підзолистих та кислих торфових ґрунтах, іноді - на сірих лісових та червоноземах.

На лужних ґрунтах для збагачення їх на кальцій проводять гіпсування, а на нейтральних вносять вапняні матеріали й гіпс.

Отже, вапнування кислих забруднених ґрунтів слід вважати одним з головних заходів, що обмежують процес переходу радіоізотопів у рослини. Воно дає змогу зменшувати вміст стронцію в картоплі й коренеплодах у 10-20 разів, у сіні бобових - у 6-8 разів, у соломі злаків - у 3-4, у зерні - у 2-4 рази, в овочах - у 5-7, у ягодах - у 4-6 разів.

З метою зменшення кількості нагромадження врожаєм рослин ^{90}Sr та ^{137}Cs можна вносити не тільки вапно, а й інші вапняні матеріали природного і промислового походження: вапняки, доломіт, мергель, сланцевий та торф'яний попіл, дефекаційне багно, відходи целюлозно-паперових комбінатів, металургійні, або доменні, шлаки.

Калійні добрива. Надходження ^{137}Cs в рослини та нагромадження його в урожаї значно залежить від вмісту у навколишньому середовищі і в рослинах його хімічного аналогу - калію. Внесення калійних добрив є одним з головних заходів зменшення вмісту ^{137}Cs в продукції рослинництва у 3-6 разів. Це пояснюють антагонізмом іонів калію та цезію під час їх надходження в рослини.

Рівень калійного живлення рослин істотно впливає на нагромадження ^{137}Cs у надземних органах і при надходженні його через листя. При внесенні калійних добрив у ґрунт і при обприскуванні ними листя вміст ^{137}Cs у вегетативних органах рослин значно зменшується. Зменшується надходження ^{137}Cs через коріння і листя при позакореновому підживленні рослин калієм. Рослини-калієфіли поглинають ^{137}Cs у більших кількостях, ніж звичайні види.

Фосфорні добрива. Солі фосфорних кислот можуть утворювати із стронцієм нерозчинні сполуки. Тому при внесенні у ґрунт фосфорних добрив

може значно знизитись перехід ^{90}Sr з ґрунту у рослини. Найефективнішими з них є добрива, які містять фосфати кальцію і калію. Внесення у ґрунт тризаміщеного фосфату калію у кілька разів зменшує вміст у рослинах як ^{90}Sr , так і ^{137}Cs . Фосфати амонію, натрію, магнію впливають здебільшого тільки на вміст ^{90}Sr .

Фосфорні добрива в формі суперфосфату можуть посилювати нагромадження ^{137}Cs у рослинах. Азотно-фосфорне добриво підсилювало його надходження на всіх типах ґрунтів. Найінтенсивніше збільшення (у 4 рази) спостерігали на чорноземах.

Азотні добрива. На забруднених радіоактивними речовинами ґрунтах слід обережно підходити до використання азотних добрив. При їх внесенні збільшується нагромадження в рослинах ^{137}Cs , а іноді й ^{90}Sr . Загальне збільшення норми повного мінерального добрива також призводить до нагромадження у рослинах ^{137}Cs .

Органічні добрива. Внесення в ґрунт органічних добрив може істотно зменшити надходження в рослини радіоактивних речовин. Особливо ефективно внесення гною, перегною, низинного торфу на ґрунтах легкого механічного складу. Органічні речовини добрив запобігають не тільки надходженню в рослини ^{90}Sr та ^{137}Cs , а й інших радіонуклідів.

Різно зменшується нагромадження радіоактивних речовин при спільному внесенні в дерново-підзолисті ґрунти органічних і вапняних добрив. Цей захід є одним з найістотніших серед агрономічних заходів, спрямованих на зменшення надходження радіонуклідів з ґрунту і збільшення врожаю сільськогосподарських культур.

При використанні органічних та інших місцевих добрив слід дотримуватися певних правил. Гній, компост, попіл, одержані в місцях з підвищеною щільністю радіоактивного забруднення, можуть перетворитися на джерело вторинного забруднення ґрунту. Тому їх не рекомендується використовувати на полях з низьким рівнем радіоактивності, а також вносити на овочево-картопляних сівозмінах, оскільки продукцію їх використовують безпосередньо в їжу.

Найдоцільніше застосовувати місцеві добрива, одержані на забруднених площах у сівозмінах кормового напрямку, на насінницьких ділянках, під технічні, олійні та прядильні культури, картоплю для виробництва крохмалю.

Використання добрив на забруднених радіоактивними речовинами ґрунтах є одним з головних заходів зменшення надходження радіонуклідів у сільськогосподарські рослини. Зниження вмісту радіонуклідів в продукції рослинництва досягають не тільки за рахунок зменшення їх нагромадження рослинами, а й за рахунок зменшення вмісту радіоактивних продуктів поділу на одиницю маси рослинницької продукції при збільшенні врожаю (ефект «розведення»).

Для збільшення врожаю застосовують органічні та мінеральні добрива на основі загальних рекомендацій. Проте при внесенні їх у ґрунти слід

додержуватися певних правил. Внесення рекомендованих доз добрив під деякі сільськогосподарські культури на різних типах забруднених радіоактивними речовинами ґрунтів зменшує вміст радіонуклідів у врожаї до 5 разів, а на легких піщаних та суглинкових ґрунтах до 10 разів.

Багатогранна роль, яку грають *мікроелементи* в житті рослин і взагалі живих організмів, дозволяє припустити різні механізми їх впливу на поведінку радіонуклідів у системі ґрунт-рослина. По-перше, деякі з них, будучи хімічними аналогами радіонуклідів, можуть вступати з ними в конкурентні відносини при надходженні з ґрунту в рослини. Наприклад, такі взаємодії можуть виникати між цинком і стронцієм, проявляючи синергізм з макроелементами, можуть стимулювати їх поглинання рослинами, тим самим створюючи конкурентні умови радіонуклідам. Такі взаємовідносини можуть виникати між міддю, марганцем, цинком з одного боку і кальцієм з другого; між бором, молібденом, марганцем - з одного і фосфором - з другого; літієм, бором, марганцем - з одного і калієм - з другого та інші. Зрештою, літій, наприклад, проявляє антагонізм по відношенню до стронцію і цезію та синергізм до калію і кальцію; цинк виявляє антагонізм до стронцію і синергізм як до калію і кальцію, так і до фосфору; мідь - антагонізм до цезію і синергізм до тих же калію, кальцію і фосфору.

Безперечно, роль мікроелементів в даному аспекті не обмежується лише взаємодією з радіонуклідами прямим чи опосередкованим через макроелементи шляхом. Вони можуть впливати на проникність клітинних мембран для радіонуклідів з певними іонними радіусами, зарядом, геометрією координатної та електронної конфігурацій; можуть активізувати або, навпаки, гальмувати системи транспорту окремих радіонуклідів; утворювати комплексні сполуки з різними речовинами, в тому числі і фізіологічно активними, котрі впливають на надходження радіонуклідів в рослини та їх пересування в окремі органи. І особливо гостро всі ці ефекти можуть проявлятися в умовах природного або штучного дефіциту мікроелементів. Саме тоді їх додаткове внесення може призводити до максимально виражених позитивних результатів.

Зміна структури сівозміни. Радіоактивні речовини поглинаються з ґрунту різними видами рослин з неоднаковою інтенсивністю і нагромаджуються в них у різних кількостях. Тому при плануванні заходів щодо зменшення їх надходження у сільськогосподарські рослини слід особливу увагу приділяти добору у сівозміні культур і сортів рослин.

У відношенні рослин до стронцію та цезію помічається природна кореляція між поглинанням кальцію та ^{90}Sr , з одного боку, і калію та ^{137}Cs - з іншого. Кальцієфільні бобові рослини інтенсивно поглинають ^{90}Sr , нагромаджуючи його в значних кількостях у своїх органах. Злаки, які поглинають кальцій у порівняно невеликих кількостях, мало нагромаджують також і ^{90}Sr . Тому нагромадження ^{90}Sr в різних видах рослин може відрізнятися в десятки разів.

Калієфільні рослини - люпин, кукурудза, капуста, картопля, буряки, інтенсивно поглинають ^{137}Cs . В порядку зменшення вмісту радіонуклідів у продовольчій частині окремі види рослин розподіляються так: зернові та зернобобові - люпин, овес, гречка, горох, ячмінь, пшениця, кукурудза, просо, соя, квасоля; овочеві - капуста, картопля, буряки, морква, огірки, томати; трави - вівсяниця, райграс, стоколос, конюшина, тимофіївка. Велике значення можуть мати сортові особливості рослин. Так, окремі сорти гороху можуть відрізнятися за здатністю нагромадження ^{90}Sr у зерні та соломі в 2,5 рази, а сорти ярої пшениці за здатністю нагромадження ^{137}Cs в зерні у 3, в соломі - майже у 2 рази. Різниця в нагромадженні ^{137}Cs залежно від сорту озимої пшениці становить до 5 разів.

Враховуючи такі істотні коливання у здатності різних сільськогосподарських рослин нагромаджувати радіоактивні речовини, доречно проводити селекційну роботу по створенню нових сортів з низькою здатністю акумулювати окремі радіонукліди.

З урахуванням здатності культур і їх сортів до нагромадження радіоактивних речовин, відповідні корективи в сівозміні можуть знизити рівень забруднення ними продукції рослинництва.

Фітодезактивація - один з небагатьох заходів, який передбачає очищення ґрунту від радіонуклідів. Більшість решти заходів мінімізації переходу їх в рослини базується на утриманні їх у ґрунті за допомогою зв'язування з іншими речовинами, переводом у нерозчинний стан, витісненні конкурентними способами з транспортних шляхів та іншими із сподіваннями на їх подальший природній фізичний розпад.

Фітодезактивація - це видалення радіонуклідів з ґрунту за допомогою спеціально вирощуваних на них рослин. Для цього застосовують види, що мають високі коефіцієнти накопичення (K_H) радіонуклідів і формуючих значну біомасу. Найбільш цим вимогам відповідає люпин, дещо в меншій мірі люцерна, також кукурудза та соняшник при вирощуванні на зелену масу, деякі травосумішки. При внесенні оптимальних та підвищених доз добрив, проведенні при необхідності зрошення, введенні у ґрунт активної мікробіоти (наприклад, силікатних бактерій, що прискорюють руйнування радіоактивних частинок та вивільнення радіонуклідів) та використанні інших чинників, що сприяють створенню оптимальних умов росту рослин та переводу радіонуклідів у доступний для них стан, можна суттєво підвищити виносення радіоактивних речовин з ґрунту. Оптимальна система сівозмін з високими значеннями K_H у рослин (2-10) і урожаєм біомаси (40-80 т/га) дозволяє протягом 5 років зменшити вміст радіонуклідів в ґрунті в 4-5 разів.

Перепорою на шляху широкого застосування фітодезактивації є труднощі утилізації великих мас забруднених радіонуклідами рослин. Технологічно вона вже вирішується. І є всі підстави вважати, що захід фітодезактивації ґрунтів знайде своє місце серед комплексних систем очищення ґрунту від радіонуклідів і способів мінімізації їх переходу у продукцію рослинництва.

В агроценозах процес спонтанної фітодезактивації триває постійно. Велика кількість радіонуклідів виноситься з урожаєм і на забруднених радіоактивними речовинами внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС територіях помітні суттєві відміни між рівнями радіоактивності ґрунтів сільськогосподарських угідь, що активно використовуються, і ґрунтів населених пунктів, під забудівлями, промисловими майданчиками, лісом. Порівняно високі темпи такої фітодезактивації на луках і пасовищах. Так, з урожаєм кормових трав за вегетаційний період може виноситься до 10-12% кількості радіонуклідів у ґрунті. Зрозуміло, що у цих випадках вони включаються у трофічні ланцюжки.

Управління режимом зрошення. Важливу роль у міграції радіоактивних речовин і їх надходженні в рослини відіграє зрошення. Зрошувальна вода поліпшує водний режим ґрунту, створює сприятливі умови для розвитку в ґрунті мікробіологічних процесів, розчиняє поживні речовини і робить їх доступними для рослин. Все це дає змогу керувати ростом і розвитком рослин і забезпечує стабільно високі врожаї. Але при зрошенні можуть бути створені сприятливі умови для надходження в них радіоактивних речовин.

Розрізняють три основних шляхи впливу зрошення на нагромадження радіоактивних речовин у рослинах:

1) при зрошенні відбуваються істотні зміни у водному режимі ґрунтів, внаслідок чого зростає рухливість радіоактивних речовин у ґрунті і їх доступність для кореневих систем рослин;

2) внаслідок змін характеру фізіологічних процесів, які взаємопов'язані із змінами у надходженні в рослини і транспортуванні поживних речовин, відбуваються зміни в нагромадженні як окремих макро- і мікроелементів, так і радіоактивних речовин;

3) при зрошенні радіоактивні речовини надходять у рослини по ланцюжках міграції, яких немає у богарному землеробстві.

На поливних землях можливі три шляхи переходу радіоактивних речовин у рослини: 1) тільки з ґрунту; 2) тільки із зрошувальної води; 3) комбінований, при якому радіоактивні речовини надходять у рослини як із ґрунту, так і із зрошувальної води. Така класифікація дає змогу виділити домінуючий шлях переходу радіоактивних ізотопів у рослини і визначити їх кількість.

Надходження радіоактивних речовин у рослини залежить від способу поливу - дощуванням (80% площ), чи поверхневого (біля 20% площ). Іноді застосовують підґрунтове і крапельне зрошення (біля 1% площ).

При дощуванні радіоактивні речовини поглинаються надземною частиною рослин з поливної води, яка потрапляє на листя, стебла, квітки, плоди; при поверхневому поливі та підґрунтовому зрошенні - корінням.

Радіоактивні речовини потрапляють у надземну частину та продуктивні органи сільськогосподарських культур при зрошенні двома шляхами: довгим - зрошувальна вода - ґрунт - коренева система - надземні органи і коротким -

зрошувальна вода - надземні органи. При короткому шляху міграції ізотопів радіоактивні речовини не поглинаються твердою фазою ґрунту. Якщо радіоактивні речовини містяться у воді, то надходження їх у рослини при дощуванні буде максимальним крізь надземні органи і частково крізь кореневу систему. При поверхневому поливі водою з радіоактивними речовинами надходження радіонуклідів дещо менше, оскільки частину з них поглинає ґрунт. Кількість поглинутих ґрунтом радіонуклідів збільшується при просочуванні води по капілярах ґрунту з глибинних шарів. Внаслідок цього мінімальним стає надходження радіоактивних речовин з води при підґрунтового поливі.

При поливі незабрудненою радіоактивними речовинами водою слід віддати перевагу дощуванню.

Поверхневий полив чистою водою сприяє глибокому промиванню ґрунту, переносу радіоактивних речовин з поверхні в кореневмісний шар, підвищенню рухомості радіонуклідів і надходженню їх у рослини. Підґрунтовий полив і в цій ситуації є доцільнішим.

Якщо радіоактивні речовини містяться і в ґрунті, і в зрошувальній воді, їх надходження у рослини збільшується.

Крім виду поливу, режим зрошення сільськогосподарських культур визначається також нормою поливу, кількістю поливів та строком їх проведення.

Норма поливу - це кількість води, потрібна на один полив одиниці площі, її слід відрізняти від зрошувальної норми, яка означає кількість води для поливу одиниці площі за весь період вегетації рослин. При поливі дощуванням саме норма поливу дає змогу визначити тривалість контакту надземної частини рослин із зрошувальною водою і відповідно - кількість радіонуклідів, які можуть потрапити в рослину. Головним фактором впливу на нагромадження радіоактивних речовин в урожаї є норма поливу. При її збільшенні з 100 до 1000 м³/га нагромадження ⁸⁹Sr в надземній частині пшениці зростає втричі, а в зерні - вдвічі. Нагромадження обох ізотопів інтенсивніше при збільшенні норми поливу до 500 м³/га.

Якщо за нормою поливу можна визначити кількість радіоактивних речовин, які надходять в рослини за один полив, то за *зрошувальною нормою* - за весь період вегетації рослини. Якщо при збільшенні норми поливу кількість радіонуклідів, які надходять у рослини, досягає ступеня насиченості, то збільшення кількості поливів повинно сприяти їх нагромадженню. Так, при однаковій зрошувальній нормі, але при зменшенні кількості поливів дощуванням у 2-3 рази, нагромадження радіонуклідів у рослинах зменшується в 1,5-4 рази.

При поверхневому зрошенні великі норми поливу сприяють вимиванню радіоактивних речовин у глибші шари ґрунту. Тому зменшення кількості поливів за рахунок збільшення поливної норми також зменшує надходження радіоізотопів у рослини.

Інтенсивність надходження радіоактивних речовин у рослини залежить також від *строків поливу*. При дощуванні на пізніших етапах вегетаційного періоду рослини містять більшу кількість радіоактивних речовин, оскільки збільшуються їх маса і розмір надземної частини. У пізні фази розвитку радіоактивні речовини можуть потрапляти безпосередньо на генеративні органи рослин, що призводить до збільшення їх вмісту у плодах. Виявляється така закономірність: чим ближче до збирання врожаю здійснюється полив, тим більше радіоактивних речовин нагромаджується у рослинах.

Рекомендації щодо запобігання надходженню і нагромадженню радіоактивних речовин у сільськогосподарських рослинах за допомогою регуляції режиму зрошення при поливі водою, що містить радіоактивні речовини:

1. При можливості вибору способу зрошення перевагу слід надавати поверхневому поливу.

2. У межах об'єму зрошувальної норми за рахунок збільшення норм поливу зменшити кількість поливів.

3. Віддавати перевагу поливам у першій половині вегетаційного періоду рослин.

4. Не допускати поливу дощуванням у період формування і дозрівання генеративних органів, особливо тоді, коли плоди є основною продукцією рослинництва.

Внесення спеціальних речовин і сполук. Для зменшення надходження радіоактивних речовин з ґрунту в рослини рекомендується вносити в ґрунт мінерали, здатні до їх сорбції. Особливо інтенсивно сорбують ^{90}Sr та ^{137}Cs ілліти та вермікуліти, дещо менше - монтморилоніти та каолініти. Ефективними сорбентами є такі мінерали, як флогопіт, асканіт, гумбрин, гідрофлогопіт, біотит, цеоліти та бентоніти. Внесення цих мінералів у ґрунт у дрібно-розмеленому стані у кількості, що становить 0,5-1% об'єму орного шару ґрунту, зменшує надходження радіоактивних речовин у рослини в кілька разів.

Ефективним є також внесення у ґрунт комплексонів - амінополікарбонових кислот та їх похідних, які можуть утворювати в ґрунті комплексні сполуки з радіонуклідами, сприяючи їх вимиванню з кореневмісного шару вглиб ґрунту.

При складанні рекомендацій щодо практичного застосування комплексних заходів зниження надходження радіоактивних речовин з ґрунту в рослини слід враховувати їх санітарно-гігієнічне значення й економічну ефективність. Навряд чи доцільно рекомендувати використання дорогих засобів, яке не зможе виправдати концепцію радіаційної безпеки «ризик-користь».

7.2.2. Засоби зниження надходження радіонуклідів в організм сільськогосподарських тварин

Основним джерелом надходження радіоактивних речовин в організм тварин є корми (понад 90%), основу яких становлять рослини, і меншою мірою - вода. Заходів, що зменшують перехід радіонуклідів з корму й води у продукти тваринництва, небагато. Це правильно складені раціони і введення в них добавок та препаратів, що запобігають такому переходу. Збалансовані раціони дають змогу зменшити надходження ^{90}Sr та ^{137}Cs в організм тварини в 2-5 разів.

Головним при складанні раціонів має бути постійний контроль за станом забруднення кормів радіоактивними речовинами. Так, коефіцієнти переходу ^{90}Sr та ^{137}Cs в молоко і м'ясо корів, у раціоні яких переважають зелені трави, у 1,5-2 рази вище, ніж у тварин, основу раціону яких становлять зерно та грубі корми. Сінний тип годівлі великої рогатої худоби більш сприяє надходженню ^{90}Sr та ^{137}Cs у м'ясо й молоко, ніж змішаний або силосно-концентратний раціон. Вища концентрація ^{90}Sr спостерігається у скелеті новонароджених телят і ягнят від корів та овець, які утримувалися протягом періоду вагітності на сінному раціоні, ніж на змішаному та концентратному.

Найбільш несприятливі умови ведення тваринництва на сільськогосподарських угіддях, забруднених радіоактивними речовинами, створюються при годівлі тварин кормами з природних лук.

Важливу роль у запобіганні переходу в організм сільськогосподарських тварин ^{90}Sr та ^{137}Cs відіграє оптимізація мінерального живлення - кальцієвого і калійного.

Кальцій є одним з найважливіших елементів, необхідних для забезпечення нормального здійснення багатьох життєвих процесів. В організмі тварин кальцію належить особлива роль. Він становить основу скелета, є головним мінеральним компонентом молока. При дефіциті в організмі його місце можуть займати хімічні аналоги, серед яких і стронцій. Тому порушення кальцієвого живлення може призвести до збільшення нагромадження в організмі ^{90}Sr . Збагачення раціону на корми, які містять кальцій, додавання мінерального підкорму у вигляді вуглекислих та фосфорнокислих солей кальцію є дешевим і доступним способом захисту від проникнення ^{90}Sr з органів травлення тварин у продукцію тваринництва.

Введення кальцію до раціону телят і поросят знизило відкладення в організмі ^{90}Sr майже в два рази, а у корів знижує кількість ^{90}Sr в молоці у 8-12 разів. При цьому збільшення його вмісту у кормах понад 80 г на добу, що є верхньою межею нормальної фізіологічної потреби тварин у цьому елементі (40-80 г на добу), практично не впливає на його нагромадження.

Враховуючи виключно важливе значення **калію** у функціональній діяльності багатьох фізіолого-біохімічних систем тварин, збагачення раціону за рахунок кормів з підвищеною його кількістю сприятиме зниженню нагромадження ^{137}Cs . Це насамперед кукурудзяний силос, картопля, кормові буряки, деякі види бобових рослин і кормових злакових трав.

Мало вивчений вплив натрію на нагромадження ^{137}Cs , який також є хімічним аналогом цього елемента, хоча й відома його роль у багатьох фізіологічних процесах. І враховуючи антагоністичні відношення в організмі між калієм і натрієм, можна припустити, що на надходження ^{137}Cs впливають не тільки абсолютні їх кількості в організмі, а й співвідношення між ними.

Важлива роль у зменшенні надходження радіонуклідів до організму сільськогосподарських тварин, а також у підвищенні стійкості тварин до іонізуючих випромінень належить **мікроелементам**. Особливо це стосується регіонів Полісся, ґрунти яких і, відповідно, корми бідні не тільки на вміст основних, а й біологічно важливих мікроелементів. Збагачення раціону на солі кобальту, цинку, міді, марганцю, заліза, йоду та іншими є важливим заходом в системі ведення тваринництва на забруднених радіонуклідами територіях.

Значний вплив на забруднення продукції тваринництва радіонуклідами має стан пасовищ. При слаборозвиненому чи вибитому травостої значна кількість радіонуклідів може надходити в організм тварин з частками ґрунту і тогорічною рослинністю, особливо навесні і пізно восени.

Тому докорінне поліпшення природних кормових угідь на забруднених радіоактивними речовинами територіях є не тільки засобом підвищення їх продуктивності, а й ефективним заходом зменшення переходу радіонуклідів з ґрунту в лучні трави. Це забезпечується створенням більш продуктивного травостою, загортанням забрудненої радіонуклідами дернини і формуванням нової, менш забрудненої. Проведення агротехнічних заходів слід супроводжувати внесенням вапна і мінеральних добрив у визначених кількостях і співвідношеннях. При перезалуженні ці компоненти треба вносити тільки після оранки, при дискуванні чи фрезеруванні.

Тільки загортання забрудненого шару ґрунту на глибину 5 см зменшує вміст радіоактивного цезію у травостої в 1,5 рази, а докорінне поліпшення природного сінокошу дає змогу знизити надходження радіонуклідів із ґрунту в лучні трави у 2-15 разів залежно від типу ґрунту, водного режиму, кількості вапняних матеріалів і добрив.

При цьому слід пам'ятати, що застосування таких заходів, як вапнування, збільшення доз фосфорних добрив, може призвести до зменшення в раціоні тварин кількості мікроелементів. Тому треба періодично уточнювати дози їх солей в раціоні.

Період піввиведення з організму людини ^{137}Cs становить 70 діб. Для ^{90}Sr цей строк досягає 50 років. Період піввиведення радіоцезію для сільськогосподарських тварин-савців становить 20-30 діб. Тому рекомендовано переводити тварин за кілька тижнів до забою на максимально «чисті» корми, хоч це лише частково зменшує вміст ^{137}Cs у продукції тваринництва.

Є речовини, які знижують перехід радіонуклідів з кормів у тканини тварин. Це *альгірати* натрію, калію, кальцію - солі альгінових кислот, які виділяються з деяких видів бурих водоростей. Додавання їх до раціону

тварин знижує відкладання ^{90}Sr у тканинах у 1,5-2 рази. Подібний ефект мають пектинові речовини, яких багато в коренеплодах, плодах кісточкових.

Дуже високою ефективністю щодо обмеження всмоктування ^{137}Cs у кишках ссавців відзначаються *фероціаніди* заліза, кобальту та нікелю - похідні фероцину (берлінської лазури). При їх введенні разом з кормами засвоюваність радіонукліда тваринами зменшується в десятки разів.

Кальцій і калій теж захищають тварин від дії іонізуючої радіації. Але вони не зменшують наслідків дії випромінень, а знижують надходження радіоактивних речовин в організм, тобто блокують їх. Тому їх називають *блокаторами*.

Є препарати, які прискорюють процес виведення з організму ссавців як ^{137}Cs , так і ^{90}Sr . До них належать комплексні препарати, здатні утворювати з більшістю катіонів, у тому числі з цезієм і стронцієм, міцні, проте добре розчинні у воді комплексні сполуки, які, беручи участь у метаболізмі, прискорюють їх виведення з організму. Цей клас сполук дістав назву *декорпораторів*.

7.3. Ведення особистого підсобного господарства в районах радіоактивного забруднення

Основні вимоги щодо ведення рослинництва і тваринництва на забруднених радіонуклідами територіях поширюються і на особисті підсобні господарства. Для безпеки проживання сільського населення при постійному споживанні в їжу місцевих продуктів харчування треба виконувати певні роботи. У рік випадання радіоактивних опадів доречно провести дезактивацію садиби - зняти і поховати верхній 5-см шар ґрунту. За допомогою цього заходу вдається знизити радіаційний фон і зменшити в подальшому забруднення рослин інколи в десятки разів.

На кислих ґрунтах раз у 4-5 років, після збирання врожаю, внести гашене вапно на всю площу присадибної ділянки, саду чи городу з розрахунку 50 кг на 100 м², після чого ґрунт перекопати або переорати. На ділянках під картоплю рекомендується дозу вапна зменшити в 2 рази. Можна використовувати й інші вапняні матеріали, але при визначенні дози слід враховувати вміст вапна в тому чи іншому матеріалі.

Треба збільшити норми фосфорних і калійних добрив, але лишити без зміни норми азотних. Найдоцільнішим для забруднених радіонуклідами ґрунтів слід вважати відношення азоту до фосфору і калію як 1:1,5:2 від норм, що рекомендовані для даних умов. Рівномірно розподілити добрива по поверхні ґрунту і перекопати на глибину 20-25 см. Під картоплю треба вносити половину зазначених доз.

Органічні добрива можна застосовувати в будь-яких формах - гній, компости, торф. Дуже корисним є пташиний послід, що містить у великих кількостях як основні елементи живлення рослин, так і вапно. Однак при внесенні органічних добрив треба упевнитись, що вони не містять великої кількості радіоактивних речовин.

Без обмежень можна використовувати торф'яний попіл, а деревинний краще тоді, коли спалюють дрова, а не хмиз, який може містити багато радіонуклідів.

Навесні або під осінь з городу і садової ділянки слід зібрати рослинні рештки і закопати їх у ямі завглибшки 1 м, яка розташована не ближче 10 м від колодязя, і засипати 25-30-см шаром чистої землі. Це зменшить вторинне потрапляння радіонуклідів у ґрунт.

Після проведення цих заходів овочеві культури, картоплю, коренеплоди, а також плодові та ягідні культури вирощують за загальноприйнятими технологіями, а врожай використовують без обмежень.

В особистому підсобному господарстві за таких умов дозволяється вирощування і відгодівля свиней та великої рогатої худоби. Проте за 1,5-3 місяці до забою худобу треба перевести на безвигульне утримання і годувати «чистими» кормами. Не забороняється використання кормів місцевого виробництва, але тільки після перевірки їх на вміст радіоактивних речовин, кількість яких не повинна перевищувати встановленої норми.

Використання для відгодівлі тварин природних пасовищ, особливо лісових, небажане, оскільки вони можуть містити багато радіоактивних речовин. Забруднене радіонуклідами молоко треба здавати на переробку. Сироватку і відвійки можна використовувати на відгодівлю молодняка.

Утримання м'ясної птиці не обмежується за умови, що вона за 1-1,5 місяця до забою переводиться на безвигульне утримання і годівлю кормами, незабрудненими радіоактивними речовинами. М'ясо птиці використовується у їжу майже без обмежень. Пух і перо можна відмивати у розчинах пральних порошків. Вільне утримання птиці небажане, бо воно може призвести до одержання яєць, що забруднені радіоактивними речовинами понад встановлені норми.

7.4. Очищення продукції сільського господарства від радіонуклідів технологічною переробкою

Проведення заходів щодо запобігання нагромадженню радіоактивних речовин у сільськогосподарських рослинах або організмі сільськогосподарських тварин на практиці може виявитися малоефективним, у зв'язку з чим вміст їх в одержаній продукції може перевищувати допустимі норми. Проте це не означає, що така продукція має бути знищена. При деяких технологічних переробках, які передбачають поділ продукції на кілька компонентів, виявляється, що переважна частина радіоактивних речовин зосереджується в одному з них. Нерідко таким компонентом стає побічний продукт переробки. Радіоактивні речовини надходять у рослини і далі в організм тварин переважно у формі розчинених у воді елементів. Тому зосереджуються вони у водній частині клітин і переходять під час переробки у водний розчин. Технологічна переробка, яка передбачає відокремлення води віджиманням, фільтруванням, центрифугуванням або іншими засобами, але не висушуванням, дезактивує продукцію.

7.4.1. Очищення продукції рослинництва

Дуже високого ступеня очищення можна досягти при переробці на крохмаль забрудненої радіоактивними речовинами картоплі. Технологія відокремлення крохмалю з бульб передбачає їх подрібнення з наступним відокремленням клітинного соку та добуванням крохмальних зерен промиванням водою. При цих операціях одержаний продукт містить радіоактивних речовин в 50 разів менше, ніж сама картопля. Аналогічно одержують крохмаль із зерна злаків. Крохмаль широко застосовується в харчовій промисловості для виготовлення кулінарних та кондитерських виробів, ковбас. Його переробляють на патоку, глюкозу, використовують як сировину для одержання лимонної, молочної та глюконової кислот, гліцерину, амілопектину, які використовуються у харчовій та фармацевтичній промисловості.

При переробці вуглеводомістких продуктів рослинництва на етиловий спирт практично всі радіоактивні речовини залишаються у середовищі бродіння. Одержаний внаслідок дистиляції продукт виявляється у тисячу разів чистішим, ніж вихідний матеріал. Етиловий спирт широко застосовується у народному господарстві: як розчинник у різних галузях промисловості; як вихідна сировина для одержання синтетичного каучуку, етилену, хлороформу, оцтової кислоти та інших органічних продуктів; як паливо для реактивних двигунів і двигунів внутрішнього згоряння тощо.

Забруднення радіоактивними речовинами безпечно й для цукрових буряків. Технологія одержання цукру з цукрових буряків складається з подрібнення коренеплодів на тонку стружку і наступного вимивання її гарячою водою, до якої разом з цукром переходять і всі радіонукліди. Але при наступних операціях виділення та очищення цукру отримують так званий «білий цукровий пісок» з вмістом радіоактивних речовин, у 50-70 разів меншим, ніж у коренеплодах. При рафінуванні цукрового піску відбувається додаткове очищення його від багатьох домішок, у тому числі від радіоактивних майже на 100%.

Надзвичайно високого ступеня очищення рослин від радіоактивних речовин досягають при виробництві рослинних олій (з насіння соняшнику, льону, сої, конопель, бавовни, кукурудзи тощо). Основна операція - екстрагування жирів - здійснюється за допомогою органічних розчинників, які не розчиняють ^{90}Sr , ^{137}Cs та інші радіоактивні ізотопи. Вже на цьому етапі можна одержати практично чистий від радіоактивних речовин проміжний продукт, який під час наступних процесів доводиться до надзвичайно високого ступеня чистоти. При переробці олійних культур практично в усіх випадках одержана олія придатна до безпечного вживання в їжу. Тому зазначені технічні культури рекомендуються для вирощування на забруднених радіоактивними речовинами територіях.

Непридатна для годівлі тварин забруднена радіоактивними речовинами свіжа вегетативна маса рослин може бути використана для виробництва харчового й кормового білка. Ця технологія передбачає виділення білка із

зеленої маси рослин віджиманням клітинного соку і наступною коагуляцією з нього згідно чистого білка, який містить в десятки разів менше радіоактивних речовин, ніж рослини, з яких його виробляють. Такий білковий препарат надзвичайно цінний продукт для харчової промисловості і його широко використовують при виготовленні ковбас, деяких видів консервів, сирів, хлібобулочних і кондитерських виробів, а також у вигляді добавок до кормів сільськогосподарських тварин і птиці.

Прикладом дезактивації продукції рослинництва за допомогою технологічних переробок є технології виробництва різних вуглеводів - сахарози, глюкози, фруктози, рафінози, інуліну, а також ферментів, вітамінів, амінокислот, органічних кислот, біологічно активних сполук.

Високорадіоактивні відходи, які залишаються після одержання основного продукту (вижимки та інші екстрагени) можуть бути використані для виробництва етилового спирту, а також як живильне середовище для отримання кормового білка за допомогою мікроорганізмів і дріжджів, які мають невисокі коефіцієнти нагромадження радіоактивних речовин.

7.4.2. Очищення продукції тваринництва

Технологічна переробка є ефективним способом дезактивації молока. Після сепарування незбираного коров'ячого молока лише 8-16% ^{90}Sr , ^{131}I та ^{137}Cs залишається у вершках, а решта переходить у відвійки. Дво- чи триразове промивання вершків теплою водою і знежиреним молоком зменшує кількість в них ^{90}Sr ще в 50-100 разів. При переробці вершків у вершкове масло значна частина ізотопів переходить у скотини і промивну воду. Концентрація ^{90}Sr , ^{131}I та ^{137}Cs у вершковому маслі при цьому зменшується до 36, 76 та 49% відповідно до їх концентрації у вершках. Перетоплення вершкового масла дає змогу видалити з нього практично повністю ^{90}Sr та ^{137}Cs і ще 10% ^{131}I . Тому із забрудненого радіоактивними речовинами молока доцільно виробляти вершки і вершкове масло.

Переробка молока на сир приводить до зниження вмісту ^{90}Sr та ^{137}Cs на 90%, а ^{131}I на 70%.

Існують також засоби, за допомогою яких можна очищати молоко від радіоактивних речовин без істотної зміни його хімічного складу та властивостей. Застосування пірофосфату, який зв'язує стронцій, дає можливість протягом однієї доби вилучити з молока до 83% ^{90}Sr . За допомогою іонообмінних смол можна швидко і досить ефективно очищати молоко й від інших радіоактивних речовин. Так, один об'єм відомого аніоніту Дауекс-2 дає змогу вилучити понад 95% ^{131}I з 230 об'ємів молока та 50% ^{90}Sr . За допомогою одного об'єму катіоніту можна вилучити близько 70% ^{137}Cs з 30 об'ємів молока. Електродіалізний метод очищення молока дає змогу вивести до 90% ^{90}Sr та до 99% ^{137}Cs , а на електродіалізній установці з аніонообмінними мембранами може бути вилучено 70-90% ^{131}I .

Оскільки окремі радіоактивні речовини розподіляються по органах і тканинах тварин нерівномірно, м'ясна продукція може істотно відрізнятись за

їх концентрацією в окремих частинах туші. Так, концентрація ^{90}Sr в кістковій тканині свиней перевищує його концентрацію в м'яких тканинах у 600-700 разів. ^{137}Cs нагромаджується здебільшого рівномірно у м'язовій тканині, а ^{131}I - переважно у щитовидній залозі. З урахуванням цих особливостей розподілу радіонуклідів частина продукції (м'язи, субпродукти) може бути використана безпосередньо для харчових потреб, а інша (щитовидна залоза в ранні періоди після надходження радіоактивних речовин, лімфатичні вузли) виведена з харчового ланцюжка.

Кулінарна обробка, яка складається з виварювання кісток і м'яса, є досить ефективним засобом очищення цієї продукції тваринництва. Виварювання кісток практично не впливає на вміст ^{90}Sr як і кальцію в структурі скелета. У бульйон переходить лише 0,009-0,18%, але вміст ^{137}Cs в них зменшується в 3-5 разів, тобто у бульйон переходить 67-80%. 50-60% ізотопу, нагромадженого в м'ясі, переходить у бульйон вже протягом перших 10 хвилин варіння. Знизити концентрацію радіоактивних речовин у м'ясі можна тривалим зберіганням його у засоленому вигляді з наступним вимочуванням. Застосування цих технологічних засобів (чотири обробки із зміною розчину) дає можливість зменшити вміст ^{137}Cs на 63-99%. Досить ефективним є також вимочування м'яса у воді, підкисленій лимонною, оцтовою та іншими органічними кислотами. При цьому ступінь дезактивації м'яса залежить від розмірів нарізаних шматочків, тривалості вимочування, кількості обробок, реакції середовища, нарешті, від ступеня забрудненості, хімічної природи радіоактивного ізотопу.

Перетоплення сала супроводжується переходом понад 95% ^{137}Cs у шкварки, внаслідок чого концентрація його в топленому жирі зменшується в 20 разів.

Тема 8. Використання іонізуючих випромінень в сільському господарстві

Нові дослідження в галузі загальної радіобіології відкрили широкі перспективи для використання виявлених закономірностей прояву радіобіологічних ефектів в різних сферах діяльності людини: медицині, сільському господарстві, мікробіологічній і харчовій промисловості та ін. При комплексному розвитку напрямів науки, технологій і техніки в радіаційній біології виникла нова галузь - прикладна, або практична, радіобіологія та інші, так звані радіаційно-біологічні технології, багато з яких широко застосовуються в сільському господарстві і насамперед у рослинництві.

Діапазон доз іонізуючих випромінень, які використовуються в сільському господарстві для різних цілей, досить широкий - від кількох сотих грея (сантигрей), що застосовуються для стимуляції росту і розвитку при опроміненні вегетуючих рослин і тварин, до десятків мільйонів грей для опромінення грубих кормів з метою поліпшення їх поживної цінності. Тому

для опромінення об'єктів сільськогосподарського виробництва потрібні джерела іонізуючих випромінень, які мають різні потужності і технічні можливості.

8.1. Радіаційна техніка в сільському господарстві

Основні вимоги, які ставляться до джерел іонізуючих випромінень, що використовуються в сільському господарстві, такі:

- 1) забезпечення визначеної поглинутої дози в межах точності, що вимагається;
- 2) рівномірне одержання дози по всьому об'єму продукції, що опромінюється;
- 3) відсутність наведеної радіоактивності в об'єкті опромінення;
- 4) забезпечення умов радіаційної безпеки;
- 5) забезпечення собівартості технології, тобто її економічна ефективність.

Найбільшого поширення в сільському господарстві набула радіаційна техніка на основі радіонуклідів ^{60}Co і ^{137}Cs завдяки таким їх характеристикам: 1) тривалості періоду піврозпаду (відповідно 5,3 і 30 років); 2) висока проникаюча здатність їх γ -випромінення; 3) відсутність наведеної радіоактивності в опромінених об'єктах; 4) можливість створювання джерел будь-якої питомої радіоактивності; 5) сприятливі з технологічної точки зору фізичні властивості джерел, що дають змогу тривалий час використовувати їх в автономних умовах в установках різних типів при мінімальних витратах енергії.

Конструктивно опромінювальні установки поділяють на три основних типи.

1. Джерело випромінення нерухоме, об'єкт опромінення переміщується до нього.
2. Джерело випромінення на час опромінення переміщується в робочу камеру з нерухомим об'єктом опромінення.
3. Джерело випромінення на час опромінення переміщується в робочу камеру, а об'єкти опромінення рухаються відносно нього.

Крім того, розрізняють стаціонарні та пересувні опромінювальні установки. *Перший тип установок* найбезпечніший, їх конструкція виключає ситуацію, за якої джерело випромінення залишилося б поза сховищем (звичайно свинцевим контейнером), тому вони дістали назву «самозахисних». До цього типу належать виробничі та дослідно-промислові установки «Колос», «Стебель», «Стерилизатор», «Генетик». У них об'єкт опромінення за допомогою різних пристроїв періодично або безперервно подається до закритого джерела випромінення, за рахунок чого досягається висока продуктивність установки, що дає змогу опромінювати протягом робочого часу велику кількість посівного і садивного матеріалу. Так, виробнича пересувна гамма-установка цього класу «Колос» - опромінювач, змонтований на базі вантажного автомобіля. Призначена для передпосівного

опромінення насіння в стимулюючих дозах і при дозах 7-10 Гр за годину опромінює до 1 т зерна. Насіння засипається в прийомний бункер і звідти по конвеєру надходить у блок опромінення. Проходячи через робочу камеру, в якій знаходиться набір джерел випромінення, воно протягом 0,5-1 хв. одержує необхідну дозу і зсипається в мішки. При опроміненні насіння безпосередньо в господарстві його відразу можна пересипати в сівалки. Дози опромінення в такій установці регулюються швидкістю руху конвеєра.

Аналогічно побудовані опромінювальні установки для радіаційної дезинсекції зерна. У них джерело опромінення являє собою вертикальний стержень, навколо якого по спіралі проходить канал-зернопровід. Зерно засипається зверху і, проходячи під дією сили тяжіння безперервним потоком по каналу, одержує необхідну дозу опромінення.

Гамма-установка другого типу - це звичайно приміщення з непроникними для випромінення стінами, в якому розміщено один або кілька джерел випромінення. Об'єкти опромінення розташовані в приміщенні на спеціальних столах, полицях в період, коли джерело сховане в укритті або в контейнері. Після того як обслуговуючий персонал залишає приміщення, воно автоматично чи механічно на необхідний час, що визначається дозою опромінення, переводиться в робочий стан.

За цим принципом влаштовано гамма-поле - своєрідна гамма-установка, в якій захисну роль відіграє земляний вал висотою у 5-6 м. Вал утворює своєрідний циліндр діаметром в кілька десятків метрів, в центрі якого на висоті 3-5 м розміщується джерело випромінення. Воно теж дистанційно може переводитись з режиму схову в робочий стан. гамма-поле призначене переважно для вивчення хронічної дії радіації на рослини, що залежно від дози вирощуються на різній відстані від джерела випромінення. На ньому можуть бути розміщені також клітки з тваринами.

До другого типу можна віднести й пересувну установку «Гамма-панорама». Це комплекс з кількох захисних блоків, в кожному з яких розміщено джерело випромінення. За допомогою спеціального ротора воно може займати режим схову - «зберігання» чи робочий стан - «опромінення». Блоки транспортуються вантажною машиною, яка обладнана гідравлічним підіймачем, і залежно від мети і об'єктів опромінення можуть встановлюватися в будь-якому безпечному місці в одній або двох паралельних площинах чи по колу, утворюючи рівне дозове поле в просторі. Воно може вимірюватись десятками кубічних метрів. Управління установкою блоків і процесом опромінення здійснюється дистанційно з пульта, що розміщений на автомобілі.

Перевага установок другого типу полягає в тому, що об'єкти опромінення практично не обмежені в об'ємі розміром робочих камер і транспортних обладнань, обов'язкових для установок першого типу. Це значно підвищує їх продуктивність, що дає можливість опромінювати великі партії різної сільськогосподарської продукції. Проте ступінь безпеки таких установок нижчий, ніж у перших. Якою б надійною не була система

автоматичного або механічного управління джерелами випромінення, в таких конструкціях теоретично неможливо повністю захистити обслуговуючий персонал від випромінення.

Третій тип установок є варіантом поєднання установок першого і другого типів. Це в основному опромінювачі, призначені для промислових цілей. Прикладом може бути установка для опромінення картоплі та інших овочів перед їх закладанням у сховища з метою пригнічення проростання. Вона подібна до установок другого типу - приміщення з непроникними для випромінення стінами і розміщеним у центрі джерелом, яке при потребі дистанційно може переводитися в стан «Зберігання» чи «Опромінення». Проте в даній системі об'єкти опромінення не встановлюються нерухомо в цьому приміщенні, а конвеєром через лабіринт, який виключає можливість проникнення радіації за межі установки, безперервно надходять у зону опромінення.

8.2. Радіаційно-біологічні технології в рослинництві

Як зазначалось, саме в дослідах з рослинами на початку розвитку радіобіології був встановлений ефект *радіаційної стимуляції*, описаний як прискорення проростання опроміненого іонізуючою радіацією насіння, і саме в рослинництві він набув широкого практичного застосування. В кінці 20-х рр. після відкриття явища радіаційного мутагенезу у мікроорганізмів і комах, він був показаний на рослинах. Дослідження і вивчення порівняльної радіочутливості різних видів організмів були покладені в основу застосування іонізуючих випромінень для запобігання проростанню деяких видів продукції рослинництва при зберіганні, радіаційній пастеризації, консервації, стерилізації. Під впливом робіт у галузі радіаційної імунології була створена радіаційно-біологічна технологія подолання несумісності тканин при вегетативних щепленнях рослин.

Нині у світовому рослинництві впроваджено понад 30 різних радіаційно-біологічних технологій, деякі з яких розглянуті в цьому розділі.

8.2.1. Передпосівне опромінення насіння сільськогосподарських культур для прискорення проростання, розвитку та підвищення продуктивності рослин

Практично відразу після відкриття явища радіаційної стимуляції привернуло увагу біологів-агрономів як можливість підвищення урожайності сільськогосподарських рослин. Тепер передпосівне опромінення насіння - це радіаційно-біологічна технологія, яка дає змогу збільшити економічну ефективність вирощування рослин за рахунок прискорення росту, розвитку, скорочення періоду вегетації, підвищення врожаю, а в деяких випадках і поліпшення його якості.

Впливаючи на хід процесів обміну речовин, опромінення насіння може приводити до збільшення в рослинах вмісту окремих речовин, які характеризують якість продукції рослинництва, а саме підвищити вміст білка

в зерні зернових та зернобобових культур, цукру в цукрових буряках, жиру в насінні соняшнику, вуглеводів і вітамінів в овочах. Передпосівне опромінення може збільшувати, рідше зменшувати кількісний вміст окремих речовин, але ніколи не призводить до виникнення нових і виключає появу будь-яких токсичних речовин. При цьому воно може стимулювати також нагромадження, точніше деяке збільшення, малоприємних з точки зору споживача сполук, наприклад алкалоїдів, глікозидів.

За рахунок стимуляції росту часто відмічають збільшення довжини і міцності волокна у льону, конопель, бавовни - показників, які характеризують якість продукції цих технічних культур.

Стимуляція процесів розвитку іноді прискорює дозрівання рослин, як правило, на кілька днів, але для деяких видів овочевих культур, наприклад огірків, томатів, і такий строк має значення.

Вже в перших роботах з передпосівного опромінення насіння було встановлено, що при оцінці продуктивності рослин стимулююча дія проявляється не завжди. Іноколи при тих самих дозах спостерігають навіть негативні ефекти, тобто пригнічення росту і розвитку рослин. Це стало причиною того, що деякі дослідники, визнаючи в цілому існування радіаційної стимуляції, заперечують можливість практичного її застосування. Тому, незважаючи на позитивні результати, ця біотехнологія ще не дістала широкого застосування.

Незадовільне підвищення урожаю при передпосівному опроміненні насіння в стимулюючих дозах пояснюється двома основними причинами: значним варіюванням радіочутливості різних партій насіння і погодними умовами окремих років. За даними аналізу про масове випробування прийому на території України в 60-70-ті рр. приблизно в 35% випадків спостерігався позитивний ефект - підвищення врожаю становило від 7-8 до 30-35%. В такій самій кількості випадків не спостерігали ніякого впливу опромінення. В інших (близько 30%) спостерігалось зниження продуктивності рослин, проте воно ніколи не перевищувало 10%. У зв'язку з тим, що в результаті позитивна дія опромінення була набагато вищою за негативну, можна вважати, що в цілому було досягнуто підвищення продуктивності рослин.

Очевидно, якщо опромінювати весь посівний матеріал, наприклад насіння цукрових буряків або кукурудзи на калібрувальних заводах, можна розраховувати на стабільне (10-15%) підвищення врожаю.

8.2.2. Передсадивне опромінення органів вегетативного розмноження та розсади для прискорення розвитку і підвищення продуктивності рослин

Стимулююча дія іонізуючого випромінювання проявляється при опроміненні не тільки насіння, а й окремих вегетативних органів і вегетуючих рослин в цілому. Дози радіації при цьому бувають значно

меншими за ті, які використовують для опромінення насіння і, як правило, вимірюються десятими частками і одиницями грея.

Серед сільськогосподарських культур, які вегетативно розмножуються, найбільша робота в цьому напрямі проводиться з картоплею. Максимальної стимуляції росту картоплі досягають при опроміненні бульб дозами 0,55 Гр - приріст урожаю досягає 20-30%.

Досить перспективним є передсадивне та передприщепне опромінення живців рослин. Так, дози 3-10 Гр стимулюють коренеутворення у живців, посилюють ріст і розвиток пагонів, активізують процеси обміну речовин. Це сприяє збільшенню кількості укорінених рослин, підвищенню врожайності кущів. Опромінення живців яблуні, груші, вишні, сливи та багатьох інших плодових культур значно поліпшує зрощення при щепленні, збільшує вихід прищеплених саджанців.

При передсадивному опроміненні кореневищ м'яти, солодки, діаскареї дозами 5-10 Гр на них пробуджується багато сплячих бруньок і утворюються додаткові пагони, що збільшує кількість зеленої маси. Опромінення вусиків суниці дозами 5-15 Гр підвищує врожай ягід на 20-30%. На 10-30% підвищується врожай зеленої маси при опроміненні цибулин цибулі-ріпки і часнику дозами 0,5-3 Гр. Опромінення розсади томатів, овочевого перцю, баклажанів, капусти та інших культур дозами 0,3-5 Гр підвищує врожай на 25-35% і прискорює його дозрівання.

8.2.3. Опромінення насіння і рослин з метою одержання нових сортів

Після відкриття мутагенної дії іонізуючого випромінювання його стали використовувати для одержання нових форм живих організмів. Але як метод виведення нових сортів з цінними господарсько-корисними ознаками радіаційний мутагенез набув широкого застосування в селекції рослин.

Процес одержання нового сорту з використанням іонізуючого випромінювання складається з двох основних етапів: 1) опромінення для одержання максимальної кількості мутантних форм як вихідного матеріалу для селекції; 2) на основі цих мутантів виведення за допомогою загальноприйнятих способів і методів нового сорту, його випробування, розмноження і застосування у виробництві.

Специфічним етапом, який має відношення до радіобіології, є перший. Він полягає у підборі доз опромінення насіння чи іншого садивного матеріалу, які індукують виникнення великої кількості нових форм рослин при збереженні живучості достатньої їх кількості.

Кількість мутацій, що виникають під впливом іонізуючого випромінювання, прямопропорційна дозі опромінення, але зворотно пропорційна дозі виживання організмів і їх здатності до розмноження. Тому слід використовувати дози, при яких вихід мутантних форм досить високий і виживає достатня для розмноження кількість організмів. Такою дозою часто вважають ЛД₇₀ (іноді ЛД₉₀), при якій виживає близько 30% (відповідно 10%) рослин, частина з яких здатна дати насіння, її називають критичною дозою,

бо лише незначне її підвищення може призвести до загибелі всієї сукупності рослин.

З метою радіаційного мутагенезу можна опромінювати рослини і в період вегетації, наприклад в умовах гамма-поля. Деякі дослідники вважають, що при опроміненні вегетуючих рослин виникає більше життєздатних мутацій. Але цей спосіб менш зручний і застосовується рідше, ніж опромінення насіння.

Говорячи про збільшення кількості мутацій під впливом іонізуючих випромінень, зазначимо, що радіація не індукує виникнення нових типів мутацій порівняно з виникаючими при природному мутагенезі. Вона тільки збільшує їх кількість, що полегшує роботу селекціонерів, даючи їм велику кількість матеріалу для відбору. Але при збільшенні частоти появи різних типів мутацій збільшується імовірність виявлення деяких, які з'являються в нормі дуже рідко. Це також може підвищувати ефективність селекційно-генетичної роботи. І хоч неодноразово писалося про випадки нібито виникнення при опроміненні нових типів мутацій, як правило, виявлялось, що селекціонер зустрічався саме з такою рідкою формою.

До цього часу за допомогою іонізуючого випромінення в 40 країнах світу одержано понад 1500 сортів культурних рослин, що відрізняються від вихідних батьківських форм підвищеною врожайністю, стійкістю проти хвороб, скоростиглістю, підвищеною опірністю до полягання та з іншими господарсько-корисними ознаками. Серед них одержані українськими вченими скоростиглі, високоврожайні, стійкі проти низьких температур і хвороб сорти гречки Аеліта, Лада, Галлея, низько-алкалоїдні сорти люпину Мутант 486, Київський мутант, сорт м'яти Зимостійка 1, сорт тютюну Безпасинковий.

8.2.4. Радіаційна біотехнологія подолання несумісності тканин і стимуляція зрощення при вегетативних щепленнях рослин

Відомо, що за допомогою щеплення - приживлення частини однієї рослини до іншої було вирішене найважливіше завдання - збереження властивостей та цінних ознак у видів рослин, які нездатні до вегетативного кореневовласного розмноження. Проте нерідко при міжсорткових, а тим більше при міжвидових щепленнях зрощення прищепи й підщепи буває ускладненим або не відбувається зовсім. Головною причиною цього є так звана біологічна несумісність чужорідних організмів.

В основі біологічної несумісності тканин лежить імунітет - природна захисна реакція будь-якого здорового організму від проникнення в нього чужорідної речовини, що спрямована на збереження його цілісності та біологічної індивідуальності.

З явищем несумісності тканин стикаються медики під час пересадок людині окремих органів - нирок, серця, легенів тощо, використовуючи для її подолання спеціальні речовини - імунодепресанти, тобто речовини, які пригнічують імунітет. Ефективний імунодепресант, що сприяє подоланню

«конфлікту несумісності» - іонізуюче випромінення, звичайно рентгенівське або γ -випромінення. Під їх дією в клітинах і тканинах порушуються процеси обміну, у тому числі білкового, який відповідає за функціонування імунних систем. Це призводить до зниження бар'єрної функції імунітету та можливості подолання тканинної несумісності.

Теоретичні основи і практичні можливості подолання біологічної несумісності у рослин за допомогою іонізуючої радіації були, розвинуті у працях українських учених Д.М. Гродзинського і А.А. Булаха. Вони показали, що γ -опромінення прищепи чи підщепи або обох перед щепленням приводить до пригнічення імунної системи рослин і підвищує імовірність і якість їх зрощування. Цей спосіб був покладений в основу радіаційно-біологічної технології підготовки лози у прищепленому виноградарстві.

Відомо, що філоксера - комаха підряду попелиць є найнебезпечнішим шкідником європейських сортів винограду. Філоксера пошкоджує листя, пагони, вусики, а головне - підземний штаб і кореневу систему виноградної лози. Найбільш надійний спосіб боротьби з нею - щеплення європейських сортів на філоксеростійкі американські підщепи. Проте внаслідок поганої сумісності вітчизняних сортів з американськими вихід стандартних саджанців становить всього 20-35% загальної кількості зроблених щеплень, а деякі комбінації не зрощуються взагалі. γ -опромінення прищепи дозами 15-30 Гр або обох компонентів дає змогу в 2-3 рази підвищити кількість щеплень у важкосумісних комбінаціях та індукувати їх появу у зовсім несумісних.

Крім того, опромінення підщеп сприяє запобіганню вкрай важливої і досить трудомісткої операції - так званого «осліплення» їх, або видалення бруньок. Справа в тому, що бруньки підщепи, розвиваючи пагони, відволікають на себе поживні речовини. Це призводить до поганого її зростання з прищепою. Тому обов'язковим елементом сучасної технології виробництва щепленого виноградного садивного матеріалу є видалення бруньок, яке здійснюють вручну. Спеціальні машини для механічного вилучення бруньок забезпечують порівняно високу продуктивність, але потребують великих додаткових витрат. До того ж як при ручному, так і при машинному «осліпленні» підщеп на місці видалених бруньок утворюються рани, крізь які в рослину може проникати інфекція. Це також негативно впливає на якість матеріалу.

Виявилось, що опромінення підщеп пригнічує проростання бруньок. При дозі 25 Гр вдається досягти понад 90% «осліплення» (при ручному або механічному не більш як 75%). При вищих дозах можна досягти 100% ефекту. Проте в цьому разі може погіршитись зрощення прищепи та підщепи і уповільнитись ріст і розвиток саджанців.

Для цієї біотехнології використовують гамма-установку «Стерилізатор». За її допомогою в період проведення прищепної кампанії можна обробляти до 20 млн. чубуків підщеп. І як показали багаторічні

випробування, це не впливає негативно на наступний розвиток і продуктивність винограду.

Загалом, опромінення прищепних частин рослини виявляється ефективним і при вегетативних щепленнях плодових культур. Воно значно полегшує отримання вегетативних гібридів навіть при міжродових комбінаціях типу яблуня-груша, слива-абрикос, абрикос-персик, малина-ожина тощо, одержати які без застосування імунодепресантів майже неможливо.

8.2.5. Радіаційна біотехнологія запобігання проростанню бульб, коренеплодів і цибулин при зберіганні

При тривалому зберіганні таких видів продукції рослинництва, як картопля, коренеплоди, цибуля, часник, погіршується їх якість за рахунок подовження процесів обміну та проростання. Традиційні способи збільшення строків зберігання ґрунтуються на гальмуванні процесів обміну за допомогою зниження в сховищах температури або хімічної обробки продукції обприскуванням, обпиленням, обкурюванням спеціальними речовинами - інгібіторами метаболізму. Перший спосіб досить ефективний, але надзвичайно дорогий внаслідок великих витрат електроенергії; другий - трудомісткий, малопридатний для боротьби з проростанням цибулин, у яких зона росту на відміну від картоплі та коренеплодів знаходиться глибоко всередині, а головне цей спосіб не завжди безпечний для споживача.

За допомогою опромінення таких видів продукції вдається затримати чи при потребі зовсім пригнітити проростання. Так, γ -опромінення картоплі перед закладанням у сховище дозами 50-150 Гр залежно від сорту та умов зберігання сприяє благополучному перенесенню періоду весняного потепління і зберіганню її до нового врожаю в умовах звичайних неохолоджуваних сховищ при температурі 6-8°C. Бульби не проростають взагалі. Але при підвищених температурах за рахунок хімічних процесів в них може розпочатись розпад крохмалю, що призводить до погіршення їх кулінарних та смакових якостей. Збільшується в цих умовах і ймовірність загнивання.

Опромінення дозами, близькими до вказаних, дає змогу подовжити в 2-2,5 рази строки зберігання коренеплодів - буряків, моркви, брукви, редьки та ін.

Позитивні результати дає опромінення цукрових буряків. Звичайно при зберіганні в буртах в «очікуванні» строків переробки за рахунок продовження дихання цукристість коренеплодів може знизитись в 1,5-2 рази і більше. γ -опромінення буряків перед складанням у бурти дає змогу значно зменшити ці втрати.

Опромінення цибулі та часнику після збирання врожаю дозами 6-8 Гр збільшує строки зберігання до двох років за умови підтримання оптимальних температури та вологості.

Зрозуміло, що опромінена такими дозами продукція не може бути використана як садивний матеріал, вона придатна тільки для харчових і кормових цілей або технологічної переробки.

8.2.6. Використання іонізуючих випромінень для подовження строків зберігання ягід, фруктів та овочів

Значна кількість продукції рослинництва і плідництва гине після збирання внаслідок гниття, яке спричинюється різними мікроорганізмами. Звичайні способи подовження строків зберігання такої продукції пов'язані з різними обробками, які ґрунтуються на процесах нагрівання, охолодження або на хімічній обробці. Всі вони призводять до зміни властивостей і, як правило, погіршують якість. Опромінення дозами, що сповільнюють розвиток мікрофлори або повністю пригнічують її активність, по суті є процесами відповідно холодної пастеризації або стерилізації, при яких у продукції знищуються майже всі або всі мікроорганізми. Таку опромінену продукцію можна тривалий час зберігати при температурі навколишнього середовища.

Особливої уваги заслуговує проблема зберігання продукції, що легко травмується при збиранні і транспортуванні та пошкоджується мікроорганізмами (суниці, вишні, черешні, абрикоса, персика, томатів, баклажанів тощо).

Найбільш переконливі дані одержано при γ -опроміненні суниць, полуниць, малини, чорної смородини. Дози 2-3 кГр - півлетальні для більшості видів мікроорганізмів, подовжують строк їх зберігання при температурі 15-18°C у 2, а при 4-5°C в 2,5-3 рази. Це дає змогу транспортувати ягоди на великі відстані.

Серед овочів найбільш піддаються гниттю томати. Опромінення їх плодів такими самими дозами (2-3 кГр) істотно подовжує строки зберігання. Особливо вражаючі результати дає опромінення непошкоджених при збиранні плодів, які зберігаються при температурі не вище 10°C, при цьому строк зберігання зростає в 3-4 рази. Аналогічні дані одержано при опроміненні сливи, вишні, абрикоса, персика, винограду.

При опроміненні фруктів та овочів було виявлено вплив радіації на сповільнення строків їх дозрівання. Так, γ -опромінення плодів лимонів і томатів дозою 3 кГр затримує дозрівання на 10-15, плодів бананів дозами 0,25-0,5 кГр - на 8-26 діб, плодів апельсинів дозами 0,14-2,8 кГр - на 2-3 тижні. Це також має значення при подовженні строків зберігання цих видів продукції, що особливо важливо при їх транспортуванні на великі відстані.

8.2.7. Радіаційна консервація продукції рослинництва і плідництва

Дози γ -випромінення понад 10 кГр зумовлюють загибель більшості видів мікроорганізмів і можуть бути застосовані для радіаційної консервації продукції. Його використовують для обробки як свіжих овочів і фруктів, так і продуктів їх переробки, наприклад соків. Найважливішою, унікальною

властивістю радіації в даному випадку є те, що при її застосуванні як консервуючого засобу можна не додержувати стерильності при підготовці та упаковці продукції в герметичну тару. Іонізуюче випромінення, яке має велику проникну здатність, дає змогу здійснювати процес стерилізації безпосередньо в упакованому вигляді в будь-яку тару - пластмасову, скляну, металеву.

Крім того, на відміну від термічної обробки, яка використовується при традиційному консервуванні, при радіаційній в продукції не зменшується вміст вітамінів.

Але за рахунок радіаційного руйнування при таких високих дозах деяких пігментів, утворення продуктів окислення можуть змінюватись колір та смакові якості продуктів.

8.2.8. Радіаційні способи боротьби з комахами - шкідниками сільськогосподарських рослин

При вдосконаленні способів боротьби з комахами - шкідниками сільськогосподарських культур було розроблено різні методи застосування для цих цілей іонізуючого випромінення. При цьому треба знати точну радіочутливість не тільки різних видів комах, а й окремих стадій їх розвитку.

Відомо кілька шляхів застосування радіації для захисту рослин від шкідників.

Метод радіаційної статевої стерилізації комах. Основою методу й різниця в радіочутливості соматичних і статевих клітин будь-якого організму. Для комах можна підібрати такі дози, при яких вони нормально або майже нормально виконують більшість фізіологічних функцій, в тому числі зберігають здатність до спарювання. Але при цьому в статевих клітинах, як більш радіочутливих, відбуваються незворотні зміни: самці втрачають здатність до запліднення, тобто стають стерильними.

Життєздатність комах, як окремого виду, визначається їх винятковою плодючістю. Відомі види, які спроможні відкладати за кілька місяців свого життя десятки тисяч яєць. За рахунок цього випуск в популяцію комах стерильних самців може різко зменшити темпи її росту та чисельність. При неодноразовому повторенні прийому протягом кількох років можна повністю знищити вид в окремому регіоні.

Порівняно з іншими методами, зокрема з найбільш широко використовуваним для боротьби з комахами - хімічним, даний прийом має переваги. Основна з них полягає в тому, що метод радіаційної статевої стерилізації спрямований проти лише одного конкретного виду комах, тоді як хімічні речовини діють і проти інших, у тому числі й корисних комах, наприклад бджіл, мурашок. Через це метод нешкідливий для тварин і людини та інших живих об'єктів біосфери, тобто він є екологічно чистим.

Застосування біотехнології передбачає три основних етапи. *Перший етап* - розведення комах-шкідників визначеного виду на спеціальних біофабриках. *Другий етап* - опромінення комах, якому передуює старання

досліджувальна робота з визначення радіочутливості виду. Для цього комах вміщують у спеціальні камери з температурою 4-8°C, при якій пригнічується їх фізіологічна активність і вони втрачають рухомість, а потім збирають у контейнери, в яких і проводять опромінення. Далі до випуску в поле комахи можуть деякий час (кілька днів чи тижнів) зберігатися в цих же контейнерах або в іншій тарі також при зниженій температурі. Іноді опромінення проводять на природній нерухомій стадії розвитку комахи, частіше всього лялечки. *Третій етап* - випуск опромінених комах у поле (найтефективнішим є розсіювання з літака або вертольота).

Відомі приклади успішного застосування цієї біотехнології. У США (штат Каліфорнія) за її допомогою була значно зменшена чисельність злісного шкідника - середньоморської плодової мухи. У Канаді (провінція Британська Колумбія) таким шляхом була майже знищена яблунева плодожерка. Для захисту від мігруючих популяцій цих видів комах підтримують спеціальні карантинні бар'єри, які полягають в систематичному випуску (раз на 2-3 тижні) невеликої кількості стерильних комах. Незважаючи на складність біотехнології, цей шлях боротьби з комахами-шкідниками економічно вигідніший, ніж застосування інсектицидів.

Радіаційна дезинсекція зерна. Комахи - шкідники сільськогосподарських рослин завдають великих втрат зібраного врожаю, знищуючи близько 15% світових запасів зерна під час його зберігання. Якісні збитки ще більші, бо комахи виїдають здебільшого внутрішню, найпоживнішу частину зерна з високим вмістом білка.

Найпоширеніші серед комах - шкідників зерна комірний, кукурудзяний та рисовий довгоносики, сурінамський борошноїд, зерновий шашіль, борошняний жучок та ін. Для боротьби з ними застосовують переважно хімічні методи, які не завжди безпечні для людини. У зв'язку з цим був розроблений і набув поширення, у тому числі в Україні, радіаційний спосіб дезинсекції зерна, тобто обробка його іонізуючим випроміненням (γ - або електронне) перед завантаженням в елеватори чи інші сховища.

Доза дезинсекції - летальна для комах. Для більшості їх видів вона становить 100-500 Гр. Саме тому дози, рекомендовані для дезинсекції, як правило, знаходяться в цих межах. Але при дезинсекції окремих партій зерна слід враховувати видову радіочутливість комах, а, можливо, й стадію розвитку в момент радіаційної обробки. Так, для яєць і личинок комірною довгоносика летальна доза дорівнює 55 Гр, а кукурудзяного - 40 Гр. Для стадій лялечки та імаго цих видів вона досягає 200 Гр. Для загибелі яєць, личинок, лялечок на ранній і пізній стадіях та імаго сурінамського борошноїда потрібні дози відповідно 96, 86, 144, 308 і 206 Гр. Доза 250 Гр є летальною для зернового шашеля у всі стадії розвитку. Вказані дози є відправними при рекомендаціях для радіаційної дезинсекції зерна, яке заражене цими видами комах.

Опромінення успішно застосовують для дезинсекції інших продуктів, зокрема сухих фруктів. γ -випромінювання дозою 1 кГр знищує повністю всі види комах, які можуть їх заражати.

8.3. Радіаційно-біологічні технології в тваринництві

Масштаби використання іонізуючого випромінювання в тваринництві поки що поступаються перед такими в рослинництві через різні причини, головною з яких є менша технологічність багатьох об'єктів тваринництва.

Найбільшого практичного застосування стимулююча дія випромінювання набула в птахівництві. γ -опромінювання курячих яєць до або в період інкубації дозами 0,03-0,05 Гр скорочує строки інкубації, збільшує вилуплювання курчат, прискорює їх ріст і розвиток. Кури, які виростають з опромінених яєць, раніше починають яйцекладку. Опромінення курчат дозами 0,2-1 Гр прискорює їх ріст, розвиток та початок яйцекладки. Опромінення добових поросят дозами 0,1-0,25 Гр збільшує масу тіла. Опромінення сперми радужної форелі дозами 0,25-0,5 Гр на 35-40% збільшує запліднення ікри. Перелік подібних прикладів можна продовжити, але більшість з них має дослідницький характер. Тільки використання стимулюючих доз у птахівництві доведено до рівня виробничих випробувань.

Не набув широкого застосування в тваринництві і метод радіаційного мутагенезу. Як один з найбільш вдалив випадків можна відзначити виведення за його допомогою в Новосибірську породи норки з сріблястим кольором хутра. В деяких країнах розпочиналися спроби щодо застосування випромінень для одержання нових порід інших дрібних тварин - домашньої птиці, овець, свиней, але про позитивні результати не повідомлялось.

Метод радіаційної статевої стерилізації комах використовується і для боротьби з шкідниками свійських тварин, зокрема з переносниками деяких хвороб - м'ясоїдною мухою і мухою цеце.

Деякі радіаційно-біологічні технології, які тією чи іншою мірою пов'язані з тваринництвом чи обробкою його продукції, розглянуто далі.

8.3.1. Радіаційне консервування кормів і поліпшення їх якості

Іонізуюче випромінювання використовують для консервування свіжих, знезараження концентрованих та комбінованих кормів, а також для модифікації целюлозомістких кормів з метою поліпшення їх поживних якостей при годівлі сільськогосподарських тварин.

Гамма-опромінювання зеленої маси рослин дозами 10-40 кГр замінює силосування і сприяє доброму зберіганню протягом зимового періоду. Ці дози не призводять до істотних хімічних змін і не впливають на смакові і поживні якості корму.

Опромінення фуражної картоплі дозами 5-15 кГр запобігає гниттю бульб.

З метою збільшення строків зберігання за рахунок пригнічення розвитку плісені та зменшення бактеріального обсіменіння опромінюють

фуражне зерно (овес, ячмінь, кукурудзу) з підвищеною вологістю дозами 1-3 кГр.

Відомо, що великою небезпекою для людини і тварин є сальмонельоз - гостре інфекційне захворювання кишок, яке спричинюється бактеріями роду сальмонели. Вони потрапляють в організм тварин разом із зараженим кормом, а потім через молоко, м'ясо, яйця та інші продукти - в організм людини. Звичайні способи боротьби з сальмонелою малоефективні або економічно не вигідні, а сильні хімічні препарати небезпечні для здоров'я і тварин, і людини. Термічна обробка кормів призводить до втрат поживних речовин. Радіаційний спосіб боротьби з бактерією виявився досить результативним, і тому була розроблена радіаційна технологія знезараження кормів від сальмонели.

Дози, які використовують для боротьби з сальмонелою, летальні для всіх її різновидів і становлять близько 4-5 кГр. Опромінення цими дозами повністю знезаражує борошняні корми і комбікорми, призначені для годівлі свиней, курей та інших тварин. У деяких країнах з цією метою рекомендують опромінювати такі корми, як м'ясо-кісткове та рибне борошно.

Для підвищення поживних якостей грубих целюлозомістких кормів - соломи злакових культур, стрижнів кукурудзяних качанів, гілля, хвої і навіть деревного борошна - їх можна опромінювати дозами 1-10 МГр. При цьому відбувається радіаційно-хімічна деполімеризація целюлози та пектину, а також виділення з корму лігніну, що підвищує їх здатність до ферментації, поліпшує використання клітковини мікроорганізмами рубця жуйних тварин.

Спосіб радіаційної обробки кормів порівняно з іншими способами їх консервації, знезараження, поліпшення якості має великі переваги. Опромінення дає змогу зберегти поживну цінність кормів, бо на відміну від температурної обробки радіаційна не руйнує біологічно активні речовини, насамперед вітаміни.

8.3.2. Радіаційна біотехнологія подовження строків зберігання м'яса і м'ясних продуктів

Іонізуюче випромінювання може відігравати важливу роль у вирішенні проблеми подовження строків зберігання не тільки продукції рослинництва, а й тваринництва, насамперед м'яса і м'ясних продуктів, особливо при їх тривалому транспортуванні. Переконливий багаторічний досвід багатьох країн свідчить про те, що опромінення свіжого м'яса дозами 1-8 кГр за рахунок знищення поверхневої мікрофлори збільшує строки його зберігання при температурі 0-4°C з 6 до 16 діб, а при 0°C до трьох місяців.

Розроблено спеціальні технології радіаційного консервування курчат, кролів, згідно з якими вони герметично упаковуються в скляну, жерстяну тару або просто запаюються в поліетиленові пакети, а потім опромінюються дозами 45-50 кГр.

Як і при радіаційній обробці кормів, при опроміненні м'яса і м'ясних продуктів особливу увагу приділяють дослідженням, які спрямовані на

розробку способів боротьби з сальмонельозом. Оскільки летальні дози для цих бактерій знаходяться в межах 4-5 кГр, рекомендується, щоб дози, які застосовуються для опромінення м'яса і м'ясних продуктів, в різних технологіях не були нижчими за ці рівні. Крім того, ці дози знаходяться в межах, в яких не змінюється білкова цінність продуктів і не відбувається помітного зменшення вмісту вітамінів.

З метою боротьби з сальмонельозом опромінюють також яйця домашньої птиці. При дозі 5 кГр кількість бактерій зменшується більш ніж у 100 разів.

Викладене вище дає можливість зробити висновок про значну перевагу радіаційної обробки м'ясних продуктів порівняно з традиційними низькотемпературними (заморожування) або високотемпературними (консервація) обробками. Не слід забувати і про високу економічну ефективність радіаційної обробки.

8.3.3. Радіаційне знезараження деяких видів продукції тваринництва

Значного збитку сільському господарству завдають такі інфекційні захворювання тварин, як чума ссавців, стригучий лишай, сибірка, лістеріоз та ін. Крім того, одержана від хворих тварин продукція (вовна, хутро, шкури, щетина) може бути переносником хвороб та джерелом зараження здорових тварин, а також людей однаковими для тварин і людей хворобами. Існуючі хімічні способи дезинфекції такої сировини дуже трудомісткі, а деякі з них, що пов'язані з використанням вологих обробок, призводять до зниження якості продукції. Застосування іонізуючого випромінювання для знезараження цих матеріалів, а також пуху, пір'я виявляється досить перспективним.

Так, γ -опромінення баранячих шкур та вовни в тюках об'ємом 1 м³ дозою 20 кГр, яке давно практикується в Австралії, приводить до повної загибелі мікроорганізмів - переносників хвороб. Дози близько 20-24 кГр використовують для дезинфекції хутра. В обох випадках товарна якість продукції не знижується. Така обробка дешевша і в десятки разів швидша, ніж волога хімічна.

8.3.4. Радіаційне знезараження стічних вод тваринницьких комплексів

Утворення великих мас рідкого гною та його стоку на тваринницьких комплексах, особливо великих, вимагає створення спеціальних технологій їх знезараження, що, з одного боку, запобігає забрудненню навколишнього середовища і поширенню інфекційних захворювань, а з іншого - визначає можливість безпечного використання їх у рослинництві як органічних добрив. Є різні способи такого знезараження: хімічні, термічний, пароструминний, анаеробного бродіння, біологічного самоочищення, комбіновані та ін. Серед них високою технологічністю та екологічною чистотою виділяється радіаційний спосіб.

Проте для повної стерилізації стічних вод потрібні високі дози опромінення - практично такі самі, як і для знезараження інших об'єктів,

тобто близько 20-30 кГр. Через великі масштаби проведення робіт, навіть у межах одного сучасного тваринницького комплексу, витрати на радіаційну обробку досить великі, хоч і більшість перерахованих нерадіаційних методів також не дешеві. Тому було розроблено комбіновані технології обробки стічних вод, які поєднують радіаційну й окремі типи традиційних обробок. У деяких комбінаціях вдається досягти синергізму, при якому загальний ефект двох чинників перевищує їх сумарну дію.

Найбільшій увазі заслуговують два типи комбінованих технологій із застосуванням радіаційних установок на основі γ -випромінювачів і мікродомішок дезинфікуючих речовин, а також радіації і термічної обробки. Як дезинфікуючі домішки використовують хлорне вапно, формальдегід, гетерофос, гіпохлор, немагон та деякі інші. Термічну обробку здійснюють перепусканням під тиском крізь рідкі відходи підігрітого повітря (барботажу) або безпосереднім їх підігріванням до 36-40°C. При такому поєднанні способів можна досягти рівноцінних ефектів знезараження при зменшенні концентрацій хімічних дезинфектантів у 2-3 рази і дози опромінення в 4-10 разів. При цьому застосування радіаційного методу знезараження стічних вод не тільки екологічно, а й економічно набагато вигідніше за всі існуючі технології.

В Україні досвід застосування в сільському господарстві більшості розглянутих радіаційно-біологічних технологій в цілому ще невеликий, хоча багато які з них відомі порівняно давно і успішно використовуються в багатьох країнах світу. Здебільшого це стосується біотехнологій, які пов'язані з опроміненням продукції рослинництва і тваринництва, що йде безпосередньо в їжу людини або на виготовлення продуктів харчування. Причини цього зумовлені необґрунтованим упередженням щодо шкідливості для здоров'я опромінених продуктів.

Питання про можливий вплив опромінення на харчові якості продуктів, які начебто за рахунок різних радіаційно-хімічних процесів можуть змінюватись і нагромаджувати токсичні речовини, вже ставилось неодноразово. З цією метою були проведені всебічні дослідження, які дали підставу встановити граничні значення доз опромінення для радіаційної обробки продуктів харчування без зміни їх якості. Ще в 70-х рр. у Міжнародний стандарт на опромінення продуктів харчування були включені вказівки про допустимість використання доз γ -, рентгенівського та електронного випромінювання до 1 кГр для цих цілей. Було зазначено, що енергія електронів, щоб уникнути виникнення в продуктах наведеної радіоактивності, повинна обмежуватись 10 МеВ (енергія γ - і рентгенівського випромінювань значно менша). Але в 1981 р. Всесвітня організація охорони здоров'я (ВОЗ) опублікувала звіт, згідно з яким опромінення будь-яких харчових продуктів у дозах до 10 кГр для здоров'я людини нешкідливе.

Нині масове опромінення десятків видів продукції рослинництва і тваринництва, а також готових продуктів харчування з різними цілями проводиться у 27 країнах світу.

В Україні дозволено опромінення харчового зерна пшениці, кукурудзи та ячменю з метою його дезинсекції, а також картоплі, цибулі, свіжих та сушених фруктів і овочів, м'яса і м'ясних продуктів з метою збільшення строків їх зберігання. При цьому доза не повинна перевищувати 1 кГр, а енергія обмежена 4 МеВ.

Щодо опромінення іншої продукції рослинництва і тваринництва, в тому числі кормів, то обмеження стосуються лише енергії випромінювання.

8.3.5. Метод ізотопних індикаторів у дослідженнях в галузі сільськогосподарської біології. Радіоавтографія. Особливості використання стабільних ізотопів

Міченими атомами називають ізотопи, котрі, відрізняючись по масі від атому елемента, можуть використовуватись як мітка (індикатор) при вивченні найрізноманітніших процесів розподілу, переміщення і перетворення речовин у складних системах, в тому числі і в живих організмах.

Як мітку використовують не тільки радіоактивні, а й стабільні ізотопи. Сам метод ізотопних індикаторів базується на двох положеннях:

- хімічні властивості різних ізотопів одного елемента практично однакові, завдяки чому їх поведінка в процесах, які вивчаються, не відрізняється від поведінки інших атомів того ж елемента;
- радіоактивні ізотопи у кількостях, що застосовуються у якості мітки, не чинять біологічної дії на живі організми.

Угорський хімік Д. Хевеші та німецький хімік Ф. Панет запропонували цей метод в 1913 р., вперше застосувавши його в біологічних експериментах.

Використання методу ізотопних індикаторів не обмежується інтересами радіобіології і біології в цілому. Він використовується також у медицині і медичній промисловості, хімії і хімічній промисловості, геології, фізиці, металургії, матеріалознавстві, археології. Широкого застосування метод набув у сільському господарстві для оцінки фізичних властивостей ґрунту і запасів в ньому елементів живлення, для вивчення взаємодії ґрунту та добрив, процесів засвоєння рослинами елементів живлення з ґрунту і добрив, позакореневого надходження в рослини елементів, для виявлення дії на рослинний організм пестицидів, вивчення особливостей обміну речовин сільськогосподарських рослин.

В тваринництві за допомогою цього методу вивчають фізіологічні процеси, що протікають в організмі тварин, проводять аналіз корму на вміст токсичних речовин, малі кількості яких важко визначити за допомогою інших методів, використовують його для вивчення міграції комах-шкідників сільськогосподарських рослин і переносників хвороб сільськогосподарських тварин, поведінки бджіл, оцінки рибних запасів місцевих водоймищ, а також в багатьох інших сферах сільськогосподарського виробництва.

Чутливість методу ізотопних індикаторів з використанням стабільних ізотопів значно нижча від чутливості методу з використанням радіоактивних

ізоотопів. Якщо для першого межа точності оцінки вмісту ізоотопу в зразках складає 10^{-4} - $10^{-6}\%$, то за допомогою другого можна фіксувати випромінювання ізоотопу при кількості його в пробі в залежності від типу ізоотопу 10^{-11} - $10^{-19}\%$. Тому, при можливості вибору слід віддавати перевагу методу радіоактивних ізоотопів.

В агрохімічних та фізіологічних дослідженнях найчастіше використовують такі ізоотопи: стабільні - ^2H , ^{13}C , ^{15}N , ^{18}O та радіоактивні - ^3H (β -, 12,26 року), ^{14}C (β -, 5730 років), ^{22}Na (γ -, 2,64 року), ^{32}P (β -, 14,3 доби), ^{35}S (β -, 87 діб), ^{42}K (β -, γ -, 12,5 год.), ^{45}Ca (β -, 152 доби), ^{59}Fe (β -, γ -, 45,1 доби), ^{60}Co (β -, γ -, 5,27 року), ^{65}Zn (γ -, 250 діб), ^{86}Rb (β -, γ -, 19,5 доби).

Стабільні ізоотопи одержують шляхом послідовних складних операцій, які мають назву „ізоотопного розділу”. Радіоактивні ізоотопи одержують шляхом опромінення нерадіоактивних речовин в атомних реакторах і прискорювачах заряджених частинок (по аналогії з ^{60}Co для опромінюючих пристроїв), або шляхом хімічного виділення з суміші відходів ядерного палива (по аналогії з ^{137}Cs).

Мічені сполуки - це хімічні речовини, в яких атоми одного або декількох елементів, мають ізоотопний склад, що відрізняється від природного. Їх одержують за допомогою трьох основних методів: хімічного синтезу, ізоотопного обміну (іноді їх об'єднують під загальною назвою – хімічний шлях) та біологічного синтезу (біологічний шлях).

Хімічний синтез, як правило, здійснюється за допомогою звичайних методів препаративної хімії. Але на певному етапі синтезу до складу реакційних компонентів замість звичайного елемента включається потрібний ізоотоп.

Ізоотопний обмін - це хімічний процес, який полягає в перерозподілі ізоотопів якого-небудь елемента між реагуючими речовинами. При ізоотопному обміні відбувається заміщення одного ізоотопу елемента на інший в молекулі речовини без зміни їх елементарного складу. Наприклад: $^{39}\text{KCl} + ^{42}\text{KOH} = ^{39}\text{KOH} + ^{42}\text{KCl}$

Мічені високомолекулярні сполуки біологічного походження, такі як нуклеїнові кислоти, білки, ферменти, деякі амінокислоти, гормони, вітаміни та інші, хімічний синтез яких ускладнений або не можливий і котрі не завжди вступають в реакції ізоотопного обміну, отримують шляхом культивування різних організмів *in vivo* або *in vitro* на середовищах, що містять ізоотоп, або введення ізоотопу в організм за допомогою яких-небудь інших методів, з наступним препаративним виділенням цих сполук.

Мічені сполуки і добрива. Метод ізоотопних індикаторів дозволяє простежити долю конкретного елемента, що внесений з добривом або утилізований в ґрунті до його внесення. Він дозволяє кількісно прослідкувати за надходженням, транспортом та засвоєнням певного елемента, оцінити швидкість його пересування по рослині, нагромадження в окремих органах з точністю, яка на 5-10 порядків перевищує точність хімічних аналізів.

При проведенні агрохімічних досліджень або робіт в області фізіології мінерального живлення рослин з використанням методу ізотопних індикаторів необхідно мати мічені добрива. Основними вимогами до якості міченого добрива є такі: ізотоп-індикатор повинен перебувати у такій же хімічній формі, що і елемент живлення в складі добрива; він повинен бути рівномірно розподілений по всій масі добрива; кількість його повинна бути достатньою для визначення відповідними вимірювальними приладами; не викликати будь-яких суттєвих відхилень у перебігу біологічних процесів.

У якості індикаторів в добривах використовують і стабільні і радіоактивні ізотопи. Головною перевагою стабільних ізотопів є відсутність іонізуючих випромінень. Однак, мала їх доступність, порівняно складна техніка виявлення і відносно низька чутливість складають головні недоліки методик з використанням стабільних ізотопів.

Радіоактивні ж ізотопи мають такі незаперечні переваги: можливість їх отримання практично для всіх елементів періодичної системи, надзвичайно висока чутливість і точність визначення, відносна доступність вимірювальних приладів. Саме тому більшість досліджень із застосуванням методу ізотопних індикаторів проводиться саме з радіоактивними ізотопами.

Існують радіоактивні ізотопи всіх без винятку елементів живлення. Однак з ізотопів-макроелементів вище означені переваги мають лише ^{32}P , ^{35}S , ^{45}Ca , а з ізотопів-мікроелементів - ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{65}Zn та деякі інші. Що стосується інших елементів, то невеликий період піврозпаду робить практично неможливим їх використання в довготривалому експерименті по вивченню, наприклад, транспорту елемента, його включення в метаболізм з точним кількісним підрахунком. Так, період піврозпаду найбільш довгоживучого радіоактивного ізотопу азоту ^{13}N складає лише 10 хвилин. Радіоактивний ізотоп калію ^{40}K має великий період піврозпаду - більше мільярда років, але дуже низьку радіоактивність і не може використовуватись для точних оцінок. Його штучний аналог ізотоп ^{42}K має достатню радіоактивність, але короткий період піврозпаду - 12,4 години. Короткий період піврозпаду у радіоактивного ізотопу міді - ^{64}Cu - 12,8 години, молібдену ^{99}Mo - 67 годин, деяких інших мікроелементів. Ці ізотопи звичайно використовують лише у спеціальних короткочасних експериментах, наприклад, для вивчення окремих етапів їх надходження в рослини, швидкості всмоктування через корені, локалізації в листі при позакореновому внесенні та подібних.

Для отримання мічених азотних добрив застосовують стабільний ізотоп азоту ^{15}N . Для вивчення транспорту та утилізації калію взагалі немає придатного стабільного або радіоактивного ізотопу і замість нього використовують штучний радіоактивний ізотоп рубідію ^{86}Rb з періодом піврозпаду 19,5 діб - елемента, який звичайно зустрічається в природі як ізоморфна домішка в калії і вважається його близьким хімічним аналогом.

Способи одержання мічених добрив. Існує два основних способи одержання мічених добрив. Перший передбачає введення мітки в добриво в

процесі його отримання по заводській технології, Наприклад, розчин, що містить радіоактивний фосфат кальцію $\text{Ca}_3(^{32}\text{PO}_4)_2$, нерадіоактивна сіль якого складає основу природних фосфатів (фосфориту і апатиту) або апатитового концентрату, додають до сірчаної кислоти, якою вони обробляються при отриманні звичайного простого суперфосфату, або до фосфорної кислоти - при отриманні подвійного суперфосфату.

Аналогічним шляхом можуть бути одержані мічені азотні і калійні добрива, коли в процесі виготовлення в залежності від хімічної основи добрива до них додають мічені солі $(^{15}\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $^{15}\text{NH}_4\text{Cl}$, $^{15}\text{NH}_4\text{NO}_3$ або її різновиди за місцем мітки: $\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$, $^{15}\text{NH}_4^{15}\text{NO}_3$, $^{86}\text{RbCl}$, $^{86}\text{Rb}_2\text{SO}_4$.

Другий спосіб простіший і тому частіше використовується в дослідницьких цілях. Він полягає в простому змішуванні розчину радіоактивної солі з водяною суспензією готового добрива в лабораторних умовах. Після цього суспензія висушується до вихідної вологості добрива. Цей спосіб є менш досконалим, але цілком придатним за умов, що досягається рівномірний розподіл мітки по всій масі добрива.

Ще простіше готуються мічені рідкі поживні розчини і середовища для водяних та піщаних культур. В цьому випадку, у відповідності до складу поживної суміші, частина солі, яка повинна нести конкретну мітку, замінюється препаратом, що містить ізотоп.

Важливим моментом при приготуванні добрив або поживного розчину, мічених радіоактивним ізотопом, є вибір індикаторної дози ізотопу. З одного боку, вона повинна бути достатньо високою, щоб забезпечити точність в оцінці участі в метаболізмі рослини досліджуваного елемента. Але з другого, - не настільки високою, щоб спричинити радіаційну дію. При цьому слід враховувати, що не тільки інгібуюча дія ізотопу, але й стимулююча може викривити картину надходження і перетворення елемента.

Основні шляхи використання радіоактивних ізотопних індикаторів в дослідженнях з рослинами. За допомогою методу ізотопних індикаторів у біології рослин, зокрема фізіології, та агрохімії найчастіше вирішуються два основні завдання: дослідження транспорту і розподілу в рослині окремих елементів та вивчення ролі окремих речовин в метаболізмі.

Введений в рослину мічений елемент включається в метаболізм, в процесі якого з ним можуть відбуватися різні хімічні перетворення, внаслідок яких речовини "перемічуються", тобто мітка - ізотоп може потрапляти до складу інших сполук. Для ідентифікації того, в якій хімічній формі і до складу якої сполуки включився мічений елемент поєднують метод ізотопних індикаторів з іншими фізіологічними, біохімічними, цитохімічними методами та засобами препаративного розділу і аналізу суміші речовин.

Дослідження транспорту та розподілу в рослинах окремих елементів. Частіше вводять мічений елемент в складі якої-небудь сполуки через кореневу систему. Якщо рослина вирощується в умовах ґрунтової або піщаної культури, то це проводять шляхом поверхневого поливу субстрату

розчином, який містить мічену речовину, і підґрунтовым його введенням через дренажну трубку.

Позакореневе введення ізотопу проводиться двома шляхами: обприскуванням з пульверизатора або змочуванням поверхні листя.

Для отримання змістовної картини розподілу міченого елементу по рослині використовують метод радіоавтографії.

Вивчення ролі окремих речовин в метаболізмі рослин. За допомогою методу радіоактивних ізотопів були отримані відомості про особливості фосфорного, кальцієвого, сірчаного обміну в рослині, про фізіологічну роль багатьох мікроелементів, фундаментальні дані про перетворення окремих речовин.

Застосування методу мічених атомів дозволило більш глибоко вирішити питання про роль вуглецю у фотосинтезі. Тільки з можливістю одержання міченого вуглекислого газу $^{14}\text{CO}_2$ вдалося відслідкувати його перетворення у складні органічні сполуки. Цей шлях біосинтезу відомий під назвою циклу Кальвіна, або відновлювального пентозофосфатного циклу.

В тому випадку, коли отримують тонкошарові хроматограми або електрофореграми з них можна зняти радіоавтографи, які відображають картину розподілу радіоактивного міченого елемента у складі різних сполук. Радіометричний їх аналіз дозволяє кількісно оцінити динаміку розподілу вуглецю. Такі підходи і дозволили вивчити шляхи фіксації і перетворення вуглецю при фотосинтезі.

Особливості застосування радіоактивних ізотопів у вегетаційних та польових дослідженнях. Для вивчення надходження та транспорту окремих елементів в рослину використовують звичайну техніку постановки вегетаційних дослідів. При цьому слід дотримуватись запобіжних заходів проти поширення радіоактивного забруднення.

Особливості поглинання елементів живлення рослинам з добрив за допомогою методу ізотопних індикаторів можуть бути добре вивчені в польових умовах. В цьому випадку важливим завданням є внесення в ґрунт мічених добрив. В дослідях з однорічними рослинами мічене добриво, як і звичайне, може вноситись перед посівом при ретельному перемішуванні його з ґрунтом. В експериментах з багаторічними рослинами або внесенні мічених добрив під вегетуючу однорічну рослину, наприклад, в період формування продуктивних органів, використовують два способи внесення - поверхневий та глибинний.

Досліди в польових умовах бажано проводити з коротко- та середньоживучими ізотопами, наприклад, застосовувати ^{89}Sr замість ^{90}Sr , ^{134}Cs замість ^{137}Cs .

Радіоавтографія. Надзвичайно важливою перевагою радіоактивних ізотопів є їх властивість залишати слід на фотоматеріалах. Ця їх здатність широко використовується для вивчення локалізації мічених сполук в окремих органах за допомогою методу радіоавтографії.

Радіоавтографія, або авторадіографія, - це спосіб вивчення розподілу радіоактивних речовин в досліджуваному об'єкті шляхом накладання на нього чутливих до іонізуючих випромінень фотоматеріалів. Саме за допомогою радіоавтографії А. Беккерель відкрив явище радіоактивності.

Метод радіоавтографії базується на фотографічному методі виявлення іонізуючих випромінень, який полягає в тому, що іонізуюче випромінення, проходячи через фотоемульсію, викликає відновлення іонів срібла до нейтральних атомів. Після проявлення і фіксації на шарі фотоемульсії з'являються центри потемніння. Розміри і ступінь потемніння ділянок залежить від кількості частинок або квантів, що потрапили на них. При цьому на фотоматеріалах утворюється негативне зображення. На отриманому з нього позитивному відбитку (радіоавтографі) світлі місця відповідають найбільшій інтенсивності випромінення, менш світлі - меншій інтенсивності, а темні - його відсутності. Таким чином, за ступенем засвічування фотоматеріалів можна судити про інтенсивність випромінення і, відповідно, про кількість радіоактивної речовини, що міститься в будь-якій ділянці досліджуваного об'єкту.

Радіоавтограф, або авторадіограма, - це фотографічне зображення розподілу радіоактивних речовин в досліджуваному об'єкті, яке одержане за допомогою методу радіоавтографії.

До головних переваг методу радіоавтографії слід віднести такі: можливість одержання просторової картини розподілу радіоактивної речовини в досліджуваному зразку; високу чутливість методу, що дає можливість виявити в зразку такі малі кількості радіоактивних речовин, які не можуть бути виявлені за допомогою лічильників радіоактивності; можливість кількісної оцінки нагромадження речовини в різних ділянках досліджуваного об'єкту; можливість оцінки радіоактивності і її кількісного визначення в дуже малих кількостях; одержання об'єктивного документа, що фіксує всі результати дослідження - радіоавтографа.

Виділяють дві основні різновидності радіоавтографії - макрорадіоавтографію і мікрорадіоавтографію. В основі обох лежить принцип контактної радіоавтографії, при якому об'єкт дослідження безпосередньо контактує з фотоматеріалом.

Макрорадіоавтографія має справу з великими об'єктами - цілими рослинами, окремими органами - листками, квітками, зрізами плодів та іншими. При цьому фотоплівка або фотопластинка прикладається до рівної поверхні зразка і притискується пресом. Після експонування і проявлення радіоавтограф аналізується в прохідному світлі шляхом порівняння ступеня почорніння фотоматеріалу.

Об'єктами *мікрорадіоавтографії* є мікроскопічні препарати - зрізи, давлені препарати, мазки та інші. При цьому розплавлена рідка фотоемульсія безпосередньо наноситься на зразок, утворюючи при застиганні щільно прилягаючий до зразка шар. Після експонування та проявлення радіоавтограф разом з об'єктом досліджується під оптичним або електронним

мікроскопом у відбитому, а у випадку прозорості об'єкту і в прохідному світлі. Аналіз полягає у підрахунку слідів, що утворилися іонізуючими частинками у фотоемульсії на фоні різних тканинних та клітинних структур.

Для одержання макрорадіоавтографів використовують фотоматеріали з великими мікрокристалами - зернами розміром 0,2-0,5 мкм (звичайні або рентгенівські фотопластинки чи фотоплівки), а для отримання мікрорадіоавтографів застосовують особливі дрібнозернисті ядерні фотоемульсії з зернами розміром 0,01-0,02 мкм.

Для одержання радіоавтографів в рослину вводять речовину, яка містить радіоактивний ізотоп. Для отримання макрорадіоавтографів зрізують окремі листки або інші органи чи беруть все рослину цілком, кладуть на фільтрувальний папір, розправляють як для гербарію і зверху також накривають фільтрувальним папером. Підготовлений таким чином об'єкт розміщують між двома рівними металевими пластинками і під пресом кладуть в сушильну шафу при температурі 80-85⁰С. Після повного висушування в фотографічній кімнаті на нього накладають фотопластинку, накривають м'якою тканиною і знову під пресом кладуть в світлонепроникну камеру або спеціальну касету.

Час експонування оцінюється експериментально і складає доби-тижні, але може тривати і місяці. Після проявлення фотопластинки одержують макрорадіоавтограф, що характеризує розподіл інкорпорованого радіоактивного ізотопу в рослині.

Нерідко виникає потреба одержати макрорадіоавтограф зі свіжої ще вологої рослини (наприклад, при роботі з короткоживучими ізотопами). В цьому випадку зразок обкладають водонепроникною прокладкою із полімерної плівки й розміщують на поверхні фотоматеріалу або загортають нею фотоплівку.

Для мікрорадіоавтографії звичайно використовують фіксовані препарати окремих органів або тканин рослини, в яку введений радіоактивний ізотоп. На висушені препарати наносять фотоемульсію, експонують, проявляють і одержують мікрорадіоавтографи, на яких під мікроскопом можна виявити потемніння певних ділянок у вигляді окремих точок, розмір яких визначається розміром зерен срібла, утворених ними скупчень.

Метод радіоавтографії дозволяє не тільки виявляти локалізацію міченої сполуки в рослині, тканині або клітині, але й оцінити її кількість, оскільки кількість зерен відновленого срібла емульсії прямо пропорційна інтенсивності діючого на нього випромінення. Кількісний аналіз макрорадіоавтографів проводять за допомогою звичайних методів фотометрії, а мікрорадіоавтографів - підрахунком під мікроскопом зерен, що приходяться на одиницю площі або окрему структуру, наприклад, ядро, хромосому.

Особливості використання стабільних ізотопів. У зв'язку зі значно нижчою чутливістю методу можливості застосування в ролі мітки стабільних

ізоотопів в агробіологічних та інших дослідженнях обмежені у порівнянні з радіоактивними ізотопами. Проте, стабільні ізотопи як індикатори можна застосовувати для вирішення майже всіх завдань, в яких використовуються радіоактивні ізотопи, хоча з меншим успіхом і точністю.

Початкові стадії методик із застосуванням стабільних ізоотопів не відрізняються від тих, де використовуються радіоактивні ізотопи. Специфіка методу проявляється лише на заключних етапах кількісного аналізу проб. Цей аналіз проводять на мас-спектрометрах - приладах, які призначені для розділення речовини за масами атомів і молекул. Принцип роботи мас-спектрометра оснований на дії магнітних і електричних полів на іонізовані пучки частинок у вакуумі з наступним їх сортуванням за атомними масами.

Із стабільних ізоотопів найбільш широко використовуваним є ізоотоп азоту ^{15}N . Роботи з ним ведуться за такими основними напрямками: вивчення швидкості поглинання рослинами вільного азоту та азоту, що входить до складу різних азотистих сполук, в тому числі і добрив; визначення здатності до фіксації атмосферного азоту у різних видів рослин та вивчення швидкості процесів обміну азотистих сполук в рослинах.

Мас-спектрометричному аналізу піддають суміш ізоотопів у газоподібному стані. Для цього досліджуваний матеріал спалюють за методом Кьельдаля, а одержаний із сірчанокислового амонію аміак окислюють у вакуумі гіпобромітом до вільного азоту. Найменший надлишок атомного проценту, який можна виявити в пробі, складає 0,01-0,02, що відповідає приблизно 0,1-0,2 мкг ^{15}N в 1 мл азоту за нормальних умов. Це досить висока точність.

Тема 9. Відбір і підготовка проб води, ґрунту, рослин, продуктів харчування рослинного і тваринного походження для радіометрії

Одне з основних завдань радіологічних підрозділів - здійснення контролю за радіоактивним забрудненням об'єктів навколишнього середовища на території країни. Головною формою такого контролю є визначення концентрації радіонуклідів в об'єктах навколишнього середовища, що мають пряме відношення до життєдіяльності людини: в повітрі, воді, ґрунті, продукції рослинництва і тваринництва.

На підставі радіометричних, спектрометричних і хімічних досліджень приймаються рішення про можливість їх практичного використання.

Для отримання зіставних результатів всі операції радіометричної експертизи, починаючи з відбору проб і закінчуючи статистичною обробкою результатів досліджень, виконуються відповідно до єдиних для всіх радіологічних служб методичних вказівок.

Визначення сумарної β -активності проводять для оперативного контролю за забрудненістю досліджуваних об'єктів.

За допомогою радіохімічних і гамма-спектрометричних методів досліджень радіологічні відділи визначають вміст ^3H , ^{14}C , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{90}Y , ^{95}Zr , ^{103}Ru і ^{106}Ru , ^{131}I , ^{134}Cs і ^{137}Cs , ^{140}Ba , ^{141}Ce і ^{144}Ce , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{232}Th , ^{238}U , ^{239}Pu та ін.

Визначення ^{210}Po та ^{239}Pu проводиться в районах зі збільшеним вмістом цих елементів в кормах; ^{90}Y , ^{95}Zr , ^{103}Ru і ^{106}Ru , ^{131}I , ^{140}Ba , ^{141}Ce і ^{144}Ce - у випадках «свіжих» опадів радіоактивних речовин при забрудненні сільськогосподарських угідь продуктами ядерного поділу в результаті аварій на підприємствах атомно-енергетичного циклу; вміст ^3H оцінюють в продуктах і сировині тваринного походження, зернофуражі, що ввозять з закордону; ^{134}Cs і ^{137}Cs , ^{89}Sr і ^{90}Sr , ^{210}Pb , ^{232}Th , ^{238}U визначають в ґрунтах, грубих, сочних, концентрованих кормах, коренеплодах, продуктах тваринництва. ^{103}Ru і ^{106}Ru , ^{210}Po , ^{239}Pu оцінюють в сіні, траві, силосі, кістках та м'язах; ^{90}Y , ^{141}Ce і ^{144}Ce - в сіні, траві; ^{95}Zr , ^{131}I , ^{140}Ba - в траві та молоці. В воді, як правило, оцінюють лише сумарну β -активність.

В таблиці 33 приведені оптимальні терміни і норми відбору проб, що дозволяють отримати якнайповнішу інформацію про ступінь їх радіоактивного забруднення.

Корми, що експортуються і імпортуються, і продукти тваринництва і рослинництва досліджуються у міру їх надходження. Проба повинна бути типовою для об'єкту, а маса (об'єм) - достатньою, щоб після концентрації отримати кількість золи, необхідну для визначення сумарної β -активності і проведення радіохімічного аналізу.

Середню пробу формують з 8-10 «точкових проб». Кожну відібрану середню пробу зважують, поміщають в чисту тару (скляна банка, пляшка, поліетиленовий мішок, паперовий пакет), упаковують в ящик, опечатують. До тари прикріплюють етикетку, де указують названня проби, місце і дату відбору, її масу, а у разі висушування проби указують масу сирової і сухої проб.

Крім того, при узяті проби складається акт в двох екземплярах, в якому указують необхідні відомості:

1. Ким узяті проби (установа, посада, прізвище і. п.). 2. Місце і дата відбору проби. 3. Назва продукту. 4. Опис узятих проб, номери проб і їх маса. 5. Куди прямують проби. Мета дослідження. 6. Підписи особи, що проводила відбір, і представника господарства.

Відбір проб сіяних трав і трав з природних угідь (1-2 кг) проводять 2 рази на місяць в перший рік радіоактивного забруднення і 1 раз на місяць в наступні роки.

Проби сіна, сінажу, соломи, коренебульбоплодів і концентратів відбирають при їх закладці на зиму, а також при дослідженні раціонів. Зернофураж і соломку відбирають одночасно в одних і тих же відділеннях колгоспів, радгоспів. Силос досліджують тільки під час додавання до раціону тварин.

Проби води з річок, озер, ставків і інших водойм беруть в місцях водопойів 1 раз на місяць у весняний, літній і осінній періоди.

Контрольні проби молока відбирають не рідше 2 разів на місяць в перший рік радіоактивного забруднення території, а в подальші роки - 1 раз на місяць.

М'ясо, внутрішні органи, кістки тварин відбирають безпосередньо в контрольних господарствах в період забою, але не рідше 4 разів за рік (взимку, навесні перед вигоном на пасовища або початком годівлі зелених кормів, в середині літа і восени перед переходом на зимовий раціон).

33. Терміни і норми відбору проб різних об'єктів для оцінки радіоактивності і змісту радіонуклідів

Найменування об'єкту	Терміни відбору проб	Вага проби	
		для визначення сумарної β -активності	для радіохімічного аналізу
Грунт	Весна, літо, осінь	150-300 г	1.5-2 кг
Трава	Весна, літо, осінь (1-2 рази на місяць)	150-300 г	4-5 кг
Зерно	Літо	100-200 г	2-3 кг
Грубі корми	Осінь	100-200 г	2-3 кг
Силос, сінаж	В період згодовування	100-200 г	4-5 кг
Овочі	По мірі надходження	100-200 г	3-6 кг
Коренебульбоплоди	Осінь	150-300 г	3-6 кг
Концентровані корми	»	100-200 г	2-3 кг
Молоко	Не рідше 1 разу на місяць	50-100 мл	5-6 л
М'ясо	Весна, літо, осінь, зима	100-200 г	2-3 кг
Кістки	»	100-200 г	0.5 кг
Риба свіжа	По мірі надходження	100-200 г	3 кг
Вода	Весна, літо, осінь	0,5 л	20 л
Птиця	По мірі надходження	100-200 г	1 тушка
Яйця	»	3-6 шт.	10 шт.
Мед	»	150-300 г	0.5-1.0 кг
Шерсть	»	20-40 г	0.2-0.5 кг
Лісова підстилка	Осінь	100-200 г	2-3 кг
Кора	При рубці лісу	100-200 г	2-3 кг
Ягоди, фрукти	По мірі надходження	100-200 г	3-6 кг
Гриби свіжі	»	100-200 г	4-5 кг
Гриби сухі	»	50-100 г	2-3 кг

Проби м'яса птиці (1 тушка) і яєць (10 штук) беруть щомісячно в період масового забою і здачі яєць в торгову мережу.

Рибу відбирають цілими екземплярами одночасно з пробамі води в період масового вилову, мед - перед здачею на заготовчі бази або в торгову мережу.

Компоненти раціонів годівлі сільськогосподарських тварин і птахів відбирають одночасно з відбором продукції тваринництва: у перший рік - щомісячно, в подальші - 1 раз на два місяці.

При відборі проб в контрольних пунктах заміряють γ -фон приладом типу СРП-68-01 на висоті 0,7-1,0 м над рівнем ґрунту. Дані γ -фону записують в супровідному документі.

Для отримання оперативної інформації про ступінь забруднення об'єктів навколишнього середовища зазвичай оцінюється сумарна β -активність експрес-методом в товстому шарі при питомій активності проб $A_{\text{пит}} > 3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг ($1 \cdot 10^{-7}$ Кі/кг, Кі/л) і в зольному залишку при питомій активності $A_{\text{пит}} < 3,7 \cdot 10^3$ Бк/кг.

Результати визначення радіоактивності обробляють математично: визначають середню арифметичну величину вимірювань (M), величину її погрішності (m), достовірність різниці між середніми арифметичними по роках (P - критерій Стюдента).

9.1. Відбір проб води і інших рідин

Рівень природної радіоактивності води може значно коливатися залежно від характеру водойм і ступеня їх мінералізації. Але, як правило, сумарна активність її не перевищує 1,85 Бк/л ($5 \cdot 10^{-11}$ Кі/л).

Проби води з річок відбирають в декількох пунктах біля обох берегів і посередині річки на глибині 0,5 м, а якщо глибина річки перевищує 2-3 м, то проби води беруть також на глибині 0,5 м від дна.

Питну воду відбирають з усіх вододжерел, при цьому слід мати на увазі, що при водовідборі з відкритої водойми не потрібно каламутити осад. Об'єм проби повинен бути не менше 1 л. Перед заповненням ємкості її слід обполоснути досліджуваною водою. Таких же правил слід дотримуватися при відборі інших рідких проб. Наприклад, при відборі проб молока з великої ємкості беруть декілька окремих проб з поверхні і глибини і змішують. При відборі рідких проб з невеликої ємкості рідину можна перемішати прямо в ємкості. Об'єм проби залежно від маси досліджуваної рідини складає 0,5-3,0 л.

9.2. Відбір проб ґрунту

Природна радіоактивність ґрунту визначається в основному ізотопом ^{40}K , а також ізотопами урану, радію, торію, рубідію та інших і внаслідок різного хімічного складу ґрунтів вона коливається в межах $(0,2-2,0) \cdot 10^{-8}$ Кі/кг [$(0,74-7,40) \cdot 10^2$ Бк/кг] сирої ваги, що відповідає $0,3-3,5$ Кі/км² [$(1,00-12,75) \cdot 10^{10}$ Бк/км²] випромінюванню при товщині зразка 5 см.

Проби ґрунту відбираються методом «конверта», тобто в п'яти точках (кути і центр квадрата із стороною 100 м) відбирається шар розміром 15 x 15 см на глибину орного шару (20-30 см.). Контрольні точки відбору проб повинні бути віддалені від доріг не менше ніж на 200 м. Остаточна проба (1 кг) складається з п'яти добре перемішаних зразків із заздалегідь видаленою рослинністю.

9.3. Відбір проб рослин

Проби рослин відбираються на тих же ділянках, що і проби ґрунтів. Для отримання об'єднаної (середньої) проби рослин природної вологості рекомендується відбирати не менше 8-10 точкових проб. Надземну частину трав'яного покриву зрізають гострим ножом або ножицями (не засмічуючи ґрунтом), кладуть в поліетиленовий пакет або крафт-папір, вкладають етикетку.

З посівів сільськогосподарських культур слід брати проби по діагоналі поля або ламаної кривої, із скирт - на висоті 1-1,5 м від землі і з глибини не менше 0,5 м, з буртів - з глибини 0,3-0,5 м.

Об'єднану пробу складають з 8-10 точкових проб, узятих з наземної частини рослин або роздільно, - стебел і листя, плодів, зерен, коренебульбоплодів. Загальна маса точкових проб повинна бути не менше 2 кг повністю використаних для формування середньої проби.

9.4. Відбір проб зерна

Точкові проби зерна з автомобілів відбирають механічним пробовідбірником або щупом. З автомобілів з довжиною кузова до 3,5 м їх відбирають в чотирьох точках, 3,5-4,5 м - в шести точках, від 4,5 і більше - у восьми точках на відстані 0,5-1 м від переднього і заднього бортів і близько 0,5 м від бічних бортів.

Механічним пробовідбірником точкові проби відбирають по всій глибині насипу зерна, ручним щупом - з верхнього і нижнього шарів, торкаючись щупом дна. У автопоїздах проби відбирають з кожного кузова (причепи).

Загальна маса точкових проб повинна бути не менше 2 кг. Якщо загальна маса буде менше, відбирають додаткові точкові проби в тих же точках в середньому шарі насипу.

Точкові проби зерна з мішків відбирають з кожного другого мішка, якщо мішків в партії до 10 шт. включно; з 5 мішків плюс 5% від кількості мішків в партії, якщо їх більше 10 і до 100 шт. включно. Якщо кількість мішків в партії понад 100 - проби відбирають з 10 мішків плюс 2,5% від кількості мішків в партії.

Із закритих мішків точкові проби відбирають щупом в трьох доступних точках. Щуп вводять у напрямку до середньої частини мішка жолобком вниз, потім повертають його на 180° і виймають. Отвір, що утворився, закривають хрестоподібними рухами вістря щупа, зрушуючи нитки мішка.

Загальна маса точкових проб - не менше 2 кг.

Об'єднану пробу отримують як сукупність точкових проб, які зсипаються в чисту тару, що виключає зміну якості зерна.

9.5. Відбір проб коренебульбоплодів

Проби відбирають від однорідної партії. Однорідна партія коренебульбоплодів - це будь-яка кількість одного сорто типу, заготовленого з одного поля, що зберігається в однакових умовах.

Точкові проби відбирають по діагоналі бічної поверхні бурту, насипу, куп або середньої лінії кузова автомобіля, причепа, вагону, баржі через рівні відстані на глибині 20-30 см. Точкові проби масою по 1,0-1,5 кг змішують в об'єднану пробу.

Середню пробу для аналізу виділяють з об'єднаної, маса її повинна бути 1,0-1,5 кг. Для цього об'єднану пробу сортують по величині коренебульбоплодів на три групи: великі, середні і дрібні. Від кожної групи відбирають по 20% і об'єднують.

9.6. Відбір проб трави і зеленої маси сільськогосподарських культур

Проби трави з пасовищ або сінокісних угідь відбирають безпосередньо перед випасом тварин або скошуванням на корм, для чого на вибраній ділянці виділяють 8-10 облікових майданчиків площею 1-2 м², розташовуючи їх по діагоналі. Травостій скошують (зрізають) на висоті 3-5 см.

Від зеленої маси, доставленої на ферми для згодовування тваринам або для приготування силосу, сінажу, точкові проби беруть вручну не менше ніж з 10 різних місць порціями по 400-500 г. Отриману з усіх облікових майданчиків або точкових проб зелену масу ретельно перемішують і розподіляють рівним шаром, отримуючи об'єднану пробу.

З об'єднаної проби зеленої маси відбирають середню, маса якої повинна бути 1,5-2,0 кг. Для цього траву беруть порціями по 150-200 г з 10 різних місць.

Відбір проб силосу і сінажу проводять в період згодовування з різних ділянок траншеї. Маса середньої проби повинна складати 1,5-2,0 кг.

9.7. Відбір проб грубих кормів (сіно, солома)

Точкові проби з партії сіна або соломи, що зберігаються в скиртах, відбирають по периметру скирт на рівних відстанях один від одного на висоті 1,0-1,5 м від поверхні землі з усіх доступних сторін з глибини не менше 0,5 м. З точкових проб складають об'єднану пробу масою не менше 2 кг. Для цього точкові проби сіна укладають тонким шаром (3-4 см) і обережно перемішують, не допускаючи ломки рослин і утворення трухи.

З об'єднаної проби відбирають середню пробу для аналізу, для чого не менше ніж з 10 різних місць за всією площею і товщиною шару відбирають пучки сіна масою 60-120 г. Відібрану середню пробу масою не менше 1 кг упаковують в щільний папір, паперовий або поліетиленовий пакет, вкладають етикетку.

Методи відбору проб продуктів рослинництва, не згаданих вище, аналогічні описаним. Так, методи відбору всіх видів круп, бобів, насіння аналогічні методам відбору проб зерна; яблука, помідори, баклажани відбираються згідно методам відбору коренеплодів і т.д.

З невеликих партій продуктів (ягоди, зелень) точкові проби беруть в 4-5 місцях. Об'єднана проба по масі або об'єму не повинна перевищувати триразової кількості, необхідної для вимірювання на відповідному приладі.

9.8. Відбір проб молока і молочних продуктів

Відбір проб проводять на фермах, молочних пунктах, молокозаводах і ринках. Пробу рідких продуктів (молоко, вершки, сметана) з невеликих ємкостей (бідон, фляга та ін.) відбирають після перемішування, з великих (цистерна, чан) - з різної глибини ємкості кухлем з подовженою ручкою або спеціальним пробовідбирачем. Величина середньої проби складає 0,2-1,0 л і залежить від маси всієї партії продукції. Масло, сир і тверді сири відбирають на молокозаводах і холодокомбінатах. Залежно від маси виготовленої продукції для проби відбирають 0,5 кг сиру і 0,3 кг сира і масла.

9.9. Відбір проб м'яса і субпродуктів

Проби м'ясної продукції відбирають на забійних пунктах м'ясокомбінатів і ринках. Проби м'яса (без жиру) від туш або напівтуш відбирають шматками по 30-50 г в області 4-5-го шийного хребця, лопатки, стегна та товстих частин спинних м'язів. Загальна маса проби повинна складати 0,2-0,3 кг. Для спеціального лабораторного дослідження відбирають також кістки в кількості 0,3-0,5 кг (хребет і 2-3-тє ребро).

Проби внутрішніх органів тварин - печінка, нирки, селезінка, легені - відбирають масою 0,1-0,2 кг; щитовидна залоза аналізується цілою.

Проби м'яса птиці відбирають в кількості 1/4 тушки (кури, індички, качки, гуси) або цілком (курчата).

Кількість зразків продукції, що відбираються для лабораторного аналізу, залежить від величини партії і складає при масі 1-500 кг - один зразок, 0,5-3,0 т - два, 3-5 т - три, 5-10 т - п'ять, 10-20 т - шість, від 20 т і більше - десять зразків.

9.10. Відбір проб риби

Відбір проб проводять на рибо-, холодокомбінатах, ринках, а також при масовому вилові - безпосередньо в рибгоспах. Дрібну рибу беруть цілою, з великої - тільки середню частину. Дослідженню підлягають всі види риби. Маса середньої проби складає 0,3-0,5 кг.

Проби молока, м'яса, риби при тривалому транспортуванні консервують 4-5%-м розчином формаліну.

9.11. Відбір проб яєць

Відбір проб проводять на птахофабриках, фермах господарств і на ринку. Величина проби - 5-10 шт. з однієї птахоферми, 3 шт. - від кожної тисячі упакованої партії і 2 шт. - від партії ринкового продажу.

9.12. Відбір проб натурального меду

Відбір проб проводять на пасіках, ринках, складах, базах господарств.

Відбір проби меду проводять трубчастим алюмінієвим пробовідбірником, якщо мед рідкий, або щупом для масла, якщо мед

щільний, з різних шарів продукції. Мед, що закристалізовувався, відбирають конічним щупом, занурюючи його під нахилом.

При дослідженні сотового меду з однієї соторамки вирізують частину стільників площею 25 см². Якщо сотовий мед шматковий, пробу беруть по 150-300 г з кожної упаковки. Після видалення воскових кришечок зразки меду кладуть на сітчастий фільтр з діаметром осередків не більше 1 мм, вкладений в стакан, і поміщають в термостат при температурі 40-45°C. Маса середньої проби повинна складати 0,2-0,3 кг

9.13. Підготовка проб до радіометрії

Прийом і попередню обробку доставлених проб проводять в спеціальному приміщенні, обладнаному витяжними і сушильними шафами, муфельними печами, пристосуваннями для миття посуду, тари і, у разі потреби, проб.

Проби, що поступили, звіряють з описом, перевіряють радіоактивність поверхні їх упаковки.

Присланий матеріал перед приготуванням середньої проби ретельно перемішують. Корнебульбоплоди (відмиті від землі) і м'ясо заздалегідь подрібнюють ножем або на м'ясорубці, сіно і соломі - ножицями. Маса сирової проби заносять в робочий журнал.

Проби піддають різній підготовчій обробці залежно від цілей дослідження. У разі потреби швидкого висновку щодо забрудненості проби і виявлення індикаторними приладами підвищеної активності досліджуваних проб застосовують експрес-методи, для яких не вимагається попередньої обробки проби і її зважування.

Якщо ж активність проби невелика, то для ретельного виявлення радіоактивних речовин проводять збагачення проб шляхом висушування, обвуглювання і озолена в муфельній печі.

Висушування проб. Подрібнені і зважені проби грубих, соковитих і концентрованих кормів заздалегідь підсушують на сонці або в приміщенні, потім в сушильній шафі при температурі 80-100°C до постійної маси.

Проби молока (3 л) підкислюють соляною або оцтовою кислотою, випарюють у фарфорових чашках при помішуванні під інфрачервоними лампами або на електричних плитках до утворення сухого залишку, поступово додаючи в них порції молока. Висушування закінчують в сушильній шафі при 100°C до отримання постійної маси сухого залишку.

Проби м'яса, відокремлені від жиру, сухожилків і кісток, подрібнюють, зважують, підсушують при кімнатній температурі, потім на лотках сушать в сушильній шафі. Кістки відокремлюють від м'яких тканин, кісткового мозку, подрібнюють, зважують і сушать в сушильній шафі при температурі 100-150°C протягом 2-3 год.

Концентрацію проб води збільшують випарюванням і радіометрією сухого залишку.

Обвуглювання проб. Після досягнення постійної маси проби сухий залишок обвуглюють, прожарюючи його на електричних плитках. Обвуглювання рослинних проб проводять спалюванням в жерстяних банках, прикритих кришками щоб уникнути займання матеріалу. Процес вважають закінченим при припиненні спучення проби і зникненні диму.

Озолення проб. Обвуглені сухі залишки озолюють в муфельних печах при температурі 400-450°C, а проби кісток - при 500-600°C. У випадках визначення стронцію озолення кісток можна проводити при 800-900°C. Підчас озолення температуру в муфельній печі підвищують поступово щоб уникнути спалаху матеріалу і втрат деяких радіонуклідів. Тривалість озолення різна залежно від кількості і виду органічних сполук в пробі. Оптимальний час для рослинних проб 2-4 год; м'яса, молока, кісток і коренебульбоплодів – 5-15 год. Зовнішньою ознакою готовності є світло-сірий колір. Для прискорення озолення матеріал проб слід періодично перемішувати.

Після охолодження озоленні проби переносять з муфеля в ексікатор, охолоджений до кімнатної температури і зважують для визначення коефіцієнта озолення (K_{oz}):

$$K_{oz} = \frac{m_2}{m_1}$$

де m_1 - маса отриманої золи, г;

m_2 - маса сирої золи, г.

Для рідких проб (молоко, вода) використовують формулу:

$$K_{oz} = \left(\frac{m_2}{m_1} \right) \cdot 10^{-3}$$

де m_1 - об'єм проби води або молока;

m_2 - вага отриманої золи;

10^{-3} - множник переходу до мілілітрів.

Готову золу розтирають до консистенції дрібного порошку чашці або тиглі, далі зважують на стандартній алюмінієвій підкладці 200-300 мг, ретельно розрівнюють, ущільнюють через кальку і проводять радіометричні вимірювання.

2. ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ

Лабораторна робота 1. Визначення потужності дози γ -випромінювання, створеного еталонним джерелом ^{137}Cs через захисні матеріали

Порядок роботи

1) підготувати рентгенометри до роботи згідно з інструкцією; 2) встановити зонд рентгенометра в свинцевий «будиночок»; 3) помістити у свинцевий «будиночок» еталонне джерело ^{137}Cs і провести вимірювання потужності дози γ -випромінювання, створеного еталонним джерелом, у мікрорентгенах на годину (мкР/год.) або імпульсах за секунду (імп./с); 4) послідовно ввести в проміжок поміж еталонним джерелом та зондом приладу захисні екрани з алюмінію, просвинцьованої гуми та оргскла і визначити потужність дози, зареєстровану приладом; 5) аналогічні вимірювання провести із захисними екранами зі свинцю; 6) розрахувати товщину шару половинного послаблення для цього елемента; 7) визначити потенційно можливу дозу ІВ від еталонного джерела за 6-годинний робочий день та при використанні різних захисних екранів; 8) дані досліджень занотувати у таблиці 34; 9) зробити висновки.

34. Дози іонізуючого випромінювання за день при використанні різних захисних екранів

Тип захисного екрану	Потужність дози випромінювання, мкР/год	Доза, отримана за день, Р
Без захисного екрану		
Алюміній		
Оргскло		
Свинець		

Лабораторна робота 2. Визначення потоку β -частинок від еталонного джерела

Порядок роботи

1) підготувати один із β -радіометрів («ТИСС», «РУСТ», УІМ-2, КРБ-1, МКС-01-Р, МКС-04М) до роботи згідно з інструкцією; 2) підготувати еталонне джерело β -випромінювання на стандартній підложці (^{32}P , ^{90}Sr); 3) визначити швидкість лічби імпульсів від фону за одну хвилину ($N_{\text{ф}}$); 4) піднести еталон на відстань 1 см до детектора приладу і записати швидкість лічби від еталона і фону в імпульсах за хвилину ($N_{\text{ет}} + N_{\text{ф}}$); 5) аналогічне вимірювання провести на відстані 5, 10, 20 см; 6) ввести в результати вимірювань похибку, виконавши підрахування лічби фону

$$N_{\text{ет}} = (N_{\text{ет}} + N_{\text{ф}}) - N_{\text{ф}}$$

7) розрахувати зниження інтенсивності потоку β -частинок залежно від відстані еталона від детектора; 8) дані розрахунків внести в таблицю 35.

35. Зміни інтенсивності β -потоку залежно від відстані

Відстань від еталона до лічильника, см	Швидкість лічби від еталона і фону, ($N_{\text{ет}}+N_{\text{ф}}$), імп/хв	$N_{\text{ф}}$, імп/хв	$N_{\text{ет}}$, імп/хв	Коефіцієнти зміни швидкості лічби
1				
5				
10				
20				

Лабораторна робота 3. Визначення шару половинного послаблення β -випромінювання

Порядок роботи

1) підготувати радіометри ПС-20, КРБ-1 до роботи згідно з інструкцією; 2) визначити швидкість імпульсів електричного струму, які виникають у детекторі від фону $N_{\text{ф}}$ (імп/хв). Час вимірювання 3 хвилини; 3) на відстані 5 см від детектора розташувати джерело β -частинок (еталон ^{90}Sr) і визначити швидкість підрахунку імпульсів від нього без фону $N_{\text{ет}}$ (імп/хв). Час вимірювання - 3 хвилини; 4) накладати по черзі на еталон (препарат) пластини з фольги, визначаючи після кожної швидкість імпульсів до тих пір, поки значення не наблизиться до показників фону; 5) результати досліджень занести в таблицю 36:

36. Результати визначення шару половинного послаблення β -випромінювання

№ вимірювання	К-сть пластин	$N_{\text{ет}}+\text{ф}$ за 3 хв	$N_{\text{ет}}+\text{ф}$, імп/хв	$N_{\text{ф}}$, імп/хв	$N_{\text{оет}}$, імп/хв
1	0				
2	1				
3	2				

6) за результатами вимірювань накреслити графік: на осі ординат відкладають показники швидкості імпульсів ($N_{\text{оет}}$), на осі абсцис - кількість пластин. Визначити кількість пластин, що зменшують інтенсивність β -частинок у два рази; 7) визначити шар половинного послаблення ($1/2$) в одиницях поверхневої густини ($\text{мг}/\text{см}^2$). Для цього визначити середню масу 1 см^2 (мг) фольги і помножити результат ($\text{мг}/\text{см}^2$) на кількість пластин, що зменшують у два рази інтенсивність потоку β -частинок; 8) провести аналогічні дослідження і розрахунки з пластинами з оргскла; 9) зробити висновки.

Лабораторна робота 4. Робота з приладами індивідуального дозиметричного контролю

Порядок роботи з фотодозиметром ІФКУ

1. В темній кімнаті нарізати з фотоплівки відповідної марки прямокутники необхідних розмірів. Видати касети працюючим, зробивши відповідну відмітку в журналі.

2. Опромінити контрольні плівки, що взяті з тієї ж партії, що й робочі, експозиційними дозами 0,1 і 1,0 Р джерелом γ -випромінювання ^{60}Co на перевірчому пристрої по ГОСТ 1251 Р-67 або іншим еталонним джерелом.

3. Одночасно обробити робочі й контрольні плівки за рекомендаціями заводу-виробника рентгенівської плівки. Перед обробкою плівок приготувати кювети з проявником, фіксажем та водою.

4. Обробку плівок потрібно проводити у такому режимі: проявка протягом 7,5-8,5 хв.; промивка водою 1-2 хв.; фіксування протягом 18-22 хв.; температура розчинників 19-21°C.

5. Після калібрування вимірювального пульта визначити експозиційну дозу, яка зареєстрована робочими плівками. для цього оброблену плівку вставити у вікно на передній панелі пульта і зняти показники вимірювального приладу.

Порядок роботи з дозиметром ДК-02

1. Ознайомитись з будовою та принципом роботи приладу та зарядного пристрою ЗД-6.

2. Зарядити дозиметр: а) відгвинтити захисну оправу дозиметра; б) повернути ручку зарядного пристрою проти годинної стрілки до кінця; в) вставити дозиметр в зарядно-контактне гніздо ЗД-6; г) за допомогою дзеркала направити джерело світла; д) натиснути на дозиметр і, дивлячись в окуляр, повертати ручку ЗД-6 по ходу годинної стрілки, поки зображення нитки на шкалі дозиметра не встановиться на "0"; е) витягнувши дозиметр, доторкнутись металевою паличною до його контакту, щоб зняти заряд з діафрагми; з) загвинтити захисну оправу дозиметра.

3. Встановити дозиметр на віддаль 20 см від тієї точки, де буде розміщене контрольне γ -джерело. Тривалість опромінення 30 хв.

4. Визначити експозиційну дозу і обчислити її потужність.

Порядок роботи з дозиметрами КІД-2

1. Ознайомитись з будовою дозиметра КІД-2 і зарядно-вимірювального пульта.

2. Відгвинтити захисні ковпачки дозиметра, зарядити камери, по черзі вставляючи їх в гніздо "Заряд" зарядно-вимірювального пульта. Перевірити заряд на камерах, вставляючи їх послідовно в гніздо "Вимірювання". Знову зарядити обидві камери дозиметра.

3. Провести опромінення приладу в умовах, що аналогічні для ДК-02.

4. Визначити експозиційну дозу, що була отримана протягом заданого проміжку часу. Обчислити потужність експозиційної дози, що була утворена контрольним γ -джерелом.

Порядок роботи з приладом ДКС-04

1. Ознайомитись з будовою і принципом роботи дозиметра ДКС-04.
2. Ввімкнути дозиметр, поставивши перемикач в положення "Питание". Переконавшись, що напруга акумуляторів живлення не нижча за мінімально допустиме значення, для чого натиснути кнопку "Контроль питания - доза", при цьому повинен загорітися світловий індикатор.
3. Встановити перемикач роду робіт в положення "Поиск". Даний режим використовується для локалізації джерела іонізуючого випромінювання.
4. Обчислити потужність експозиційної дози P_x в мілірентгенах за годину (ампер на кілограм) від контрольного джерела за формулою:

$$P_x = nK_1 \quad (P_x = nK_2)$$

де n - показник цифрового табло дозиметра;

$$K_1 = 1 \text{ мР/год} \quad (K_2 = 7,16 \cdot 10^{-11} \text{ А/кг}).$$

Вимірювання потужності експозиційної дози можна проводити при будь-якому положенні перемикача роду робіт, оскільки накопичення та вимірювання значень експозиційної дози відбувається з моменту вмикання дозиметра.

Для виводу значення накопиченої експозиційної дози слід натиснути кнопку "Доза". При цьому на цифровому табло зникає крапка після третьої цифри.

При переводі перемикача роду робіт в положення "Порог" дозиметр переводиться в режим сигналізації про накопичення експозиційної дози з інтервалом 1 мР ($2,58 \cdot 10^{-7}$ Кл/кг).

При накопиченні експозиційної дози, що дорівнює 4098 мР ($1,03 \cdot 10^{-3}$ Кл/кг), вмикається сигналізація у вигляді безперервного звукового та світлового сигналів.

5. Обчислити експозиційну дозу в мР (Кл/кг) за формулою:

$$D_x = nK_3 \quad (D_x = nK_4)$$

де n - показники цифрового табло дозиметра;

$$K_3 = 1 \text{ мР} \quad (K_4 = 2,58 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/кг}).$$

Лабораторна робота 5. Вимірювання γ -фону в приміщеннях та на території радіометром СРП-68-01

Порядок роботи

1. Перемикач режиму роботи встановити в положення "Выкл". Відвернути гвинти, відкрити кришку батарейного відсіку і вставити комплект елементів живлення, звертаючи увагу на додержання правильної полярності підключення елементів згідно з маркуванням на елементі.

2. Перемикач режиму роботи перевести в положення "Бат" і перевірити напругу живлення (8-15 В). Якщо напруга менша за 8 В, необхідно замінити елементи живлення.

3. Перемикач режиму робіт перевести в положення "5В". Вихідна напруга стабілізатора повинна бути $5 \pm 0,03$ В.

4. Перемикач режиму перевести в положення "5с" або "2с". Притуливши блок детектування до контрольного джерела ^{60}Co перевірити показання приладу, які повинні відповідати величині, що записана в паспорті або свідоцтві про держперевірку приладу.

Допускається введення в результати вимірювань поправочного коефіцієнту, який визначається за формулою:

$$K = \frac{P_{\text{кс}}}{P_{\text{кр}}}$$

де $P_{\text{кс}}$ - показання від контрольного джерела, зафіксованого в свідоцтві про держперевірку;

$P_{\text{кр}}$ - показання від контрольного джерела, виміряного до початку роботи.

5. Перевірити платолічильну характеристику ФЕУ, для чого, не змінюючи положення контрольного джерела на блоці детектування, натиснути кнопку "Контр". Показання приладу при цьому повинні зберегтися в межах 90% від початкового.

6. Для вимірювання потужності експозиційної дози γ -фону детектор розміщують вертикально на відстані 80-100 см від поверхні землі. Послідовно перемикаючи діапазони вимірювань від 3000 до 30 мкР/год визначити діапазон вимірювань на якому стрілка амперметра займає середнє положення шкали. Записати показники 10 вимірювань через кожні 10 с і підрахувати середнє значення.

7. Після закінчення вимірювань встановити вихідні положення органів управління "3000 мкР/год" і "Выкл".

Лабораторна робота 6. Вимірювання поверхневого забруднення радіометром-дозиметром МКС-04Н

Порядок роботи

1. Поставити перемикач в положення " γ_1 ", натиснути клавішу СБРОС. У випадку ввімкнення світлодіода РАЗРЯД необхідно зарядити акумулятор. Прилад витримати у ввімкнутому стані 1 хв.

1.1. Вимірювання потужності еквівалентної дози


На вхідне вікно приладу встановити кришку-фільтр. Перемикач перевести в положення " γ_1 ". Зняти показання. Знайти середнє значення. Якщо показання на цифровому табло починають мерехтіти, перемикач встановити в положення " γ_2 ".

1.2. Вимірювання потужності потоку β -частинок.

Зняти з вхідного вікна кришку-фільтр. Перемикач перевести в положення “ β_1 ”. Встановити прилад на забруднену поверхню. Записати 5 показань та знайти середнє значення.

Лабораторна робота 7. Визначення поверхневого забруднення α - та β -частинками радіометрами КРА-1 та КРБ-1


Порядок роботи з радіометром КРБ-1

Перед роботою в положенні УСТ.НУЛЯ встановити нульове показання приладу. Якщо стрілка приладу відхиляється в положення ПРОВ.ПИТАНИЯ вліво від мітки “” необхідно замінити акумулятори.

Компенсацію показань від γ -фону проводити ручкою УСТ.НУЛЯ, для чого необхідно закрити заглушкою робоче вікно. Періодичну перевірку проводити за контрольним β -джерелом.

Порядок роботи з радіометром КРА-1

Радіометр КРА-1 призначений для вимірювання α -забруднення поверхонь. Діапазон вимірювання від 1 до 10^4 розп./хв. \cdot см².

Перед вимірюванням в положенні УСТ.НУЛЯ встановити нульове показання приладу. Якщо стрілка приладу відхиляється в бік положення ПРОВ.ПИТАНИЯ вліво від мітки “”, необхідно замінити акумулятори.

Лабораторна робота 8. Вимірювання питомої та об’ємної активності β -випромінюючих радіонуклідів на радіометрі “Бета”

Порядок роботи

1. Підключити до блоку індикації блок живлення «Електроніка Д 2-10М» і включити в мережу з напругою 220 В. При відсутності електричної мережі поставити в блок індикації три батареї типу А316 ТУ 16.729. 125-78.

2. Підключити блок детектування до блоку індикації.

3. Установити на робоче вікно блоку детектування захисну кришку зі сталевую пластину.

4. Перемикачем 5 ввімкнути блок індикації й встановити кнопкою 1 режим роботи 7. У цьому режимі на вхід перерахункового пристрою подаються імпульси з частотою 128 Гц, і на індикаторному табло 4 проводиться підрахунок імпульсів. Послідовна зміна цифр від 00 000 до 9 999 свідчить про нормальне функціонування блоку індикації.

Визначення радіоактивного забруднення різних поверхонь і продуктів харчування.

1. Встановити на блоці індикації режим роботи «2» або «3».

2. Послідовно натискаючи кнопки 2, «Пуск», виконати три виміри швидкості обрахунку фонових імпульсів N_{ϕ} і визначити середнє значення швидкості обрахунку \bar{N}_{ϕ} , с^{-1} .

3. Зняти з робочого вікна блоку детектування захисну кришку зі сталєвою пластиною й установити захисну сітку, що охороняє вікно лічильника від механічних ушкоджень. Помістити блок детектування на відстані не більше 1 см від досліджуваного об'єкта, провести три виміри швидкості обрахунку імпульсів від поверхні N_{π} і визначити середню швидкість обрахунку \bar{N}_{π} , с^{-1} .

4. Визначити рівень забруднення поверхні β -активними радіонуклідами за формулою:

$$P = K_3 (\bar{N}_{\pi} - \bar{N}_{\phi})$$

де K_3 – коефіцієнт градування; для лічильників СБТ-10 $K_3 = 3,5$.

37. Природна β -активність деяких кормів і продуктів, зумовлена ^{40}K , Бк/кг

Об'єкт	β -активність	Об'єкт	β -активність
Абрикос	67	Боби сушені	329
Ікра риби	115	Горох сушений	248
Капуста	135	Жмих лляний	383
Картопля	120	Жмих соняшниковий	153
Крупа гречана	33	Жом буряковий	12
Крупа вівсяна	93	Конюшина	159
Крупа ячмінна	57	Люцерна	165
Кукурудза зерно	111	Морква кормова	164
Цибуля	41	Сіно лугове	306
Масло вершкове	4	Сіно люцернове	510
Молоко	37	Силос	181
Морква столова	78	Трава лугова	96
Борошно соєве	629	Овес зерно	155
Сир твердий	26	Пшениця зерно	124
Сир	100	Рис зерно	19
М'ясо свинина	70	Жито зерно	156
М'ясо яловичина	93	Буряк кормовий	127
Огірки	93	Буряк цукровий	96
Риба	70	Сіно конюшини	303
Сало	44	Сіно лісове	269
Буряк столовий	141	Трава пасовища лісового	94
Квасоля	307	Ячмінь зерно	200

Визначення об'ємної і питомої активності β -випромінюючих нуклідів у пробах

1. Підготувати проби до виміру.

2. Підготувати радіометр до роботи зі свинцевим будиночком. Для цього вставити блок детектування у верхній паз будиночка і підключити його до блоку індикації.

3. Встановити режим роботи кнопкою 3. У нижній паз будиночка встановити кювету з бідистильованою водою і провести п'ять вимірів швидкості обрахунку фону N_{ϕ} . Обчислити середнє значення швидкості обрахунку фону \overline{N}_{ϕ} , с^{-1} . Фон визначають протягом робочого дня через кожні 1,5-2 год. роботи.

4. Помістити в будиночок кювету з досліджуваною пробою, заповненою до країв, і провести п'ять вимірів швидкості обрахунку в одному з режимів роботи: 3, 4, 5, 6. Визначити середню швидкість обрахунку $\overline{N}_{\text{пр}}$, с^{-1} .

4. Розрахувати об'ємну і питому активність за формулою:

$$A_{\text{пр}} = \frac{\overline{N}_{\text{пр}} - \overline{N}_{\phi}}{S^p}$$

де $\overline{N}_{\text{пр}}$ – середня швидкість обрахунку, обумовлена випромінюванням проби і фону, імп/с;

\overline{N}_{ϕ} – середня швидкість обрахунку фону, імп/с;

S^p – коефіцієнт чутливості приладу, визначений при його атестації або повірці.

Лабораторна робота 9. Експресне визначення за γ -випромінюванням радіонуклідів цезію у воді, ґрунті, продуктах харчування та сільськогосподарській продукції на радіометрі РУБ-01-П6

Порядок роботи

1. Ввімкнути радіометр в електричну мережу та витримати його ввімкнутим протягом 15 хв.
2. Встановити коефіцієнт нормування $K_{\text{норм. 1}}$, для чого на кодовому перемикачі встановити комбінацію цифр 1, 00000.
3. Натиснути кнопку “РЕЖИМ”, при цьому послідовно повинні висвітлюватись світловоди “ОСН”, “К”, “УИ”. В момент висвітлення світловоду “УИ” відпустити кнопку. При цьому з періодичністю 13 с буде вмикатися короткий звуковий сигнал, вимикатися і через 0,2 с знову висвітлюватись світловод _____, а на цифровому табло висвітлюватиметься число $(4,85 \pm 0,05) \text{ с}^{-1}$, яке вказує на нормальну роботу вимірювального пристрою.
4. Кнопкою % , встановити статистичну похибку одиничного виміру, що дорівнює 6%.
5. Встановити коефіцієнт нормування, рекомендований заводом-виготовлювачем для даного періоду часу, який складає для сосуду Марінеллі 28, а для чашки Дента – 22.
6. Кодовий перемикач “ФОН” необхідно перевести в нульову позицію. Комбінація цифр на кодовому перемикачі буде 2,81000 або 2,21000.

7. Виміряти інтенсивність підрахунку імпульсів струму від фону, N_{ϕ} . При вимірюванні фону в свинцевий будиночок поставити порожню чисту вимірювальну кювету та встановити режим роботи "ОСН". Визначити середнє значення фону N_{ϕ} за результатами 5 вимірювань, які висвітлюються на табло автоматично після звукового сигналу. При реєстрації показників звернути увагу на значення показника ступеню n в останньому розряді світлового табло. Піднести число до вказаного на табло ступеню.
8. Наповнити вимірювальну кювету пробєю, що досліджується, визначити масу проби в кг (m , кг) та помістити її в свинцевий будиночок. Кнопкою "РЕЖИМ" показники на табло вивести на нулі та знову встановити режим роботи "ОСН". Провести вимірювання інтенсивності рахунку імпульсів струму, що зумовлена даною пробєю та фоном, $N_{n+\phi}$. Визначити середнє значення $N_{n+\phi}$ за результатами 5 вимірювань.
9. Обчислити значення визначеної питомої активності, Бк/кг за формулою:

$$A_n = \frac{N_{n+\phi} - N_{\phi}}{m \cdot \text{кг}}$$

Задача.

Визначити вміст ^{137}Cs в білих грибах та придатність їх до вживання згідно ДР-97 урожаю 1991 р., місце збору – с. Христинівка Народицького району Житомирської області. Маса зразка 15 г.

Порядок роботи

1. Вимірюємо γ -фон та активність проби з фоном.

N_{ϕ}	$N_{np+\phi}$
1 –	1 -
2 –	2 -
3 –	3 -
4 –	4 -
5 –	5 -
N_{ϕ} середнє –	N_{ϕ} середнє –

2. Активність вимірюваного зразку розраховуємо за формулою:

$$A_n = \frac{N_{np+\phi} - N_{\phi}}{M \cdot \text{кг}}$$

Визначаємо придатність виміряного продукту до вживання згідно ДР-2006 (табл. 5). Для чого отриманий результат ділимо на значення допустимого рівня для даного продукту. Якщо отриманий результат нижче за значення допустимого рівня, то ділення виконуємо навпаки.

Лабораторна робота 10. Визначення вмісту ^{137}Cs в організмі людини радіометром РУБ-01-П-6

Порядок роботи

1. Ввімкнути радіометр в електричну мережу та витримати його ввімкнутим протягом 15 хв.
2. Встановити коефіцієнт нормування 1, для чого на кодовому перемикачі встановити комбінацію цифр 1, 00000.
3. Натиснути кнопку “РЕЖИМ”, при цьому послідовно повинні висвітлюватись світловоди “ОСН”, “К”, “УИ”. В момент висвітлення світловоду “УИ” відпустити кнопку. При цьому з періодичністю 13 с буде вмикатися короткий звуковий сигнал, вимикатися і через 0,2 с знову висвітлюватись світловод _____, а на цифровому табло висвітлюватиметься число $(4,85 \pm 0,05) \text{ с}^{-1}$, яке вказує на нормальну роботу вимірювального пристрою.
4. Кнопкою % , встановити статистичну похибку одиничного виміру, що дорівнює 6%.
5. Розмістити детектор на місці, де буде проводитись вимірювання імпульсів від людини.

Порядок проведення вимірювання та розрахунків

1. Проводимо 10 замірів фону $N_{\text{ф}}$ та визначаємо середнє арифметичне. Якщо на табло висвітлюється цифра 0,65 в ступені 2 читається як 65, а якщо 4,95 в ступені 1 – читається як 49,5.

2. Проводимо 5 замірів показників приладу від людини $N_{\text{л}}$ та визначаємо середнє арифметичне.

Зразок:

$N_{\text{ф}}$	$N_{\text{л}}$
1 – 65	1 – 51
2 – 67	2 – 53
3 – 66	3 – 52
4 – 69	4 – 53
5 – 67	5 – 51
6 – 65	
7 – 66	
8 – 67	
9 – 67	
10 – 65	
$N_{\text{ф}}$ середнє – 66,4	$N_{\text{л}}$ середнє – 52

Фактичні дані вимірювань:

$N_{\text{ф}}$	$N_{\text{л}}$
1 -	1 -
2 -	2 -
3 -	3 -
4 -	4 -
5 -	5 -
6 -	
7 -	
8 -	
9 -	
10 -	
$N_{\text{ф}}$ середнє -	$N_{\text{л}}$ середнє -

3. Величина інкорпорованої активності визначається за формулою:

$$A = (N_{\text{люд}} - N_{\text{ф}} \cdot K_{\text{екр}}) \cdot K_{\text{гр}} = \text{нКи/організм}$$

$K_{\text{екр}}$ та $K_{\text{гр}}$ - знаходимо в таблиці 38.

$$\text{Зразок: } A = (52 - 66,4 \cdot 0,75) \cdot 13,4 = (52 - 49,8) \cdot 13,4 = 29,48 = 29,5 \text{ нКи/організм}$$

Фактично: $A =$

38. Значення перерахункових коефіцієнтів в залежності від маси обстежуваного

Маса тіла, кг	Коефіцієнт екранування від одиниці маси, $K_{\text{екр}}$	Коефіцієнт градування, $\text{нКи/о, } K_{\text{гр}}$
10	0.90	4.3
15	0.87	5.2
20	0.83	6.5
25	0.82	7.5
30	0.80	8.4
35	0.78	9.2
40	0.77	10.0
45	0.77	10.7
50	0.76	11.4
55	0.76	12.1
60	0.75	12.8
65	0.75	13.4
70	0.74	14.0
75	0.74	14.7
80	0.74	15.2
85	0.74	15.8
90	0.73	16.4
95	0.73	16.9
100	0.73	17.5

4. Переводимо цей показник в одиницю системи СІ Бекерель. Для чого отриманий результат множимо на 37 (1 нКи = 37 Бк):

Зразок: $29,5 \cdot 37 = 1091,5$ Бк/організм

Фактично:

5. Для визначення добового надходження на плато отриманий показник ділиться на 80, тому що при довготривалому надходженні радіонукліду ^{137}Cs через 3 ефективних періоди піввиведення його з організму (в середньому 300 діб) в організмі встановлюється рівновага між надходженням з раціоном та вмістом його в організмі. За цей період кратність накопичення становить 80, тобто в організмі накопичується ^{137}Cs у 80 разів більше, ніж надходить з раціоном.

Зразок: $1091,5 : 80 = 13,7$ Бк/добу

Фактично:

Згідно „Норм радіаційної безпеки” (НРБ) допустиме надходження ^{137}Cs в добовому раціоні становить 137 Бк.

6. Для визначення дози внутрішнього опромінення за рік ^{137}Cs використовуємо дані “Довідника з радіаційної безпеки” (М.Ф. Козлов, 1987),

де вказано, що при надходженні з раціоном 37000 Бк ^{137}Cs еквівалентна доза за рік становить 21 сЗв. Складаємо пропорцію.:

$$\begin{array}{lcl} \text{Зразок: } 37000 \text{ Бк} & - & 21 \text{ сЗв} \\ 13,7 \text{ Бк} & - & x \\ X = (13,7 \cdot 21) : 37000 & = & 0,008 \text{ сЗв} \end{array}$$

$$\begin{array}{lcl} \text{Фактично: } 37000 \text{ Бк} & - & 21 \text{ сЗв} \\ & - & x \\ X = & & \end{array}$$

Згідно НРБУ-97 допустимий ліміт дози для осіб категорії В становить 1 мЗв, або 0,1 сЗв.

Лабораторна робота 11. Визначення забруднення території ^{137}Cs за допомогою радіометра РУБ-01-П6

Порядок роботи

Підготовку радіометра до роботи проводимо аналогічно лабораторній роботі 10.

1. Висушений ґрунт розтерти, просіяти через сито та заповнити ним посуд Марінеллі.
2. Визначити масу зразка ґрунту шляхом зважування на аналітичних терезах.
3. Визначити об'ємну масу 1 см^3 ґрунту.
4. Виміряти показники фону та проби з фоном аналогічно лабораторній роботі 10.
5. Розрахунки забруднення ґрунту провести за формулою аналогічно лабораторній роботі 10.

Зразок. Маса ґрунту 1305 г. $N_{\phi} - 75$ імп. $N_{np+\phi} - 1155$ імп.

1. Визначаємо питому масу 1 см^3 ґрунту, для чого отриману масу ділимо на об'єм ($1 \text{ л} = 1000 \text{ см}^3$): $1305 \text{ г} : 1000 \text{ см}^3 = 1,305 \text{ г/см}^3 = 1,3 \text{ г/см}^3$

2. Визначаємо вміст ^{137}Cs на 1 м^2 , якщо товщина забрудненого шару становила 23 см.

а) вираховуємо масу забрудненого шару, для чого перемножуємо показники площі ґрунту, товщини шару і об'ємної маси: $100 \text{ см} \times 100 \text{ см} \times 23 \text{ см} \times 1,3 \text{ г/см}^3 = 299000 \text{ г} = 299 \text{ кг}$

б) знаходимо вміст ^{137}Cs на 1 м^2 , для чого забруднення 1 кг множимо на визначену масу ґрунту: $827,6 \text{ Бк/кг} \times 299 \text{ кг} = 247452,4 \text{ Бк} = 247,45 \text{ кБк}$

3. Визначаємо забруднення території в Ки/км^2 , для чого ділимо отримане забруднення на забруднення при 1 Ки ($1 \text{ Ки/км}^2 = 37 \text{ кБк/м}^2$): $247,45 \text{ кБк/м}^2 : 37 \text{ кБк/м}^2 = 6,7 \text{ Ки/км}^2$

Лабораторна робота 12: Прижиттєве визначення вмісту ^{137}Cs в м'язовій тканині сільськогосподарських тварин за допомогою гамма-спектрометру СУГ-1М

Порядок роботи

1. Встановлюють блок детектування (БД) у положення, що відповідає параметрам тварини за висотою та утримують його протягом вимірювання. Натискають ВВОД, на дисплеї виникає напис :

ИЗМЕРЕНИЕ ФОНА ЖИВОТНЫЕ ВРЕМЯ ИЗМЕРЕНИЯ

0:00:00

0±0 Бк/кг

починається процес вимірювання фону - через кожні 20 секунд на дисплеї відображається час, що пройшов з початку вимірювання, і вимірюване значення фону із абсолютною похибкою. Вимірювання фону продовжують поки величина похибки вимірювання не досягне значення менш ніж ± 40 Бк/кг, після чого натискають кнопку СБРОС. Приблизно через 20 секунд вимірювання фону припиняється і в лівому верхньому куті дисплею виникає символ «0».

2. Якщо у цьому місці вже проводилось вимірювання фону, то його значення вводять за допомогою кнопок \leftarrow , \rightarrow , \uparrow , і \downarrow натискають СБРОС, на дисплеї виникає напис:

НОМЕР ИЗМЕРЕНИЯ ? XX

МАССА? 250 - 300 кг.

3. За допомогою кнопок \uparrow , і \downarrow вводять вагу тварини, яку визначають шляхом зважування, або експертно. Вагу обирають із дискретного ряду:

45-60-75-100-150-200-250-300-350-400-50-500-550-600 кг.

4. Для визначення питомої активності ^{137}Cs у м'язових тканинах тварини встановлюють БД щільно до стегнової частини тварини та натискають кнопку ВВОД.

На дисплеї виникає напис:

ИЗМЕРЕНИЕ

ЖИВОТНЫЕ

УДЕЛЬНАЯ АКТИВНОСТЬ ЦЕЗИЯ-137, БК/КГ

ВРЕМЯ ИЗМЕРЕНИЯ:

.0:00:00

ДР-97-2006

Набір імпульсів супроводжується звуковими сигналами, частота яких пропорційна кількості зареєстрованих імпульсів;

3.5. Через час, який не перевищує 100 с (після досягнення необхідної величини похибки), натискають кнопку СБРОС, вимірювання припиняється, про що свідчить звуковий сигнал, і на дисплеї виникає значення питомої активності ^{137}Cs в Бк/кг із абсолютною похибкою. Якщо сума вимірюваної активності та абсолютної похибки вимірювання не перевищує 200 Бк/кг (згідно до ДР-2006) на дисплеї виникає запис ЧИСТО, якщо перевищує - запис ГРЯЗНО.

3.6. Для перегляду енергетичного спектру натискають кнопку СБРОС. Маркер має знаходитись в каналі, що відповідає центру фотопіку. Якщо фотопік змістився, за допомогою кнопок \leftarrow , \rightarrow , \uparrow , і \downarrow повертають його до центру фотопіку та натискають кнопку ВВОД. У правому верхньому куті буде відображено уточнене значення питомої активності. Натискають кнопку СБРОС після чого виникає запит:

СОХРАНИТЬ СПЕКТР XXX?

Натискуванням кнопки ВВОД спектр зберігається у флеш-пам'яті, натискуванням кнопки СБРОС спектр знищується. Після натискування будь-яких з цих кнопок прилад переходить до нового виміру - на дисплеї виникає запис:

НОМЕР ИЗМЕРЕНИЯ ? XX

МАССА? 250-300 кг.

Номер вимірювання зростає на одиницю після кожного збереження попереднього спектру. Якщо розгляд спектру не є необхідним, після закінчення вимірювання і запису значення питомої активності, натискають кнопку ВВОД.

3. СИТУАЦІЙНІ ЗАДАЧІ З ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ ПРОДУКЦІЇ РОСЛИННИЦТВА, ТВАРИННИЦТВА ТА ЛІСОКОРИСТУВАННЯ

3.1. Прогнозування забруднення продукції рослинництва

Зразок: Визначити вміст ^{137}Cs в зерні вівса, придатність його до використання та можливі заходи по зниженню надходження радіонуклідів в рослини на дерново-підзолистих ґрунтах зі ступенем забруднення 1350 Бк/кг. Питома маса ґрунту 1,3 г/см³, товщина забрудненого шару 25 см, вміст калію 2 мг/100 г.

Варіант власного завдання визначається за таблицею 39.

Рішення: 1. Вираховуємо масу забрудненого шару ґрунту на 1 м² для чого перемножуємо показники площі ґрунту, товщини шару і об'ємної маси:

$$100 \text{ см} \times 100 \text{ см} \times 25 \text{ см} \times 1,3 \text{ г/см}^3 = 325000 \text{ г} = 325 \text{ кг}$$

2. Знаходимо вміст ^{137}Cs на 1 м², для чого забруднення 1 кг множимо на визначену масу ґрунту: 1350 Бк/кг \times 325 кг = 438750 Бк/м² = 438,8 кБк/м²

3. Визначаємо забруднення території в Кі/км², для чого ділимо отримане забруднення на забруднення при 1 Кі (1 Кі/км² = 37 кБк/м²):

$$438,8 \text{ кБк/м}^2 : 37 \text{ кБк/м}^2 = 11,85 \text{ Кі/км}^2$$

4. Знаходимо коефіцієнт переходу ^{137}Cs в зерно вівса на дерново-підзолистих ґрунтах при вмісті калію 2 мг/100 г (таблиця 40). Він становить 57 Бк/кг при щільності забруднення 1 Кі/км²

5. Визначаємо забруднення зерна вівса, для чого отримане забруднення території 5,48 Кі/км² множимо на знайдений коефіцієнт для 1 Кі: 11,85 \times 57 Бк/кг = 675,5 Бк/кг.

6. Визначаємо придатність отриманої продукції, для чого у таблиці 5 знаходимо допустимий рівень забруднення за ^{137}Cs згідно ДР-2006. Для продовольчого зерна він складає 50 Бк/кг.

Отже, перший висновок: продукція непридатна для використання, так як її забруднення за ^{137}Cs перевищує допустимий рівень у 13,5 рази (675,5 Бк/кг : 50 Бк/кг = 13,5).

Далі розпочинаємо дії щодо можливого використання угіддя для вирощування вівса чи іншої продукції, яка б відповідала вимогам ДР-2006.

7. Визначаємо необхідний коефіцієнт переходу для отримання придатної продукції, для чого коефіцієнт переходу 57 (Бк/кг)/Кі/км² ділимо на 13,5: 57 : 13,5 = 4,2.

8. Знаходимо у таблиці 40 в колонці для вівса таке або менше за нього значення коефіцієнту переходу при відповідному вмісті калію в ґрунті. Найменший коефіцієнт для вівса становить 5,7 навіть при максимальній кількості - 20 мг на 100 г калію.

Таким чином, другий висновок: отримати придатне зерно вівса для хліба і хлібопродуктів у даній ситуації неможливо.

Одним з варіантів подальшого вирішення може бути підбір культури, близької за господарським значенням, але з меншим коефіцієнтом переходу ^{137}Cs . Такою культурою може бути ячмінь.

9. У таблиці 40 знаходимо коефіцієнт переходу ^{137}Cs в зерно ячменю на дерново-підзолистих ґрунтах при вмісті калію 2 мг на 100 г. Він становить 10 Бк/кг при 1 Кі/км².

10. Визначаємо можливе забруднення зерна ячменю, для чого отримане забруднення території по ^{137}Cs 11,85 Кі/км² (пункт 3) множимо на коефіцієнт переходу для 1 Кі/км² - 10 Бк/кг: 11,85 \times 10 = 118,5 Бк/кг.

Отже, третій висновок: зерно ячменю теж непридатне для використання як продовольче, так як перевищує рівень забруднення за ^{137}Cs у 2,4 рази ($118,5 \text{ Бк/кг} : 50 \text{ Бк/кг} = 2,4$).

11. Визначаємо необхідний коефіцієнт переходу для отримання придатного зерна, для чого коефіцієнт $10 \text{ (Бк/кг)/Ки/км}^2$ ділимо на 2,4: $10 : 2,4 = 4,2$.

12. Знаходимо (таблиця 40), при якому вмісті калію на дерново-підзолистих ґрунтах коефіцієнт переходу ^{137}Cs в зерно ячменю буде становити 4,2 Бк/кг або менше. При вмісті калію 5 мг на 100 г коефіцієнт буде становити 4,1.

13. Визначаємо дефіцит калію в ґрунті, для чого від необхідних 5 мг віднімаємо 2 мг наявного в ґрунті калію за умовами задачі: $5 - 2 = 3 \text{ мг}$.

Відомо, що для підвищення вмісту калію на 1 мг у 100 г в орному шарі ґрунту необхідно внести 30 кг калійних добрив по діючій речовині.

14. Визначаємо необхідну кількість внесення калійних добрив по діючій речовині: $30 \text{ кг} \times 3 = 90 \text{ кг}$

15. Визначаємо прогнозоване забруднення зерна ячменю після внесення калійних добрив, для чого очікуваний коефіцієнт переходу 4,1 Бк/кг для 1 Ки/км^2 множимо на забруднення території - $11,85 \text{ Ки/км}^2 : 4,1 \times 11,85 = 48,58 \text{ Бк/кг}$

Кінцевий висновок: на даній території можна отримати придатне зерно ячменю після внесення 90 кг калійних добрив по діючій речовині; при цьому його забруднення по ^{137}Cs буде в 1,03 рази нижче за допустимий рівень ($50 : 48,58 = 1,03$).

39. Варіанти ситуаційних задач для самостійного рішення студентами факультетів агробіологічного напрямку

№ п/п	Назва культури	Забруднення ґрунту, Бк/кг	Об'ємна маса 1 см^3 , г	Товщина забруд. шару, см	Вміст К, мг/100 г
1	2	3	4	5	6
1	Горох	750	1.3	22	5
2	Кукурудза	900	1.3	23	6
3	Овес	798	1.2	24	3
4	Ячмінь	600	1.3	25	4
5	Озиме жито	560	1.3	24	7
6	Озима пшениця	912	1.2	22	5
7	Томати сорту Лідер	705	1.4	24	2
8	Цибуля ріпчаста	602	1.3	27	9
9	Капуста Брюссельська	627	1.2	25	5
10	Морква сорту Артек	531	1.3	25	4
11	Столовий буряк сорту Раннє диво	544	1.4	24	5
12	Капуста Савойська	717	1.4	21	5
13	Горох	616	1.2	22	3
14	Кукурудза	770	1.4	23	2
15	Овес	575	1.4	23	3
16	Ячмінь	589	1.4	26	4
17	Озиме жито	527	1.4	25	7
18	Яра пшениця	452	1.4	27	8
19	Соя	495	1.4	24	6
20	Гарбуз Стофунтовий	574	1.4	22	2
21	Картопля сорту Світанок	1670	1.4	23	2
22	Картопля сорту Луговська	727	1.3	22	5
23	Столовий буряк сорту Червона куля	463	1.2	24	6
24	Капуста сорту Амагер 611	565	1.2	25	5

25	Перець солодкий	1247	1.2	20	4
26	Редиска Червона з білим кінчиком	760	1.5	23	8
27	Гречка	462	1.2	20	10
28	Кабачки сорту Грибовські	567	1.2	25	5
29	Огірки сорту Конкурент	515	1.2	22	3
30	Часник	470	1.2	20	4

40. Середньобагаторічні значення $K_p^{137}\text{Cs}$ для різних культур в залежності від вмісту обмінного калію в ґрунті, $(\text{Бк/кг})/(\text{Кі/км}^2)^*$

Вміст обмін. К, мг/100 г	Зернові та зернобобові (зерно)													
	Кукурудза	Пшениця озима	Ячмінь	Тритикале	Пшениця яра	Просо	Жито	Овес	Боби	Гречка	Соя	Горох	Вика	Люпин жовтий
Дерново-підзолисті														
0.5	33	44	41	67	56	70	81	230	330	420	340	370	48	2400
1	17	22	20	34	28	35	40	110	160	210	180	190	24	1200
2	8.3	11	10	17	14	18	20	57	82	100	86	94	12	600
3	4.4	5.8	5.4	8.8	7.4	9.2	11	30	43	55	45	49	63	320
4	4.1	5.5	5.1	8.4	7	8.8	10	29	41	52	43	47	60	300
5	3.3	4.4	4.1	6.7	5.6	7	8.1	23	33	42	34	37	48	240
7	2.3	3.1	2.9	4.7	3.9	4.9	5.7	16	23	29	24	26	33	170
9	1.8	2.4	2.2	3.7	3.1	3.8	4.4	13	18	23	19	21	26	130
11	1.5	2	1.9	3.1	2.6	3.2	3.7	11	15	19	16	17	22	110
13	1.3	1.7	1.6	2.6	2.2	2.7	3.2	8.9	13	16	13	15	19	95
15	1.1	1.5	1.4	2.3	1.9	2.4	2.8	7.8	11	14	12	13	16	83
20	0.82	1.1	1	1.7	1.4	1.8	2	5.7	8.2	10	8.6	9.4	12	61

Овочеві												
Вміст обмін. К мг/100 г	Баклажани	Цибуля ріпчаста, зелень	Цибуля батун, перо	Цибуля шніт, перо	Цибуля ріпчаста	Перець Ратунда	Перець солодкий	Кабачки, Цукіні	Кабачки Одеські 52	Кабачки Грибовські 37	Гарбуз Мускатний	Гарбуз Стофунтовий
Дерново-підзолисті												
0.5	4.8	12	15	11	15	19	26	22	19	22	22	33
1	2.4	6.1	7.4	5.6	7.4	9.3	13	11.1	9.25	11.1	11.1	16.7
2	1.2	3.1	3.7	2.8	3.7	4.6	6.5	5.6	4.6	5.6	5.6	8.3
3	0.63	1.6	2.0	1.5	2.0	2.4	3.4	2.9	2-4	2.9	2.9	4.4
4	0.6	1.5	1.9	1.4	1.9	2.3	3.2	2.8	2.3	2.8	2.8	4.2
5	0.48	1.2	1.5	1.1	1.5	1.9	2.6	2.2	1.9	2.2	2.2	3.3
7	0.34	0.85	1	0.78	1	1.3	1.8	1.6	1.3	1.6	1.6	2.3
9	0.26	0.67	0.81	0.61	0.81	1	1.4	1.2	1.0	1.2	1.2	1.8
11	0.23	0.56	0.69	0.52	0.69	0.85	1.2	1.8	0.85	1.8	1.8	1.5
13	0.19	0.48	0.58	0.43	0.58	0.72	1	0.87	0.72	0.87	0.87	1.3
15	0.16	0.41	0.5	0.38	0.5	0.63	0.89	0.75	0.63	0.75	0.75	1.1
20	0.12	0.39	0.37	0.28	0.37	0.46	0.65	0.56	0.46	0.56	0.56	0.83

Вміст обмін. К, мг/100 г	Овочеві (продовження)										
	Патисони	Часник	Українець тепличний	Томати				Огірки Конкурент	Огірки Далекосхідні	Фізалис суничний	Фізалис мексиканський
				Світанок	Іскорка	Заказний 280	Лідер				
Дерново-підзолисті											
0.5	33	33	15	30	37	37	44	41	67	33	41
1	17	17	7.4	15	19	19	22	20	33	17	20
2	8.3	8.3	3.7	7.4	9.3	9.3	11	10	17	8.3	10
3	4.4	4.4	2.0	3.9	4.9	4.9	5.9	5.4	8.8	4.4	5.4
4	4.2	4.2	1.9	3.7	4.6	4.6	5.6	5.1	8.3	4.2	5.1
5	3.3	3.3	1.5	3.0	3.7	3.7	4.4	4.1	6.7	3.3	4.1
7	2.3	2.3	1.0	2.1	2.6	2.6	3.1	2.9	4.7	2.3	2.9
9	1.8	1.8	0.81	1.6	2.0	2.0	2.4	2.2	3.7	1.8	2.2
11	1.5	1.5	0.68	1.4	1.7	1.7	2.0	1.9	3.1	1.5	1.9
13	1.3	1.3	0.58	1.2	1.4	1.4	1.7	1.6	2.6	1.3	1.6
15	1.1	1.1	0.5	1.0	1.3	1.3	1.5	1.4	2.3	1.1	1.4
20	0.83	0.83	0.37	0.74	0.93	0.93	1.8	1.0	1.7	0.83	1

Вміст обмін. К, мг/100 г	Овочеві (продовження)											
	Шпинат	Морква Нантська	Морква Артек	Редиска			Петрушка	Кориандр	Календула	Капуста		
				Зоря	Красний Великан	Червона з білим кінчиком				Амагер 611	Брауншвейзька	Савойська
Дерново-підзолисті												
0.5	41	48	56	56	67	110	37	63	63	63	59	67
1	20	24	28	28	33	54	19	32	32	32	30	33
2	10	12	14	14	17	27	9	16	16	16	15	17
3	5.4	6.3	7.3	7.3	8.8	14	4.9	8.4	8.4	8.4	7.8	8.5
4	5.1	6.0	6.9	6.9	8.3	13	4.6	7.9	7.9	7.9	7.4	8.3
5	4.1	4.8	5.6	5.6	6.7	11	3.7	6.3	6.3	6.3	5.9	6.7
7	2.9	3.4	3.9	3.9	4.7	7.5	2.6	4.4	4.4	4.4	4.1	4.7
9	2.2	2.7	3.1	3.1	3.7	5.9	2.0	3.5	3.5	3.5	3.3	3.7
11	1.9	2.2	2.6	2.6	3.1	4.9	1.7	2.9	2.9	2.9	2.7	3.1
13	1.6	1.9	2.2	2.2	2.6	4.2	1.4	2.5	2.5	2.5	2.4	2.6
15	1.4	1.6	1.9	1.9	2.3	3.7	1.3	2.1	2.1	2.1	2.0	2.3
20	1.0	1.2	1.4	1.4	1.7	2.7	9.3	1.6	1.6	1.6	1.5	1.7

Вміст обмін. К, мг/100 г	Овочеві (продовження)											
	Капуста							Перець гіркий	Пастернак	Фенхель	Кріп Грибовський	Цибуля Духмяна
	Червонокочанна	Білокріжкова	Брюссельська	Цвітінна	Рання	Кольрабі	Гілляста					
Дерново-підзолисті												
0.5	70	81	130	63	110	120	120	74	78	89	89	100
1	35	41	65	32	54	59	59	37	39	44	44	50
2	18	20	32	16	27	30	30	19	19	22	22	25
3	9.3	11	17	8.3	14	16	16	9.8	10	12	12	13
4	8.8	10	16	7.9	13	15	15	9.3	9.7	11	11	13
5	7.0	8.1	13	6.3	11	12	12	7.4	7.8	8.9	8.9	10.0
7	4.9	5.7	9.1	4.4	7.5	8.3	8.3	5.2	5.4	6.2	6.2	7.0
9	3.9	4.5	7.1	3.5	5.9	6.5	6.5	4.1	4.3	4.9	4.9	5.5
11	3.2	3.7	6.0	2.9	4.9	5.5	5.5	3.5	3.6	4.1	4.1	4.6
13	2.7	3.2	5.1	2.5	4.2	4.6	4.6	2.9	3.0	3.5	3.5	3.9
15	2.4	2.8	4.4	2.1	3.7	4.0	4.0	2.5	2.6	3.0	3.0	3.4
20	1.8	2.0	3.2	1.6	2.7	3.0	3.0	1.9	1.9	2.2	2.2	2.5

Вміст обмін. К, мг/100 г	Овочеві (продовження)					
	Картопля, сорти					Топінамбур
	Невська	Незабудка	Луговська	Світанок	Каскад	
Дерново-підзолисті						
0.5	63	63	63	89	44	63
1	32	32	32	44	22	32
2	16	16	16	22	11	16
3	8.3	8.3	8.3	12	5.9	8.3
4	7.9	7.9	7.9	11	5.6	7.9
5	6.3	6.3	6.3	8.9	4.4	6.3
7	4.4	4.4	4.4	6.2	3.1	4.4
9	3.5	3.5	3.5	4.9	2.4	3.5
11	2.9	2.9	2.9	4.1	2.0	2.9
13	2.5	2.5	2.5	3.5	1.7	2.5
15	2.1	2.1	2.1	3.0	1.5	2.1
20	1.6	1.6	1.6	2.2	1.8	1.6

Вміст обмін. К, мг/100 г	Овочеві (продовження)											
	Салат	Бурак столовий				Чорнушка	Ісоп	Щавель	Чабер	Змієголовик	Крес-салат	Гірчиця салатна
		Бордо 237	Носівський	Червона куля	Раннє диво							
Дерново-підзолисті												
0,5	100	110	100	130	140	120	140	140	85	230	240	320
1	52	54	50	63	69	61	72	72	93	110	120	59
2	26	27	25	32	34	31	36	36	46	57	59	80
3	14	14	13	17	18	16	19	19	24	30	31	42
4	13	13	13	16	17	15	18	18	23	29	30	40
5	10	11	10	13	14	12	14	14	19	23	24	32
7	7.3	7.5	7.0	8.8	9.6	8.6	10	10	13	16	17	22
9	5.7	5.9	5.5	6.9	7.5	6.7	7.9	7.9	10	13	13	18
11	4.8	4.9	4.6	5.8	6.3	5.6	6.6	6.6	8.5	11	11	15
13	4.0	4.2	3.9	4.9	5.3	4.8	5.6	5.6	7.2	9.0	9.2	12
15	3.5	3.7	3.4	4.3	4.7	4.2	4.9	4.9	6.3	7.8	8.1	11
20	2.6	2.7	2.5	3.2	3.4	3.1	3.6	3.6	4.6	5.7	5.9	8.0

3.2. Прогнозування вмісту радіонуклідів в продукції тваринництва

При радіоактивному забрудненні сільськогосподарських угідь радіонуклідами на перше місце виходить проблема прогнозу та мінімізації вмісту радіонуклідів у тваринницькій продукції, в першу чергу в молоці та м'ясі. З цими продуктами харчування в організм людини надходить 70-90% радіонуклідів йоду, цезію та стронцію, які викликають внутрішнє опромінення населення та його критичної групи - дітей.

На теперішній час основним завданням щодо зменшення дозового навантаження на організм людини є отримання на забруднених радіонуклідами територіях продукції тваринництва, яка відповідає новим, жорсткішим вимогам радіаційної безпеки - допустимим рівням вмісту радіонуклідів ^{137}Cs і ^{90}Sr в харчових продуктах і подальше зниження вмісту радіонуклідів до значень контрольних рівнів. Контрольні рівні вмісту радіонукліду ^{137}Cs у молоці - 37 Бк/л; у м'ясі - 74 Бк/кг - значно нижчі допустимих рівнів. Вони закріплюють досягнення підприємств АПК при введенні тваринництва на цих територіях і затверджуються адміністрацією області.

Найбільш вразливими галузями тваринництва щодо одержання придатної для вживання продукції є молочне скотарство та вівчарство.

Максимально допустимі рівні щільності забруднення територій, на яких можна одержати молочні продукти, що відповідають вимогам ДР-97, досить низькі. Для виробництва молока корів з використанням кормів

природних угідь допустима щільність забруднення радіоцезієм торф'яно-болотних ґрунтів 3,7 кБк/м²; торф'яних - 40,7; дерново-підзолистих супіщаних - 74; сірих лісових - 277 кБк/м².

Для виробництва м'яса допустима щільність забруднення названих ґрунтів у два рази вища.

Ведення всіх галузей тваринництва на чорноземах проводиться без обмеження. Вміст радіонуклідів ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr як у молоці, так і у м'ясі не перевищує допустимих рівнів, встановлених для дитячого харчування.

Прогноз вмісту радіонуклідів в продуктах тваринництва (A_{прог}) розраховують за формулою:

$$A_{\text{прог}} = \frac{A_{\text{рац}} \cdot K_{\Pi}}{100}$$

де A_{рац} - вміст радіонуклідів в добовому раціоні, Бк;

K_Π - коефіцієнт переходу радіонукліду з раціону в 1 кг продукту, %.

Значення коефіцієнтів переходу радіонуклідів ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr з раціону в продукти тваринництва наведені в таблиці 41.

Вміст радіонуклідів в кормах добового раціону визначають виходячи із щільності забруднення території радіонуклідами, яку прийнято виражати в одиницях кБк/м² та Кі/км². В табл. 43,44,45 наведені коефіцієнти переходу радіонуклідів ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr в кормові культури (Бк/кг) при щільності забруднення різних типів ґрунтів 1 кБк/м².

41. Середні значення коефіцієнтів переходу (K_Π) радіонуклідів із добового раціону в продукцію тваринництва (% від вмісту в раціоні на 1 кг продукту).

Вид продукції	Радіонукліди	
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
Молоко корів	1.0	0.13
Молоко кіз	6,0	0,6
Яловичина*	4	0,04
Конина	8	0,08
Свинина	15	0,10
Баранина	15	0,10
М'ясо куряче	45	0,20
Яйця	3,5	3,2

*Коефіцієнт переходу у м'ясо телят віком до 6 місяців дорівнює 17 %.

А в табл. 43 коефіцієнти переходу ¹³⁷Cs у зерно та солому (Бк/кг) при щільності забруднення території 1 Кі/км². Розрахунок роблять за формулою:

$$A_{\text{корму}} = K_{\Pi} \cdot H$$

де A_{корму} – вміст радіонукліду в кормі, Бк/кг;

K_Π – коефіцієнт переходу радіонукліду з ґрунту в кормові культури (табл. 42,43,44,45);

H – щільність забруднення території радіонуклідами, кБк/м², або Кі/км².

42. Коефіцієнти переходу ^{137}Cs в кормові культури (Бк/кг) при щільності забруднення території 1 кБк/м²

Культури	Тип ґрунту, рН сольової витяжки			
	Торф'яно-болотні, 4.0-5.0	Дерново-підзолисті 4.5-5.5	Сірі лісові 5.6-6.5	Чорноземні 6.6-7.5
Сіно природних трав	15.0	4.1	1.8	0.15
Сіно сіяних трав	4.5	2.9	1.4	0.1
Трави з природних пасовищ	4.9	1.0	1.5	0.05
Трави з окультурених пасовищ	1.6	0.7	0.4	0.03
Люцерна	-	0.8	0.2	0.06
Конюшина	1.9	1.6	0.3	0.1
Віко-вівсяна суміш	-	0.7	0.3	0.11
Люпин	-	12.9	6.4	1.1
Ріпак озимий	-	0.46	0.08	0.01
Ячмінь озимий	0.28	0.12	0.04	< 0.01
Буряк кормовий	0.9	0.4	0.18	0.07
Кукурудза на силос	0.35	0.15	0.09	0.01
Картопля	0.35	0.14	0.08	0.02

43. Коефіцієнти переходу ^{137}Cs в зерно та солому (Бк/кг) при щільності забруднення території 1 Кі/км²

Культури	Тип ґрунтів					
	Дерново-підзолисті		Сірі лісові		Чорноземні	
	зерно	солома	зерно	солома	зерно	солома
Кукурудза	3.3	20.0	0.56	3.4	0.1	0.6
Пшениця озима	4.4	14.0	0.75	2.3	0.13	1.4
Ячмінь	4.1	9.0	0.7	1.5	0.12	0.3
Пшениця яра	5.6	11.0	0.9	2.0	0.2	0.75
Овес	23.0	36.0	3.9	7.1	0.69	1.1
Соя	34.0	34.0	5.8	5.7	1.0	1.0
Горох	37.0	51.0	6.4	8.7	1.1	1.5
Люпин	240.0	129.0	41.0	22.0	7.3	3.9

44. Коефіцієнти переходу ^{90}Sr в кормові культури (Бк/кг) при щільності забруднення території 1 кБк/м²

Культури	Тип ґрунту, рН сольової витяжки			
	Торф'яно-болотні, 4.0-5.0	Дерново-підзолисті 4.5-5.5	Сірі лісові 5.6-6.5	Чорноземні 6.6-7.5
Сіно природних трав	28.0	30.0	7.0	3.8
Сіно сіяних трав	15.0	14.0	4.0	2.0
Трави з природних пасовищ	7.2	7.5	1.8	0.9
Трави з окультурених пасовищ	4.2	3.8	1.0	0.5
Люцерна	-	24.0	12.0	4.5
Конюшина	32.0	38.0	7.0	2.7
Люпин	-	124.0	55.0	24.0

Бурак кормовий	0.78	0.32	0.12	0.05
Картопля	0.6	0.5	0.35	0.07
Кукурудза на силос	4.4	6.2	0.9	0.6

45. Коефіцієнти переходу ^{90}Sr в зерно та солому (Бк/кг) при щільності забруднення території 1 Кі/км²

Культури	Тип ґрунтів					
	Дерново-підзолисті		Сірі лісові		Чорноземні	
	зерно	солома	зерно	солома	зерно	солома
Кукурудза	0.2	3.0	0.05	0.75	0.1	1.5
Пшениця озима	2.4	50.4	0.3	9.6	0.15	2.9
Ячмінь	3.8	36.0	0.5	11.0	0.2	4.0
Пшениця яра	4.0	84.0	0.5	10.0	0.3	6.0
Овес	3.8	76.0	0.5	11.0	0.2	4.0
Горox	7.2	281.0	0.9	32.4	0.4	14.5

Варіант власного завдання можна знайти в таблиці 46 .

46. Варіанти ситуаційних задач для самостійного рішення студентами факультетів ветеринарної медицини та технології і переробки продукції тваринництва

№	Вид тварин	Продукція	Тип ґрунту*	Щільність забруднення, КБк/м ²		Питома активність ґрунту, Бк/кг		Період утримання
				^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ВРХ	молоко, м'ясо	1	185	-	-	-	Пасовищний
2	ВРХ	молоко, м'ясо	1	-	7,4	-	-	Літній стійловий
3	ВРХ	молоко, м'ясо	2	259	-	-	-	Пасовищний
4	ВРХ	молоко, м'ясо	1	-	-	760	-	Зимовий стійловий
5	Свині	м'ясо	1	185	-	-	-	Зимовий
6	Вівці	м'ясо	1	-	-	800	-	Зимовий стійловий
7	ВРХ	молоко, м'ясо	2	-	-	900	-	Зимовий стійловий
8	Кури	м'ясо, яйця	1	370	-	-	-	Літній
9	ВРХ	молоко, м'ясо	1	-	-	390	-	Пасовищний
10	Кури	м'ясо	1	111	-	-	-	Літній
11	Свині	м'ясо	3	200	-	-	-	Зимовий
12	Вівці	м'ясо	1	-	-	900	-	Літній
13	Свині	м'ясо	1	-	-	450	-	Літній
14	Вівці	м'ясо	1	-	-	600	-	Зимовий
15	Свині	м'ясо	2	-	-	590	-	Зимовий

16	Вівці	м'ясо	3	-	-	500	-	Літній
17	ВРХ	молоко	1	-	-	250	-	Пасовищ- ний
18	ВРХ	молоко, м'ясо	1	-	-	150	-	Зимовий стійловий
19	ВРХ	молоко, м'ясо	3	-	-	200	-	Зимовий стійловий
20	ВРХ	молоко, м'ясо	2	-	-	180	-	Зимовий стійловий
21	Кози	молоко	3	-	-	200	-	Літній
22	ВРХ	молоко, м'ясо	1	-	-	1300	-	Зимовий стійловий
23	ВРХ	молоко, м'ясо	1	-	-	450	-	Пасовищ- ний
24	ВРХ	молоко, м'ясо	1	-	-	-	400	Пасовищ- ний
25	ВРХ	молоко, м'ясо	1	-	-	750	-	Зимовий стійловий
26	Кози	молоко	1	-	-	950	-	Літній
27	Вівці	м'ясо	3	-	-	370	-	Зимовий
28	Свині	м'ясо	2	-	-	1000	-	Зимовий
29	Коні	м'ясо	1	-	111	-	-	Літній
30	Коні	м'ясо	3	-	-	420	-	Зимовий
31	ВРХ	молоко, м'ясо	1	-	-	-	350	Зимовий стійловий
32	Вівці	м'ясо	1	-	90	-	-	Літній
33	Кури	м'ясо, яйця	2	-	-	-	200	Літній
34	Кози	молоко	3	-	37	-	-	Зимовий
35	Свині	м'ясо	2	230	-	-	-	Літній

* 1- дерново-підзолистий; 2 – сірий лісовий; 3 – торф'яно-болотний

Порядок рішення задач

Задача: Визначити вміст ^{137}Cs в молоці та м'ясі ВРХ (питома активність дерново-підзолистого ґрунту 600 Бк/кг, період утримання – літній пасовищний, сектор – громадський). Зробити висновки та дати рекомендації.

1. Визначаємо щільність забруднення території (Н) радіонуклідами в одиницях системи СІ (кБк/м²). Для цього необхідно вміст ^{137}Cs або ^{90}Sr (Бк/кг ґрунту) помножити на масу 1 м² орного шару, яка залежить від питомої маси ґрунту та глибини оранки. Для розрахунку використовують опосередковані показники маси орного шару ґрунтів: дерново-підзолистих – 270 кг; сірих лісових – 260 кг; чорноземних – 300 кг; торф'яно-болотних – 190 кг. Глибину оранки в середньому приймають за 20 см.

$$H = 600 \text{ Бк/кг} \cdot 270 \text{ кг/м}^2 = 162000 \text{ Бк/м}^2 = 162 \text{ кБк/м}^2$$

1.1. Визначаємо забрудненість території в одиницях Кі/км², це потрібно для використання даних, які наведені в таблиці 43. Ділимо 162 кБк/м² на 37 (1 Кі/км² = 37 кБк/м²).

$$162 \text{ кБк/м}^2 : 37 = 4,4 \text{ Кі/км}^2.$$

Отримуємо 4,4 кБк/м².

Примітка: Якщо в умовах задачі щільність забруднення визначена в одиницях Кі/км², необхідно зробити перерахунок в одиниці системи СІ – кБк/м², тобто помножити щільність забруднення в Кі/км² на 37.

1. Складаємо раціон для літнього періоду утримання тварин, який є типовим для даної ґрунтово-кліматичної зони. Орієнтовне добове споживання сухих кормів домашніми тваринами наведено в таблиці 47.

2. Визначаємо вміст радіонуклідів в кожному окремому виді корму, для цього дані, які наведені в таблиці 42 множимо на визначену щільність забруднення території радіонуклідами в одиницях кБк/м^2 , а дані з таблиці 43 множимо на щільність забруднення території в одиницях Ки/км^2 .

Результати розрахунків оформляємо у вигляді таблиці 48:

3. Визначаємо очікувану концентрацію радіонуклідів в кінцевому продукті, використовуючи таблицю 41 та формулу 23.

4. Порівнюємо отримані нами дані з допустимими рівнями вмісту ^{137}Cs в молоці та м'ясі (табл. 5). Робимо висновки та даємо конкретні рекомендації щодо зменшення вмісту радіонуклідів в кінцевому продукті. Ефективність кожного заходу викладена в підручниках.

47. Добове споживання сухих кормів та води домашніми тваринами

Вид тварин	Споживання сухих кормів (кг/добу)		Споживання води (л/добу)
	Середнє	Діапазон	
Молочні корови	16.1	10-25	50-100
М'ясна худоба (500 кг)	7.2	5-10	20-60
Телята (160 кг)	1.9	1.5-3.5	5-15
Молочні кози	1.3	1.0-3.5	5-10
Молочні вівці	1.3	1.0-2.5	5-8
М'ясні вівці (50 кг)	1.1	0.5-3.0	6-10
Свині (110 кг)	2.4	2.0-3.0	6-10
Кури несучки	0.1	0.07-0.15	0.1-0.3
Бройлери	0.07	0.05-0.15	0.1-0.3

48. Прогноз вмісту ^{137}Cs в раціонах, молоці та м'ясі великої рогатої худоби (громадський сектор, випас), при щільності забруднення ґрунту 162 кБк/м^2 ($4,4 \text{ Ки/км}^2$)

Корм	Маса, кг	Концентрація ^{137}Cs в 1 кг корму, Бк/кг	Вміст у раціоні ^{137}Cs	Очікувані концентрації ^{137}Cs	
			Бк/раціон	Молоко, Бк/л	М'ясо, Бк/кг
Трави з окультурених пасовищ	50	$0,7 \times 162 = 113$	$113 \times 50 = 5650$	56,5	226
Концентрати (дерть ячмінна)	5	$4,1 \times 4,4 = 18$	$18 \times 5 = 90$	0,9	3,6
Всього			5740	57,4	229,6

Висновок: вміст ^{137}Cs в молоці корів відповідає вимогам ДР-97. Вміст ^{137}Cs в м'ясі перевищує допустимі рівні у 1,15 рази. Для зменшення переходу радіонукліду в молоко та м'ясо необхідно ввести в раціон ентеросорбенти (цеолітове борошно марки А або хумоліт), які знижують концентрацію ^{137}Cs в молоці та м'ясі в 2,5-3,5 рази. Після введення в раціон ентеросорбентів таке молоко може використовуватись також для виготовлення спеціалізованих продуктів дитячого харчування.

3.3. Прогнозування можливого радіонуклідного забруднення продукції лісового господарства

Задача: (приклад) Визначити вміст ^{137}Cs та ^{90}Sr в свіжих маслоках та придатність їх до вживання. Гриби заготовлені на території Лісостепової зони Київської області. Щільність забруднення ґрунту ^{137}Cs становить 37 кБк/м^2 , ^{90}Sr – 30 кБк/м^2 .

Варіант власного завдання визначається за таблицею 49.

Рішення:

$$\text{ПА} = \text{ЩЗ} \cdot \text{К}_{\text{П}},$$

де

ПА – питома активність сировини, Бк/кг;

ЩЗ – щільність забруднення ґрунту ^{137}Cs ; ^{90}Sr , кБк/м²;

К_П – коефіцієнт переходу.

1. Визначаємо вміст ^{137}Cs в маслоках:

$$\text{ЩЗ} = 37 \text{ кБк/м}^2;$$

$$\text{К}_{\text{П}} = 4,1 \text{ (табл. 56);}$$

$$\text{ПА} = 37 \cdot 4,1 = 151,7 \text{ Бк/кг}$$

Допустимий рівень забруднення свіжих дикоростучих грибів за ^{137}Cs становить 500 Бк/кг (табл. 5).

2. Визначаємо вміст ^{90}Sr в маслоках:

$$\text{ЩЗ} = 30 \text{ кБк/м}^2;$$

$$\text{К}_{\text{П}} = 13,7 \text{ (табл. 56);}$$

$$\text{ПА} = 30 \cdot 13,7 = 411 \text{ Бк/кг}$$

Допустимий рівень забруднення свіжих дикоростучих грибів за ^{90}Sr становить 50 Бк/кг (табл. 5).

Висновок: Забруднення маслюків за ^{137}Cs становить 151,7 Бк/кг, що нижче за допустимі рівні у 3,29 рази ($500 : 151,7 = 3,29$), а за ^{90}Sr становить 411 Бк/кг, що перевищує допустимі рівні у 8,22 рази ($411 : 50 = 8,22$). Ці гриби вживати в їжу не можна.

49. Варіанти ситуаційних задач для самостійного рішення студентами факультетів лісогосподарського та садово-паркового господарства і ландшафтної архітектури

№ п/п	Назва продукції та місцезростання	Щільність забруднення ґрунту, кБк/м ²		ТУМ*
		^{137}Cs	^{90}Sr	
1	Свіжі білі гриби, Київське Полісся	52	20	
2	Свіжі маслюки, Лісостеп Київської області	150	5	
3	Свіжі польські гриби, Київське Полісся	37	26	
4	Свіжі опеньки, Лісостеп Київської області	37	16	
5	Свіжі польські гриби, Лісостеп Київської області	37	26	
6	Свіжі лисички, Київське Полісся	40	19,5	
7	Ягоди суниці, Київське Полісся	370	0,8	
8	Ягоди суниці, Лісостеп Черкаської області	300	0,9	
9	Ягоди чорниці, Київське Полісся	74	7,4	
10	Ягоди брусниці, Київське Полісся	70	3,7	
11	Ягоди ожини, Київське Полісся	370	37	

12	Ягоди малини, Київське Полісся	740	7,4	
13	Плоди бузини, Лісостеп Черкаської області	185	7,4	
14	Листя чорниці	175		B ₄
15	Спори плавуна булавовидного	74		A ₂
16	Трава чистотілу звичайного	370		A ₃
17	Трава фіалки триколірної	37		B ₃
18	Трава звіробою звичайного	37		C ₂
19	Суцвіття конвалії звичайної	185		C ₂
20	Кора крушини ламкої	37		B ₃
21	Суцвіття цмину піщаного	74		A ₂
22	Трава деревію звичайного	740		B ₃
23	Кора дуба черешчатого	185		B ₃
24	Деревина сосни звичайної, Київське Полісся	185		C ₃
25	Деревина сосни звичайної, Чернігівське Полісся	250		B ₃
26	Деревина дуба черешчатого, Київське Полісся	370		C ₃
27	Деревина сосни звичайної, Київське Полісся	185		B ₂
28	Пиломатеріали сосни звичайної, Київське Полісся (70 % ¹³⁷ Cs знаходиться в корі)	370		C ₃
29	Пиломатеріали дуба черешчатого, Київське Полісся (75 % ¹³⁷ Cs знаходиться в корі)	555		C ₃
30	Трава чебрецю звичайного	370		A ₁

* - тип умов місцезрастання – лісівничий термін, який включає в себе тип ґрунту, його фізичні та агрохімічні характеристики, основну лісоутворюючу породу, гідрологічний режим ґрунту та ін.

50. Переведення величини щільності забруднення ґрунту з Кі/км² в кБк/м²

Кі/км ²	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
0	0	3.7	7.4	11.1	14.8	18.5	22.2	25.9	29.6	33.3
1	37	40.7	44.4	48.1	51.8	55.5	59.2	62.9	66.6	70.3
2	74	77.7	81.4	85.1	88.8	92.5	96.2	99.9	103.6	107.3
3	111	114.7	118.4	122.1	125.8	129.5	133.2	136.9	140.6	144.3
4	148	151.7	155.4	159.1	162.8	166.5	170.2	173.9	177.6	181.3
5	185	188.7	192.4	196.1	199.8	203.5	207.2	210.9	214.6	218.3
6	222	225.7	229.4	233.1	236.8	240.5	244.2	247.9	251.6	255.3
7	259	262.7	266.4	270.1	273.8	277.5	281.2	284.9	288.6	292.3
8	296	299.7	303.4	307.1	310.8	314.5	318.2	321.9	325.6	329.3
9	333	336.7	340.4	344.1	347.8	351.5	355.2	358.9	362.9	366.3

51. Нормативи на вміст ^{137}Cs в продукції лісового господарства

№ п/п	Продукція лісового господарства	Допустима концентрація ^{137}Cs	
		Ки/кг	Бк/кг
1	Продукція промислового призначення:		
	а) лісоматеріали круглі нескорені (ліс будівельний, стовпи, пиловник для виробництва пиломатеріалів);	5×10^{-7}	18500
	б) лісоматеріали круглі окорені (стовпи, пиловник для виробництва пиломатеріалів, кряжі для виробництва промислової тари, лижний кряж, суднобудівний ліс);	1×10^{-7}	3700
	в) пиломатеріали обрізні (дошка, щепи технологічна, обозні заготовки, столярні вироби, паркет, фанера, ДСП);	5×10^{-8}	1850
	г) ліс круглий будівельний, брус будівельний	2×10^{-8}	740
2	Продукція культурно-побутового і господарського призначення:		
	а) паливна деревина;	2×10^{-8}	740
	б) штахети, дранка штукатурна, держак, топорища, мітли, лопати, граблі дерев'яні, наличники, прищипки для білизни, резонансний кряж для виробництва музичних інструментів	1×10^{-7}	3700
3	Продукція, що використовується для затарювання і зберігання харчових продуктів і для використання в домашньому вжитку: (клепковий кряж для виробництва винної і розливної клепки, товарний кряж для виробництва плодоовочевої тари, бондарні вироби, сувеніри, клепка заливна, клепка винна, корзини, хлібниці, дошка розробна, ложки дерев'яні)	5×10^{-8}	1850
4	Продукція, що використовується в кормовиробництві, лакофарбувальній і фармацевтичній промисловості: (живиця, пеньковий осмол, дьоготь, скипидар, хвойно-вітамінне борошно)	1×10^{-7}	3700
5	Насіння деревних і чагарникових порід	2×10^{-7}	7400

52. Середні значення коефіцієнтів переходу ^{137}Cs і ^{90}Sr з ґрунту в деревину, (Бк/кг)/(кБк/м²) Київське Полісся

№ п/п	Порода	ТУМ	^{137}Cs	^{90}Sr
1	Сосна звичайна	B ₂	1.3	5.2
	Сосна звичайна	C ₃	2.6	2.1
2	Береза повисла	B ₂	0.6	6.4
	Береза повисла	C ₃	1.8	6.3
3	Дуб черешчатий	C ₂	2.4	1.2
	Дуб черешчатий	C ₃	2.1	1.7
4	Осика	C ₃	2.4	5.5

5	Вільха чорна	C ₃	2.3	2.4
6	Ялина звичайна	C ₃	1.2	16.1

53. Середні значення коефіцієнтів переходу (K_{Π}) ^{137}Cs з ґрунту в деревину, (Бк/кг)/(кБк/м²) Чернігівське Полісся

№ п/п	Порода	ТУМ	K_{Π}
1	Сосна звичайна	A ₂	6.0
	Сосна звичайна	B ₂	1.9
	Сосна звичайна	B ₃	1.5
2	Береза повисла	B ₃	0.2
3	Дуб черешчатий	B ₃	0.3
4	Осика	B ₃	0.9
5	Вільха чорна	B ₃	0.7

54. Середні значення коефіцієнтів переходу (K_{Π}) ^{137}Cs із ґрунту в лікарські рослини Українського Полісся

№ п/п	Вид	ТУМ	K_{Π}
1	Чорниці, листя	B ₄	150.0
2	Чистотіл звичайний	A ₃	77.0
3	Звіробій звичайний	C ₂	10.6
4	Конвалія звичайна	C ₂₋₃	10.0
5	Плавун булавовидний	A ₂	160.0
6	Деревій звичайний	B ₂₋₃	39.8
7	Фіалка триколірна	B ₃	28.0
8	Бузина чорна, плоди	B ₃	23.0
9	Цмин піщаний	A ₂	3.3

55. Коефіцієнти переходу (K_{Π}) радіонуклідів та гранично допустимі значення щільності (ГДЩ) забруднення ґрунту для заготівлі продукції лісового господарства у Київському Поліссі

Продукція	ГДЩ ^{137}Cs		K_{Π} Бк/кг кБк/м ²	ГДЩ ^{90}Sr		K_{Π} Бк/кг кБк/м ²
	Кі/км ²	кБк/м ²		Кі/км ²	кБк/м ²	
Білі гриби	1.4	52.5	14.1	0.5	18.0	4.1
Маслюки	0.6	23.8	31.1	0.4	16.8	4.4
Грузді	0.8	31.1	23.8	0.8	29.6	2.5
Сироїжки	0.6	23.5	35.1	0.5	18.0	4.1
Польські гриби	0.3	11.3	65.0	0.7	26.4	2.8
Рядовки	0.5	18.2	40.6	0.3	13.0	5.7
Свинушки	0.2	8.9	83.6	0.9	33.6	2.2
Лисички	1.1	40.7	18.2	0.5	19.5	3.8

Підберезовики, підосиковики	1.2	45.7	16.2	0.6	23.6	3.1
Макролепіота	7.4	274.0	2.7	-	-	-
Суниці	26.7	987.0	0.7	0.0	0.5	144.0
Горобина	8.3	308.0	2.4	-	-	-
Брусниця	2.0	72.5	10.2	0.1	3.6	20.7
Калина	8.0	296.0	2.5	-	-	-
Ірга	5.7	211.0	3.5	0.0	1.6	46.5
Костяниці	6.7	247.0	3.0	0.7	26.4	2.8
Малина	22.2	822.0	0.9	0.2	8.7	8.5
Ожина	14.3	529.0	1.4	0.7	24.7	3.0
Чорниці	2.7	99.7	7.4	0.2	8.1	9.1
Буяхи	5.9	218.0	3.4	0.9	33.2	2.1

56. Коефіцієнти переходу (K_P) радіонуклідів та гранично допустимі значення щільності (ГДЩ) забруднення ґрунту для заготівлі продукції лісового господарства у Лісостепу Київської та Черкаської областей

Продукція	ГДЩ ^{137}Cs		K_P $\frac{\text{Бк/кг}}{\text{кБк/м}^2}$	ГДЩ ^{90}Sr		K_P $\frac{\text{Бк/кг}}{\text{кБк/м}^2}$
	Ки/км ²	кБк/м ²		Ки/км ²	кБк/м ²	
Білі гриби	б/о	4353	0.2	0.8	29.6	2.5
Маслюки	4.90	180	4.1	0.1	5.4	13.7
Грузді	б/о	1213	0.6	0.4	14.5	5.1
Сироїжки	б/о	1720	0.4	0.2	5.8	12.7
Польські, моховики	3.90	145	5.1	0.2	7.3	10.1
Рядовки	2.00	73	10.1	0.2	7.6	9.7
Свинушки	4.80	176	4.2	0.4	13.7	5.4
Опеньки	б/о	1194	0.6	0.4	15.4	4.8
Дошовики	б/о	10137	0.0	0.6	23.1	3.2
Макролепіота	б/о	3217	0.2	0.3	10.7	6.9
Решетняки	б/о	3217	0.2	-	-	-
Рижики	5.60	205	3.6	-	-	-
Печериця	б/о	11212	0.1	0.2	6.2	11.9
Суниці	б/о	4625	0.2	0.0	0.9	77.4
Бузина	б/о	6167	0.1	0.2	9.4	7.9
Глід	б/о	10571	0.1	0.9	33.6	2.2
Ожина	б/о	3700	0.2	-	-	-
Шипшина	б/о	3700	0.2	0.1	5.3	14.0

57. Коефіцієнти переходу (K_{Π}) ^{137}Cs з ґрунту у свіжі лісові ягоди в різних типах умов місцезростання

№ п/п	Вид ягідних рослин	ТУМ	K_{Π}
1.	Чорниці	B_3	11.0
		C_2	2.0
		C_3	2.4
2.	Брусниці	A_2	12.1
		B_3	8.3
3.	Буяхи	B_3	9.4
4.	Малина звичайна	B_3-C_3	6.6
5.	Суниці лісові	B_{2-3}	5.8
6.	Горобина звичайна	B_{3-4}	1.0
7.	Калина звичайна	B_{3-4}	0.3

3.4. Розрахунок і оцінка еквівалентної дози опромінення внаслідок надходження радіонуклідів в організм

Для розрахунку і оцінки еквівалентної дози опромінення використовують прийняті Міжнародною комісією радіаційного захисту (МКРЗ) таблиці дозових цін різних радіонуклідів – поглинених доз внаслідок надходження певного радіонукліда активністю 1 Бк в організм (таблиця 58).

58. Дозові ціни різних радіонуклідів залежно від шляхів надходження їх в організм (за 60-тою публікацією МКРЗ)

Радіонуклід	Дозова ціна, мЗв/Бк		Радіонуклід	Дозова ціна, мЗв/Бк	
	перорально	інгаляційно		перорально	інгаляційно
^{90}Sr	$4 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-4}$	^{144}Ce	$1 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-5}$
^{95}Zr	$1 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$	^{238}Pu	$5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-2}$
^{131}I	$2 \cdot 10^{-5}$	$2.5 \cdot 10^{-5}$	^{239}Pu	$7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-2}$
^{134}Cs	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	^{240}Pu	$5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-2}$
^{136}Cs	$3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	^{241}Pu	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$
^{137}Cs	$2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	^{242}Pu	$5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-2}$
^{141}Ce	$1 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$			

Один із шляхів розрахунку еквівалентної дози ґрунтується на середніх оцінках активності радіонуклідів у продуктах харчування і воді, за якими, з огляду на раціон, оцінюють річне надходження їх в організм людини. Обчислюють дозу опромінення за формулою:

$$D_{\text{екв}} = R_i \cdot \Sigma A_{ij} \cdot C_i$$

де: $D_{\text{екв}}$ – індивідуальна річна еквівалентна доза від і-того радіонукліда, мЗв/рік;

R_i – дозова ціна певного (і-того) радіонукліда в разі перорального надходження, Зв/Бк;

A_{ij} – активність і-того радіонукліда в j-тому продукті харчування, Бк/кг;

C_j – річний об'єм вживання j -того продукту, кг/рік.

Інший шлях розрахунку використовують для прогнозованої оцінки дозового навантаження на людину, якщо немає регулярних даних про активність радіонуклідів у продуктах харчування і воді.

В цьому випадку розраховують активність радіонуклідів у продуктах харчування, виходячи з даних про: щільність забруднення сільськогосподарських угідь, коефіцієнтів переходу радіонуклідів з ґрунту в рослини і активність отриманої продукції. Далі використовують попередню формулу.

Після розрахунку внеску кожного виду продукту в надходження ^{137}Cs в організм і формування еквівалентної дози внутрішнього опромінення людини, проводять розрахунок сумарної еквівалентної дози опромінення внаслідок вживання продукції забрудненої радіонуклідами за формулою:

$$\Sigma D_{\text{екв}} = d_{1i} + d_{2i} + d_{3i} + \dots + d_{ni}$$

де: $\Sigma D_{\text{екв}}$ – сумарна індивідуальна річна еквівалентна доза від надходження радіонукліду з продуктами харчування, мЗв/рік

$d_{1i} - d_{ni}$ – річні ефективні еквівалентні дози, сформовані надходженням радіонукліду з i -тим (окремим) продуктом харчування, мЗв/рік.

5. ОРІЄНТОВНІ КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ З ПІДГОТОВКИ ДО ВИРІШЕННЯ ТЕСТОВИХ ЗАВДАНЬ

Гігієнічні регламенти та основні санітарні правила

1. До яких контрзаходів відноситься обмеження сільськогосподарської діяльності тимчасове відселення населення, обмежене вживання радіоактивно забрудненої води і продуктів харчування?
2. Яка організація регламентує правила роботи з радіоактивними речовинами на національному рівні?
3. Яка організація регламентує правила роботи з радіоактивними речовинами на міжнародному рівні?
4. Для осіб якої категорії встановлені допустимі рівні скиду та викиду радіонуклідів у довкілля, допустимі концентрації радіонуклідів у питній воді?
5. Для осіб якої категорії встановлені допустимі щільності потоку частинок, допустимі потужності дози зовнішнього опромінення?
6. До якого типу радіобіологічних ефектів відноситься радіаційна стимуляція?
7. До якого типу радіобіологічних ефектів відносяться морфологічні зміни клітин?
8. До якого типу радіобіологічних ефектів відноситься утворення в організмі злоякісних пухлин?
9. До якого типу радіобіологічних ефектів відноситься променева хвороба?
10. Вкажіть нормативний документ за основу якого взято наступні принципи: принцип оптимізації, принцип неперевищення, принцип виправданості?
11. На основі яких принципів побудовані НРБУ?
12. В якому році введені в дію НРБУ?
13. До якої групи радіаційно-гігієнічних регламентів входять рекомендовані рівні?
14. До якої групи радіаційно-гігієнічних регламентів входять ліміти доз?
15. До якої категорії осіб, що зазнають опромінення, відноситься все населення України?
16. До якої категорії осіб, що зазнають опромінення, відносяться особи, які безпосередньо працюють з джерелами іонізуючих випромінювань?
17. До якої групи відносяться регламенти, які мають на меті обмеження опромінення людини від медичних джерел?
18. До якої групи відносяться регламенти щодо відвернутої внаслідок втручання дози опромінення населення від техногенно-підсилених джерел природного походження?
19. До якої групи відносяться регламенти щодо відвернутої внаслідок втручання дози опромінення населення в умовах радіаційної аварії?
20. До якої групи регламентів входять: контрольні рівні, ліміти доз, допустимі рівні?
21. До яких контрзаходів відносяться укриття та евакуація?
22. Які контрзаходи відносяться до термінових?
23. Який ліміт дози опромінення за рік (мЗв) встановлено для персоналу, що працює з рентгеновськими апаратами?
24. Який період піврозпаду ^{137}Cs ?
25. До якої групи відносять за радіотоксичністю ^{90}Sr ?
26. Який період піврозпаду ^{90}Sr ?
27. Який ліміт річної ефективної дози опромінення осіб категорії Б за рік (мЗв)?
28. З якого віку особи допускаються до роботи з джерелами іонізуючих випромінювань?
29. До якої величини підвищується дозовий ліміт для осіб категорії А у випадку небезпечної ситуації (мЗв за рік)?
30. Скільки груп регламентів включають НРБУ?
31. Які допустимі рівні загального радіоактивного забруднення шкіри β -частинками ^{90}Sr (част./хв./см²)?
32. Який допустимий рівень ^{222}Rn у питній воді (Бк/л)?

33. Яка максимально допустима потужність дози γ -випромінення у лікувальних закладах (мкР/год)?
34. Які джерела іонізуючих випромінень називають закритими?
35. До якої групи відносять за радіотоксичністю ^{137}Cs ?
36. До якої групи відносять за радіотоксичністю ^{239}Pu ?
37. Що включають в себе принципи захисту від внутрішнього опромінення?
38. Який пробіг у повітрі α -частинки (см)?
39. Що таке шар половинного послаблення іонізуючого випромінення?
40. Який шар половинного послаблення γ -випромінення енергією 1 MeV для свинцю (см)?
41. Де розміщують приміщення для робіт першого класу?
42. В якій зоні розміщують джерела іонізуючих випромінень в лабораторіях першого класу робіт?
43. За якої умови допускається скидання радіоактивних стічних вод у комунально-побутову каналізацію?
44. Яка величина гранично допустимої дози за день для осіб категорії А (мР)?
45. Чи потрібен санпропускник у радіологічній лабораторії другого класу?
46. Яка величина шару половинного послаблення γ -випромінення енергією 1 MeV для бетону (см)?
47. Як часто необхідно проводити вологе прибирання в приміщеннях радіологічної лабораторії, призначених для робіт із відкритими джерелами іонізуючих випромінень?
48. За яким параметром визначають границі зони комунальної аварії?
49. Яка періодичність проведення індивідуального дозиметричного контролю опромінення персоналу?
50. Яка кратність повітряного обміну протягом 1-ї години повинна забезпечуватись в лабораторії третього класу?
51. Які допустимі рівні забруднення шкіри α -частинками?
52. До якої групи за радіотоксичністю відноситься ^{131}I ?
53. Яка нижня межа обмеження використання в їжу молока, забрудненого ^{137}Cs (Бк/л)?
54. Яка максимально допустима потужність дози γ -випромінення в житлових приміщеннях, що проектується, (мкР/год)?
55. До якого класу відносяться радіаційні аварії, наслідки яких не поширюються за межу промайданчика об'єкта?
56. До якого класу відносяться глобальні і регіональні аварії?
57. Які найбільш близькі значення тривалості гострої фази комунальних аварій?
58. Які найбільш близькі значення початку розвитку фази відновлення комунальних аварій?
59. Яка нижня межа виправданості проведення йодної профілактики для дітей при дозовому навантаженні на щитовидну залозу за перші 2 тижні після аварії (мГр)?
60. Яка нижня межа виправданості проведення евакуації при дозовому навантаженні на шкіру за перші 2 тижні після аварії (мГр)?
61. Для яких цілей використовують будівельні матеріали і мінеральну сировину з питомою активністю ^{226}Ra на рівні 370-740 Бк/кг?
62. Яка питома активність ^{238}U та ^{232}Th в мінеральних добривах (Бк/кг)?
63. Яка максимально допустима потужність дози γ -випромінення в будівлях і приміщеннях, які експлуатуються з постійним перебуванням в них людей (мкР/год)?
64. Яка максимальна питома активність ^{226}Ra допускається у воді джерел господарсько-питного водопостачання (Бк/л)?
65. Яка мінімально значима активність радіонуклідів на робочому місці, що відносяться за радіотоксичністю до групи В (кБк)?
66. Який шар половинного послаблення γ -випромінення енергією 1 MeV для деревини (см)?

67. Скільки потрібно шарів половинного послаблення будь-якого матеріалу, щоб досягти кратності зниження дози в 16 разів?
68. Який з перелічених дезактивуючих засобів відноситься до адсорбентів?
69. Який з перелічених дезактивуючих засобів відноситься до комплексоутворювачів?
70. Скільки класів робіт з радіоактивними речовинами регламентуються ОСП?
71. Для захисту від чого використовують пластмасові екрани, гумові рукавиці, алюмінієві екрани?
72. Що відносяться до твердих радіоактивних відходів за походженням?
73. Що належить до комплексоутворюючих миючих засобів?
74. За яких значень прогнозованих доз при гострому опроміненні населення за період менше 2 діб проводять термінові контрзаходи?
75. Яку назву мають реакції організму на гостре та хронічне опромінення?
76. Який допустимий рівень надходження ^{137}Cs через органи дихання за рік для всього населення України, згідно НРБУ (Бк/рік)?
77. Яке допустиме надходження ^{131}I через органи травлення для осіб категорії В (Бк/рік)?
78. Яка максимальна річна ефективна доза під час проведення профілактичного обстеження населення (флюорографії) (мЗв)?
79. Який матеріал є найефективнішим для захисту від γ -випромінення?
80. Який ліміт річної ефективної дози для всього населення (мЗв/рік)?
81. До якої категорії осіб прирівнюються особи, що залучаються до проведення аварійних та рятувальних робіт?
82. Яка гранична сумарна доза опромінення персоналу за 10 років роботи (мЗв)?
83. При якому періоді піврозпаду дозволяється не захоронювати радіоактивні відходи?
84. Який допустимий рівень радіоактивного забруднення зовнішньої поверхні спецвзуття ^{239}Pu (част./хв./см²)?
85. Чим забезпечується найефективніша дезактивація при забрудненні шкіри ^{90}Sr ?
86. Чим забезпечується найефективніша дезактивація при забрудненні ^{226}Ra ?
87. Який термін проведення контролю рівня забруднення шкіряного покриву працюючих?
88. Від чого залежить клас робіт з радіоактивними речовинами?
89. Які джерела іонізуючих випромінювань належать до відкритих?
90. Як регламентується перебування персоналу в приміщеннях 1-зони радіологічної лабораторії при працюючому обладнанні?
91. Який обов'язковий засіб попередження внутрішнього опромінення організму при роботі з відкритими джерелами іонізуючих випромінювань?
92. Який ліміт еквівалентної дози зовнішнього опромінення кришталика ока для осіб категорії В?
93. Що не рекомендується використовувати як дезактивуючий засіб при забрудненні шкіри ^{33}P ?
94. Який період піврозпаду ^{131}I (діб)?
95. Який ліміт еквівалентної дози зовнішнього опромінення шкіри для осіб категорії В (мЗв/рік)?
96. Який допустимий рівень надходження ^{241}Am через органи травлення (Бк/кг)?
97. Який допустимий рівень радіоактивного забруднення основного спецодягу β -активними радіонуклідами (част./хв./см²)?
98. Який ліміт еквівалентної дози зовнішнього опромінення кистей і стоп для осіб категорії Б (мЗв/рік)?
99. Яка максимальна питома активність для будівельних матеріалів, що мають естетичну цінність (Бк/кг)?
100. Яка максимальна питома активність матеріалів, що використовуються при підземному будівництві (Бк/кг)?

Дозиметрія іонізуючих випромінень

1. Який період піввиведення ^{137}Cs з організму людини?
2. Який період піврозпаду ^{238}U ?
3. Який шлях надходження радіонуклідів в організм на сьогоднішній день є основним?
4. Які радіонукліди відносяться до штучних?
5. За рахунок чого в основному зменшується концентрація радіоактивного йоду в організмі?
6. Який критичний орган по відношенню до ^{131}I ?
7. Який радіонуклід становить найбільшу небезпеку внутрішнього опромінення населення та тварин у перші 90 діб після ядерного вибуху або радіаційної аварії?
8. Який тип розподілу характерний для ^{131}I ?
9. Який тип випромінення властивий ^{137}Cs ?
10. Які допустимі рівні ^{137}Cs в молоці та молочних продуктах, згідно ДР-2006?
11. Який тип випромінення властивий ^{90}Sr ?
12. Представники якої родини серед вищих рослин мають максимальну радіостійкість?
13. Який період напіввиведення ^{90}Sr з організму людини?
14. Яким сільськогосподарським рослинам властива найбільша радіочутливість?
15. Якою є радіочутливість молодих тварин по відношенню до дорослих?
16. Який клас рослин має найбільшу радіочутливість?
17. Який клас хребетних тварин має найбільшу радіостійкість?
18. Який коефіцієнт відносної біологічної ефективності для рентгенівського випромінення?
19. Яка одиниця вимірювання еквівалентної дози прийнята в системі СІ?
20. В якому році було відкрите явище природної радіоактивності?
21. При якій щільності забруднення ґрунту ізотопами ^{137}Cs територія відноситься до зони безумовного (обов'язкового) відселення?
22. Яка з кормових культур має найменші коефіцієнти переходу ^{137}Cs ?
23. Який рік вважається роком виникнення радіобіології?
24. На якому етапі розвитку радіобіології був відкритий кисневий ефект?
25. В чому суть радіобіологічного парадоксу?
26. В чому суть кисневого ефекту?
27. На якому етапі розвитку радіобіології був відкритий мутагенний ефект дії іонізуючої радіації?
28. Що таке ізотопи?
29. Яка одиниця виміру радіоактивності прийнята в системі СІ?
30. Яка одиниця виміру експозиційної дози прийнята в системі СІ?
31. Що таке Рентген?
32. Що розуміють під поняттям доза опромінення?
33. В чому виражається потужність поглинутої дози в системі СІ?
34. Хто синтезував цистеамін і показав його протирадіаційну ефективність?
35. Який період піврозпаду ^{40}K ?
36. При якому вмісті кисню в атмосфері досягається максимум кисневого ефекту?
37. Як називаються речовини, введення яких в організм перед опроміненням або під час опромінення, призводить до зниження ступеню прояву радіобіологічних ефектів?
38. Який тип післярадіаційного відновлення не властивий ссавцям?
39. Яку назву має метод визначення радіоактивності, що базується на порівнянні швидкостей підрахунку випромінюваних частинок від еталона та досліджуваної проби?
40. За допомогою якого методу реєстрації іонізуючих випромінень Беккерель відкрив явище радіоактивності?
41. Як називаються прилади, що вимірюють кількість енергії, поглинутої одиницею маси об'єкта чи речовини?

42. До якої групи приладів за призначенням відноситься РУБ-01-П6?
43. Робота яких дозиметрів заснована на фотографічному методі реєстрації іонізуючих випромінень?
44. На якому етапі розвитку радіобіології було відкрито явище радіаційної стимуляції?
45. Які радіонукліди називають інкорпорованими?
46. Як називаються речовини, вплив яких на організм подібний до дії іонізуючого випромінення?
47. Які є радіонукліди природного походження?
48. На якому етапі розвитку радіобіології виникла радіоекологія?
49. Який метод реєстрації іонізуючих випромінень заснований на вимірюванні кількості молекул чи іонів, які утворюються при поглинанні енергії речовиною?
50. Яка одиниця виміру енергії іонізуючих випромінень прийнята в системі СІ?
51. За рахунок чого в основному здійснюється іонізація атомів середовища при взаємодії γ -випромінення з речовиною?
52. Від чого залежить період напіврозпаду радіонукліду?
53. Від чого залежить швидкість розпаду атомів радіонукліду?
54. Як називається величина, що характеризує втрати енергії зарядженою частинкою чи фотоном електромагнітного випромінення на одиницю довжини пробігу в речовині?
55. Як називається доза, при якій енергія фотонного випромінення витрачається на утворення одиниці об'єму повітря іонів, що несуть електричний заряд певної величини?
56. Що таке питома активність радіонукліду?
57. Як називається кількість радіоактивної речовини, в якій за 1 с розпадається $3,7 \cdot 10^{10}$ атомів?
58. Який з перелічених фізіолого-біохімічних процесів є найбільш радіочутливим?
59. За допомогою яких приладів здійснюється загальний контроль за зовнішнім γ -випроміненням?
60. Як називаються прилади, призначені для виміру активності чи концентрації радіонуклідів в об'єктах навколишнього середовища?
61. Як називається розділ прикладної радіобіології, що розробляє теорію і практику вимірювання радіоактивності і ідентифікацію радіоактивних ізотопів?
62. Який з перелічених методів є найбільш чутливим і точним при оцінці малих доз?
63. Як впливає на радіостійкість біологічних об'єктів вміст в них води при опроміненні?
64. В якій фазі клітини мають найвищу радіостійкість?
65. Як називають одиницю поглиненої дози в СІ?
66. Яка тканина у рослин є критичною?
67. Яку активність має 1 г ^{226}Ra ?
68. Які є методи радіометрії?
69. Який метод радіометрії заснований на порівнянні швидкості лічби препарату з відомою активністю (еталону) і вимірювальної проби?
70. Яку назву носить збільшення щільності іонізації в кінці пробігу α і β -частинок?
71. При якій дозі виникає променева хвороба ссавців І ступеня?
72. При взаємодії з речовиною якого виду іонізуючого випромінення можливе утворення електрон-позитронних пар?
73. Який коефіцієнт відносної біологічної ефективності для γ -випромінення?
74. Які типи детекторів використовують при визначенні сумарної β -активності проб?
75. За яким механізмом відбувається взаємодія електромагнітних випромінень з E до 100 кеВ?
76. При якій енергії γ -випромінення взаємодіє з речовиною за принципом комптон-ефекту?
77. Який вид іонізуючих випромінень має найбільшу щільність іонізації при взаємодії з речовиною?

78. Який коефіцієнт відносної біологічної ефективності для α -випромінення?
79. Як називається величина, яка характеризує кількість пар іонів, що виникають за одиницю пробігу шляху частинки або кванту іонізуючого випромінення?
80. Який коефіцієнт відносної біологічної ефективності для β -випромінення?
81. Яка мінімальна \bar{E} необхідна для одного акту іонізації в повітрі?
82. Яку мінімальну \bar{E} повинно мати електромагнітне випромінення, щоб викликати в біологічній тканині 300 актів іонізації?
83. На якому етапі розвитку радіобіології були винайдені перші радіопротектори?
84. До якої групи критичних органів відноситься червоний кістковий мозок?
85. Який орган є критичним по відношенню до ^{14}C ?
86. До якої групи критичних органів відносяться щитовидна залоза, печінка, серце?
87. На що перетворюється α -частинка після повної витрати енергії на іонізацію?
88. Який вид випромінення характерний лише для елементів з порядковим номером в періодичній системі Д.І.Менделєєва більшим за 82?
89. Яку назву має сума індивідуальних еквівалентних доз у певної групи людей?
90. Яка одиниця прийнята для вимірювання колективної дози?
91. Як залежить від швидкості руху ЛПЕ (ЛВЕ) заряджених часток?
92. Якою є величина віддачі енергії речовині в кінці пробігу будь-якої зарядженої частинки?
93. Які є ізотопи космогенного походження?
94. Для чого призначені рентгенометри?
95. На скільки груп за призначенням умовно поділяються радіометри?
96. Які ізотопи утворюють родини?
97. Які ізотопи не утворюють родини?
98. Який ізотоп калію є радіоактивним?
99. Який хімічний елемент називають радіоактивним?
100. Яке найближче значення LD_{50} для людини?

Радіометрія, радіоекологія та прикладна радіобіологія

1. Який основний шлях виведення ^{137}Cs з організму людини?
2. Який тип розподілу характерний для ^{90}Sr ?
3. Які допустимі рівні ^{137}Cs в м'ясі, згідно ДР-2006?
4. Який відсоток переходу ^{137}Cs з раціону в м'ясо ВРХ?
5. Який тип розподілу характерний для ^{137}Cs ?
6. Який період напіввиведення з організму людини ^{131}I ?
7. Який найефективніший сорбент для зниження надходження ^{137}Cs в продукцію тваринництва?
8. При якій питомій активності за ^{137}Cs допускається використання води для зрошення с/г культур?
9. Що таке фітодезактивація?
10. Хто вважається засновником сільськогосподарської радіоекології, як окремого напрямку науки?
11. В якому році було відкрите явище радіаційної стимуляції?
12. В якому році був підписаний "Договір про обмеження випробувань ядерної зброї"?
13. Скільки категорій територій, що зазнали радіонуклідного забруднення, визначено у Законі України "Про правовий режим території, яка зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи"?
14. Який радіонуклід натеper має найбільшу міграційну здатність в профілі ґрунту?
15. При якому значенні річної ефективної еквівалентної дози опромінення населення територія відноситься до зони посиленого радіологічного контролю?
16. При якій щільності забруднення ґрунту ізопоами ^{90}Sr територія відноситься до зони гарантованого добровільного відселення?

17. При якому значенні річної ефективної еквівалентної дози опромінення населення територія відноситься до зони безумовного (обов'язкового) відселення?
18. Який фактор натеper є основним при формуванні річної ефективної еквівалентної дози опромінення населення?
19. На яких типах ґрунтів спостерігаються найвищі коефіцієнти переходу радіонуклідів в рослини?
20. Внесення яких добрив є найефективнішим прийомом щодо зниження $K_{\Pi}^{137}\text{Cs}$ в рослини на дерново-підзолистих ґрунтах?
21. На ґрунтах з яким механічним складом відбувається найміцніша фіксація ^{137}Cs ?
22. Яким методом, як правило, визначають активність еталонних зразків?
23. За рахунок яких продуктів харчування натеper в основному формується доза внутрішнього опромінення населення?
24. Аналогом якого хімічного елементу є ^{90}Sr ?
25. Що є найефективнішим заходом для отримання продукції тваринництва, яка відповідає вимогам ДР-2006?
26. Що є найефективнішим заходом щодо запобігання надходженню радіонуклідів з кормів в продукцію тваринництва?
27. Який радіологічний спосіб боротьби з комахами-шкідниками найбільш ефективний в польових умовах?
28. Який радіологічний спосіб боротьби з комахами-шкідниками найбільш ефективний при зберіганні зерна?
29. Яка з опромінювальних установок є найбільш продуктивною за кількістю опромінюваного матеріалу?
30. Яка з опромінювальних установок є найбільш безпечною?
31. Скільки існує основних типів опромінювальних установок?
32. До якого типу відноситься пересувна установка "Колос"?
33. Яка з кормових культур має найбільший $K_{\Pi}^{137}\text{Cs}$?
34. Яка з овочевих культур має найбільший $K_{\Pi}^{137}\text{Cs}$?
35. Який сорт картоплі має найбільший $K_{\Pi}^{137}\text{Cs}$?
36. В якому типі ґрунтів спостерігається найбільш інтенсивна вертикальна міграція ^{137}Cs ?
37. Який з методів радіометрії заснований на реєстрації імпульсів, що надходять від лічильника на перерахунковий пристрій з подальшою математичною обробкою цифрового показника?
38. Який з методів радіометрії включає в себе експрес-методи визначення сумарної β -активності?
39. Для вимірювання якого виду іонізуючих випромінень використовується метод вимірювання в товстому шарі?
40. В якому з експрес-методів радіометрії не потрібно знати масу досліджуваного зразка?
41. Скільки виділяють періодів у розвитку гострої форми променевої хвороби?
42. Яка з форм фосфорних добрив буде знижувати накопичення в рослинах не тільки ^{90}Sr , а й ^{137}Cs ?
43. Скільки триває період відновлення при середній важкості променевої хвороби?
44. При якій формі променевої хвороби може бути відсутній латентний період?
45. В який період гострої променевої хвороби спостерігається фаза удаваного благополуччя?
46. Характерною ознакою якого періоду гострої променевої хвороби є геморагічний синдром?
47. При внесенні якого мікроелемента спостерігається зниження накопичення ^{137}Cs рослинами?
48. При внесенні якого мікроелемента спостерігається зниження накопичення ^{90}Sr рослинами?

49. При внесенні якого мікроелемента спостерігається зниження накопичення як ^{90}Sr , так і ^{137}Cs рослинами?
50. На якому типі ґрунтів спостерігається найбільша ефективність від внесення органічних добрив щодо запобігання надходження радіонуклідів в рослини?
51. Яка з перерахованих доз γ - і електронного виомінення є достатньою для подовження строків зберігання ягід, томатів у 2-4 рази?
52. При якому способі поливу буде спостерігатись найбільше надходження радіонуклідів в рослини, якщо вони знаходяться в поливній воді?
53. Якому способу поливу слід надати перевагу, якщо поливна вода не містить радіонуклідів, а ґрунт забруднений?
54. Як доцільно змінити разову норму поливу при дощуванні водою, що містить радіонукліди?
55. При якій дозі можна отримати найбільший вихід мутантних форм для селекції?
56. Як доцільно змінити кількість поливів у межах зрошувальної норми при поливі водою, що містять радіонукліди?
57. У який період вегетації слід проводити основну кількість поливів, якщо полив здійснюється водою, що містить радіонукліди?
58. Яку з перерахованих сільськогосподарських культур найбільш доцільно використовувати при проведенні фітодезактивації?
59. Які є способи очищення ґрунту від радіонуклідів?
60. Який найчистіший продукт можна отримати із забрудненого радіонуклідами молока?
61. З якими продуктами харчування в організм людини надходить 70-90% радіонуклідів?
62. Який тип після радіаційного відновлення є найбільш ефективним для ссавців при високих дозах опромінення?
63. Який з перерахованих видів м'яса має найбільший коефіцієнт концентрації ^{137}Cs і ^{90}Sr ?
64. Який з перерахованих видів м'яса має найменший коефіцієнт концентрації ^{137}Cs і ^{90}Sr ?
65. Аналогом якого хімічного елементу є ^{137}Cs ?
66. Хто встановлює контрольні рівні вмісту радіонуклідів в продукції сільського господарства?
67. З якою метою встановлюють контрольні рівні вмісту радіонуклідів в продукції сільського господарства?
68. До якої максимальної щільності забруднення за ^{137}Cs природних кормових угідь, розміщених на торф'яно-болотних ґрунтах можливе виробництво молока, що відповідає вимогам ДР-97?
69. В який вид м'яса переходить найменше ^{137}Cs з добового раціону?
70. На яких типах ґрунтів утримання молочної худоби можливе без проведення додаткових заходів щодо зменшення вмісту радіонуклідів в продукції тваринництва?
71. В яких межах знаходиться стимулююча доза γ -опромінення (Гр) для насіння більшості злаків?
72. Що є головною небезпекою дії інкорпорованих радіонуклідів?
73. Який механізм дії іонізуючих випромінень лежить в основі радіаційної технології подолання несумісності тканин?
74. Який механізм дії іонізуючих випромінень лежить в основі радіаційної технології запобігання проростанню овочів?
75. Який механізм дії іонізуючих випромінень лежить в основі радіаційної технології продовження строків зберігання ягід і фруктів?
76. Яку дозу γ -опромінення використовують при радіаційній консервації продукції, кГр?
77. В основі якої з перелічених радіаційно-біологічних технологій використовується ефект загибелі організму?
78. Яка величина є відправною точкою для визначення величини дози, необхідної для радіаційної дезинсекції зерна?
79. Які дози γ -опромінення є достатніми для повного знезараження хутра від збудників

- інфекційних хвороб, кГр?
80. Які дози γ -опромінення зеленої маси можуть замінити процес силосування, кГр?
 81. Які дози γ - і електронного опромінення є достатніми для боротьби з сальмонельозом, кГр?
 82. Які дози опромінення використовують для підвищення поживної цінності грубих кормів?
 83. При якій енергії іонізуючого випромінювання виникає явище наведеної радіоактивності?
 84. Які ізотопи називаються “міченими атомами”?
 85. Скільки основних методів одержання мічених сполук існує?
 86. Скільки основних способів одержання мічених добрив існує?
 87. Які радіонукліди натеper визначають радіаційний стан на забруднених територіях України?
 88. Рослини якої з перелічених родин накопичують більше ^{90}Sr ?
 89. Скільки АЕС на сьогоднішній день працює в Україні?
 90. В якій області в Україні видобувається найбільша кількість урану?
 91. Який ізотоп урану переважно використовується для одержання атомної енергії?
 92. Який етап ядерного паливного циклу (ЯПЦ) відсутній в Україні?
 93. З якою частотою економічно доцільно проводити вапнування ґрунтів?
 94. Яким сільськогосподарським культурам слід надавати перевагу при вирощуванні на сильно забруднених радіонуклідами угіддях?
 95. Які допустимі рівні вмісту ^{90}Sr для риби та рибопродуктів, згідно ДР-2006, Бк/кг?
 96. Які допустимі рівні вмісту ^{137}Cs для свіжих дикорослих ягід та грибів, згідно ДР-2006, Бк/кг?
 97. Яка з ягідних культур найбільше накопичує ^{137}Cs ?
 98. Який період напіввиведення ^{137}Cs характерний для більшості риб, діб?
 99. Який з видів грибів має найвищий коефіцієнт накопичення ^{137}Cs ?
 100. Які з видів риб найінтенсивніше накопичують радіонукліди?

Сільськогосподарська радіоекологія

1. Які біоценози мають найбільшу здатність щодо затримання радіоактивних випадінь?
2. Який шлях надходження в організм є основним для α -активних радіоактивних аерозолів?
3. Який з шляхів надходження радіонуклідів був найбільш небезпечним в перші дні після аварії?
4. Чим в основному обумовлена горизонтальна міграція радіонуклідів в природних ландшафтах?
5. Чим визначається величина вторинної вітрової міграції радіонуклідів?
6. На яких ґрунтах буде проявлятися найбільш інтенсивний вітровий перенос радіонуклідів?
7. В яких екосистемах буде найбільш інтенсивно проявлятися вітровий перенос?
8. Коли буде спостерігатися найбільша інтенсивність та дальність вторинного вітрового переносу радіонуклідів?
9. На яких елементах рель'єфу спостерігається максимальне відкладання радіонуклідів при вітровому переносі?
10. Як змінюється $K_{\text{П}}^{137}\text{Cs}$ із збільшенням ступеня зволоження ґрунту?
11. Для яких сортів сільськогосподарських культур за строками досягання характерне більше накопичення ^{137}Cs ?
12. Який із радіонуклідів інтенсивно накопичують рослини-калієфіли?
13. Який із радіонуклідів інтенсивно накопичують рослини-кальцієфіли?
14. Що є основним місцем накопичення радіонуклідів в лучних екосистемах на 2-3 рік після випадінь?

15. В яку фазу розвитку лучної рослинності спостерігається максимальне накопичення ^{90}Sr біомасою?
16. На ґрунтах з яким рівнем родючості ефективність добрив як засобу зменшення надходження радіонуклідів в рослини максимальна?
17. Які з видів добрив можуть сприяти накопиченню ^{90}Sr і ^{137}Cs в сільськогосподарських рослинах?
18. В якому діапазоні рН ґрунтового розчину будуть спостерігатись найвищі K_p ^{137}Cs в сільськогосподарських рослинах?
19. Який з продуктів рослинництва є критичним за здатністю до накопичення радіонуклідів?
20. Для якого радіонукліду позакореневий шлях надходження в рослини є основним?
21. Який з шляхів надходження радіонуклідів в організм сільськогосподарських тварин в основному формує забруднення продуктів тваринництва?
22. Який з радіонуклідів найкраще всмоктується із шлунково-кишкового тракту сільськогосподарських тварин?
23. Як залежить швидкість виведення радіонуклідів з організму від віку тварин?
24. Як залежить ефективність всмоктування радіонуклідів з шлунково-кишкового тракту від віку тварин?
25. Для чого доцільно використовувати більш “брудні” корми у разі радіонуклідного забруднення кормової бази?
26. Яка доступність для рослин радіонуклідів, зв’язаних з дерниною, порівняно з радіонуклідами, адсорбованими ґрунтом?
27. Для чого доцільно використовувати більш “чисті” корми у разі радіонуклідного забруднення кормової бази?
28. З чим в основному виділяються з організму радіонукліди з низькою ефективністю адсорбції в шлунково-кишковому тракті?
29. Яким шляхом в основному виділяються з організму радіонукліди, що потрапили в кров?
30. Чому дорівнює 37 ГБк/км^2 ?
31. В який рік після викиду радіонуклідів в атмосферу основним шляхом забруднення сільськогосподарських рослин є позакореневе надходження?
32. Який з радіонуклідів найінтенсивніше переходить в молочні жири?
33. Який з радіонуклідів найінтенсивніше переходить в молочні білки?
34. В якій з тканин тваринного організму найінтенсивніше накопичується ^{90}Sr ?
35. Який вид тваринницької продукції має найнижчі рівні забруднення ^{137}Cs ?
36. Який вид рослинницької продукції має найнижчі рівні забруднення ^{137}Cs ?
37. Який з видів сільськогосподарських тварин має найвищу радіостійкість?
38. Який з видів сільськогосподарських тварин має найвищу радіочутливість?
39. Яка поглинута доза при гострому опроміненні є достатньою для 100% летальності всіх видів ссавців?
40. Які з клітин крові мають більшу радіочутливість?
41. Які з клітин крові мають більшу радіостійкість?
42. Види з якою плоідністю (кількістю хромосомних наборів в ядрі) мають найбільшу радіостійкість?
43. Види з якою плоідністю (кількістю хромосомних наборів в ядрі) мають найбільшу радіочутливість?
44. До яких контрзаходів відноситься обмеження сільськогосподарської діяльності, тимчасове відселення населення, обмежене вживання радіоактивно забрудненої води і продуктів харчування?
45. Який період піврозпаду ^{137}Cs ?
46. Який період піврозпаду ^{90}Sr ?
47. Яка нижня межа обмеження використання в їжу молока, забрудненого ^{137}Cs (Бк/л)?

48. Яка питома активність ^{238}U та ^{232}Th в мінеральних добривах (Бк/кг)?
49. Який період піввиведення ^{137}Cs з організму людини?
50. Який період піврозпаду ^{238}U ?
51. Який шлях надходження радіонуклідів в організм на сьогоднішній день є основним?
52. Який радіонуклід відноситься до штучних?
53. За рахунок чого в основному зменшується концентрація радіоактивного йоду в організмі?
54. Який критичний орган по відношенню до ^{131}I ?
55. Який тип випромінювання характерний для ^{137}Cs ?
56. Які допустимі рівні ^{137}Cs в молоці та молочних продуктах, згідно ДР-2006?
57. Який тип випромінювання характерний для ^{90}Sr ?
58. Який період піввиведення ^{90}Sr з організму людини?
59. При якій щільності забруднення ґрунту ізотопами ^{137}Cs територія відноситься до зони безумовного (обов'язкового) відселення?
60. Яка з кормових культур має найменші коефіцієнти переходу ^{137}Cs ?
61. Який період піврозпаду ^{40}K ?
62. Що таке інкорпоровані радіонукліди?
63. Які є радіонукліди природного походження?
64. На якому етапі розвитку радіобіології виникла радіоекологія?
65. Які є ізотопи космогенного походження?
66. Які ізотопи утворюють родини?
67. Які ізотопи не утворюють родини?
68. Який ізотоп калію є радіоактивним?
69. Які хімічні елементи є радіоактивними?
70. Який основний шлях виведення ^{137}Cs з організму людини?
71. Який тип розподілу характерний для ^{90}Sr ?
72. Які допустимі рівні ^{137}Cs в м'ясі, згідно ДР-97, Бк/кг ?
73. Який відсоток переходу ^{137}Cs з раціону в м'ясо ВРХ ?
74. Який тип розподілу характерний для ^{137}Cs ?
75. Який період піввиведення з організму людини ^{131}I ?
76. При якій питомій активності за ^{137}Cs допускається використання води для зрошення с/г культур?
77. Що таке фітодезактивація?
78. Хто вважається засновником сільськогосподарської радіоекології, як окремого напрямку науки?
79. В якому році був підписаний "Договір про обмеження випробувань ядерної зброї" ?
80. Скільки категорій територій, що зазнали радіонуклідного забруднення, визначено у Законі України "Про правовий режим території, яка зазнала радіоактивного забруднення внаслідок Чорнобильської катастрофи"?
81. Який радіонуклід натеper має найбільшу міграційну здатність в профілі ґрунту?
82. При якому значенні річної ефективної еквівалентної дози опромінення населення територія відноситься до зони посиленого радіологічного контролю, мЗв?
83. При якій щільності забруднення ґрунту ізотопами ^{90}Sr територія відноситься до зони гарантованого добровільного відселення, кБк/м²?
84. При якому значенні річної ефективної еквівалентної дози опромінення населення територія відноситься до зони безумовного (обов'язкового) відселення, мЗв?
85. На яких типах ґрунтів спостерігаються найвищі коефіцієнти переходу радіонуклідів в рослини?
86. Внесення яких добрив є найефективнішим прийомом щодо зниження $K_{\text{п}}$ ^{137}Cs в рослини на дерново-підзолистих ґрунтах?
87. На ґрунтах з яким механічним складом відбувається найміцніша фіксація ^{137}Cs ?

88. За рахунок яких продуктів харчування натеper в основному формується доза внутрішнього опромінення населення?
89. Аналогом якого хімічного елементу є ^{90}Sr ?
90. Що є найефективнішим заходом для отримання продукції тваринництва, яка відповідає вимогам ДР-2006?
91. Що є найефективнішим заходом щодо запобігання надходженню радіонуклідів з кормів в продукцію тваринництва?
92. Яка з кормових культур має найбільший $K_{\text{П}}^{137}\text{Cs}$?
93. Яка з овочевих культур має найбільший $K_{\text{П}}^{137}\text{Cs}$?
94. В якому типі ґрунтів спостерігається найбільш інтенсивна вертикальна міграція ^{137}Cs ?
95. Яка з форм фосфорних добрив буде знижувати накопичення в рослинах не тільки ^{90}Sr , а й ^{137}Cs ?
96. При внесенні якого мікроелемента спостерігається зниження накопичення ^{137}Cs рослинами?
97. При внесенні якого мікроелемента спостерігається зниження накопичення ^{90}Sr рослинами?
98. При внесенні якого мікроелемента спостерігається зниження накопичення як ^{90}Sr , так і ^{137}Cs рослинами?
99. На яких за механічним складом ґрунтах спостерігається найбільша ефективність від внесення органічних добрив щодо запобігання надходження радіонуклідів в рослини?
100. При якому способі поливу буде спостерігатись найбільше надходження радіонуклідів в рослини, якщо вони знаходяться в поливній воді?
101. Якому способу поливу слід надати перевагу, якщо поливна вода не містить радіонуклідів, а ґрунт забруднений?
102. Як доцільно змінити разову норму поливу при дощуванні водою, що містить радіонукліди?
103. Як доцільно змінити кількість поливів у межах зрошувальної норми при поливі водою, що містять радіонукліди?
104. Вкажіть прийом, який передбачає очищення ґрунту від радіоактивних речовин?
105. Який найчистіший продукт можна отримати із забрудненого радіонуклідами молока?
106. З якими продуктами харчування в організм людини надходить 70-90% радіонуклідів?
107. Який з перерахованих видів м'яса має найбільший коефіцієнт концентрації ^{137}Cs і ^{90}Sr ?
108. Який з перерахованих видів м'яса має найменший коефіцієнт концентрації ^{137}Cs і ^{90}Sr ?
109. Аналогом якого хімічного елементу є ^{137}Cs ?
110. Хто встановлює контрольні рівні вмісту радіонуклідів в продукції сільського господарства на рівні господарства?
111. До якої максимальної щільності забруднення за ^{137}Cs природних кормових угідь (кБк/м²), розміщених на торф'яно-болотних ґрунтах можливе виробництво молока, що відповідає вимогам ДР-2006?
112. На яких типах ґрунтів утримання молочної худоби можливе без проведення додаткових заходів щодо зменшення вмісту радіонуклідів в продукції тваринництва?
113. Які радіонукліди натеper визначають радіаційний стан на забруднених територіях України?
114. Рослини якої з родин накопичують більше ^{90}Sr ?
115. Скільки АЕС на сьогоднішній день працює в Україні?
116. В якій області в Україні видобувається найбільша кількість урану?
117. Який ізотоп урану переважно використовується для одержання атомної енергії?
118. Який етап ядерного паливного циклу (ЯПЦ) відсутній в Україні?
119. З якою частотою економічно доцільно проводити вапнування ґрунтів?
120. Яким сільськогосподарським культурам слід надавати перевагу при вирощуванні на

сильно забруднених радіонуклідами угіддях?

121. Які допустимі рівні вмісту ^{90}Sr для риби та рибопродуктів, згідно ДР-2006, Бк/кг?
122. Які допустимі рівні вмісту ^{137}Cs для свіжих дикорослих ягід та грибів, згідно ДР-2006, Бк/кг?
123. Яка з ягідних культур найбільше накопичує ^{137}Cs ?
124. Який період напіввиведення ^{137}Cs характерний для більшості риб, діб?
125. Який з видів грибів має найвищий коефіцієнт накопичення ^{137}Cs ?
126. Які з видів риб найінтенсивніше накопичують радіонукліди?
127. Які допустимі рівні вмісту ^{90}Sr для картоплі, згідно ДР-2006, Бк/кг?
128. Які допустимі рівні вмісту ^{137}Cs для овочів, згідно ДР-2006, Бк/кг?
129. Які допустимі рівні вмісту ^{137}Cs для хлібопродуктів, згідно ДР-2006, Бк/кг?
130. Які допустимі рівні вмісту ^{90}Sr для хлібопродуктів, згідно ДР-2006, Бк/кг?
131. Які допустимі рівні вмісту ^{90}Sr для фруктів, згідно ДР-2006, Бк/кг?
132. Які допустимі рівні вмісту ^{137}Cs для фруктів, згідно ДР-2006, Бк/кг?
133. Які допустимі рівні вмісту ^{90}Sr для м'яса та м'ясопродуктів, згідно ДР-2006, Бк/кг?
134. Які допустимі рівні вмісту ^{137}Cs для риби та рибопродуктів, згідно ДР-2006, Бк/кг?
135. Які допустимі рівні вмісту ^{90}Sr для молока, згідно ДР-2006, Бк/кг?
136. Які допустимі рівні вмісту ^{90}Sr для питної води, згідно ДР-2006, Бк/кг?
137. Які допустимі рівні вмісту ^{137}Cs для питної води, згідно ДР-2006, Бк/кг?
138. Які допустимі рівні вмісту ^{137}Cs для лікарських рослин, згідно ДР-2006, Бк/кг?
139. Які допустимі рівні вмісту ^{90}Sr для лікарських рослин, згідно ДР-2006, Бк/кг?
140. Які допустимі рівні вмісту ^{137}Cs для продуктів дитячого харчування, згідно ДР-2006, Бк/кг?
141. Який механізм дії іонізуючих випромінень лежить в основі радіаційної технології подолання несумісності тканин ?
142. Який механізм дії іонізуючих випромінень лежить в основі радіаційної технології запобігання проростанню овочів?
143. Який механізм дії іонізуючих випромінень лежить в основі радіаційної технології продовження строків зберігання ягід і фруктів?
144. Яку дозу γ -опромінення використовують при радіаційній консервації продукції, кГр?
145. В основі якої з перелічених радіаційно-біологічних технологій використовується ефект загибелі організму?
146. Яка величина є відправною точкою для визначення величини дози, необхідної для радіаційної дезинсекції зерна?
147. Які дози γ -опромінення є достатніми для повного знезараження хутра від збудників інфекційних хвороб, кГр?
148. Які дози γ -опромінення зеленої маси можуть замінити процес силосування, кГр?
149. Які дози γ - і електронного опромінення є достатніми для боротьби з сальмонельозом, кГр?
150. Які дози опромінення використовують для підвищення поживної цінності грубих кормів?

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Белов А.Д., Косенко А.С., Пак В.В., Лысенко Н.П., Рогожина Л.В. Практикум по ветеринарной радиобиологии. - М.: Агропромиздат, 1988. – 240 с.
2. Гудков І.М., Віннічук М.М. Сільськогосподарська радіобіологія. - Житомир: ДАУ, 2003. – 472 с.
3. Гудков І.М., Ткаченко Г.М. Основи сільськогосподарської радіобіології та радіоекології. - К.: Вища школа, 1993. – 257 с.
4. Гудков І.Н., Ткаченко Г.М., Кицно В.Е., Практикум по сельскохозяйственной радиобиологии. - К.: УСХА, 1992. - 207 с.
5. Довідник для радіологічних служб Мінсільгоспспроду України. - К.: Вид-во “Нора-прінт”, 1997. – 200 с.
6. Допустимі рівні забруднення продуктів ДР-2006. Наказ МОЗ України 03.05.2006 № 256.
7. Ильин Л.А., Кириллов В.Ф., Коренков И.П. Радиационная гигиена. – М.: Медицина, 1999. – 380 с. или Кириллов В.Ф., В.А.Книжников, И.П.Куренков. Радиационная гигиена. - М.: Медицина, 1988. - 336 с.
8. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. - М.: Энергоатомиздат, 1987. – 192 с.
9. Кутлахмедов Ю.О., Корогодін В.І., Кольтовер В.К. Основи радіоекології. – К.: Вища школа, 2003. – 316 с.
10. Максаков В.Я. Годівля сільськогосподарських тварин. – К.: Урожай, 1987. – 162 с.
11. Норми радіаційної безпеки України (НРБУ-97). - К: МОЗ, 1997. - 121 с.
12. Основні санітарні правила протирадіаційного захисту України (ОСПУ-2001). - К.: МОЗ, 2001. – 136 с.
13. Основи лісової радіоекології (І.М.Патлай, М.М.Давидов, В.П.Ланд та ін.) - К.: Ярмарок, 1999. – 222 с.
13. Пристер Б.С., Лоцилов Н.А., Немец О.Ф., Поярков В.А. Основы сельскохозяйственной радиологии. К.: Урожай, 1991. – 471 с.
14. Радиобиология (ред. А.Д. Белов). – М.: «Колос», 1999. – 383 с. или Белов А.Д., Киршин В.А. Ветеринарная радиобиология. – М.: Агропромиздат, 1987. – 288 с.
15. Радиоактивное и химическое загрязнение Днепра и его водохранилищ после аварии на Чернобыльской АЭС / под ред. Д.М. Гродзинского. – К.: Наукова думка, 1992. – 188 с.
16. Рекомендації по веденню сільського господарства в умовах радіоактивного забруднення території України в результаті аварії на Чорнобильській АЕС на період 1996-1998 рр. /під ред. Б.С. Прістера. – К.: Нива, 1996. – 56 с.
17. Сівозміни – основа інтенсифікації землеробства / Л.А.Барнштейн, Л.Я.Бергульова, А.В.Волинський, Г.В. Грисенко та ін. – К.: Урожай, 1985. – 178 с.
18. Ткаченко Г.М., Гудков І.М. Сільськогосподарська радіобіологія і радіоекологія. К.: Бібліотека ветеринарної медицини, 1999. – 63 с.
19. Фокин А.Д., Лурье А.А., Торшин С.П. Сельскохозяйственная радиология. – М.: Дрофа, 2005. – 368 с.
20. Чорнобильська катастрофа / Ред. В.Г. Баряхтар. – К.: Наук. думка, 1996. – 515 с.