

РОЗДІЛ 3

ХРОНІЧНЕ ОПРОМІНЕННЯ ЛЮДИНИ В МАЛИХ ДОЗАХ

МЕХАНІЗМИ взаємодії іонізуючих випромінювань з біологічними об'єктами являють собою ланцюг послідовних фізичних і фізико-хімічних перебудов, які проявляються у вигляді збудження, первинної і вторинної іонізації молекул, що, в свою чергу, призводить до появи збуджених атомів і вільних радикалів, які реагують один з одним та інтактними біомолекулами. Глибокі хімічні порушення, які спостерігаються в клітині при дії іонізуючого випромінювання, приводять до розвитку біологічних ефектів.

Наслідки хронічного опромінення проявляються в ураженнях, які є віддаленими ефектами. У віддаленому періоді після опромінення можуть виникати стохастичні ефекти: соматичні – злоякісні пухлини та генетичні ефекти – вроджені потворства і порушення, які передаються через нащадків. Ефекти цих типів виникають у результаті мутацій та інших порушень в структурах клітин, які несуть спадковість. За результатами радіобіологічних експериментів на клітинному та молекулярному рівнях визнана можливість навіть одиночних актів іонізації викликати порушення деяких генетичних механізмів.

Дуже важливо, що відповідно до сучасних уявлень вихід генетичних і соматично-стохастичних ефектів у діапазоні доз, які реально зустрічаються в звичайних умовах, – малих доз, мало залежить від потужності дози. Це означає, що ефект визначається перш за все сумарною накопиченою дозою, незалежно від того, отримана вона за 1 день, 1 с або за 50 років. Таким чином, оцінюючи ефекти хронічного опромінення, потрібно мати на увазі, що ці ефекти накопичуються в організмі протягом тривалого часу. В зв'язку з цим питання опромінення людини малими дозами радіації стало актуальним у наш час.

Під “*малими дозами*” опромінення людини розуміються дози, які близькі до доз природного радіаційного фону (*табл. 3.1*), тобто дози, які не перевищують кількох десятих частин зіверту, а також дози, які не перевищують кількох сантізівертів (10^{-2} Зв) на рік при багаторічному опроміненні.

Таблиця 3.1

Опромінення людини від природних джерел радіоактивності [93]

| Джерело опромінювання | Ефективна доза (мЗв/рік) | |
|---|--------------------------|-----------|
| | Типова | Підвищена |
| Космічне випромінювання | 0,39 | 2,0 |
| Земне гамма-випромінювання | 0,46 | 4,3 |
| Радіонукліди в організмі (за виключенням радону) | 0,23 | 0,6 |
| Радон та продукти його розпаду | 1,30 | 10 |
| Всього (округлено) | 2,40 | – |

У радіобіології малу дозу випромінювання та потужність дози відносять до опромінювання, при котрому дуже мало ймовірно, що більш ніж один акт поглинання енергії випромінювання може відбутися в критичній частині клітини (та ушкодити її) в межах часу, протягом котрого механізми репарації в клітині можуть діяти.

За визначенням Наукового комітету ООН з дії атомної радіації (UNSCEAR), малі дози опромінення становлять 0,2 Гр для іонізуючих випромінювань із низьким значенням лінійної передачі енергії, та 0,05 Гр – із високим за потужністю поглиненої дози порядку 0,05 Гр/хв (в термінах ефективної еквівалентної дози мала доза радіації належить до сумарної дози, меншої за 200 мЗв (20×10^{-2} Зв), та потужності дози, нижчої за 0,1 мЗв ($0,1 \times 10^{-3}$) Зв/хв [93]).

Необхідність врахування малих доз опромінення у теперішній час зумовлюється тим, що хоча джерело радіації може давати малу дозу, ця доза не обов'язково повинна відноситися до малих рівнів співвідношення “доза – реакція”. Через неминуче опромінення за рахунок природного радіаційного фону жодна людина не може мати нульову дозу або навіть отримати тільки дуже малі дози. Опромінення природною радіацією дає індивідуальну дозу біля 2,4 мЗв на рік для людини в нормальних умовах, так що до середини життя середня людина накопичить дозу порядку 0,1 Зв (у районах з високим рівнем природної радіації отримана доза може бути на порядок вищою за цю середню дозу). Дози, які отримані в результаті специфічного опромінення, є додатковими приростами до цієї накопиченої “природної дози”. Для організму однаково, отримує він дозу при опроміненні від природних джерел або від визначеного штучного джерела: важливою величиною є *сумарна доза*. Крім того, сьогодні відомо, що сумарна шкідлива дія іонізуючого випромінювання у поєднанні з іншими факторами (хімічними, біологічними) може посилюватися за рахунок їх синергічної дії.

3.1. НАЙПОШИРЕНІШІ БІОЛОГІЧНІ ЕФЕКТИ ВІД МАЛИХ РІВНІВ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Зараз більшість вчених-радіобіологів наполягають на тому, що біологічні ефекти опромінення за умов однакових поглинутих доз мають принципові розбіжності.

Радіогенні зміни різних за природою показників в інтервалі “великих” доз іонізуючого випромінювання в основному мають характерні риси класичних порушень і істотним чином залежать від якості радіації – природи випромінювання.

У діапазоні “малих” доз на величину ефектів має істотний вплив наявність чи відсутність адаптивної відповіді досліджуваної системи, нелінійність дозової залежності, “обернений ефект” від потужності випромінювання.

Зараз вважається визнаним, що у порівнянні з великими дозами, по-перше, ефект впливу малих доз має іншу природу, по-друге, для зниження ефектів впливу малих доз потрібні інші методи, ніж у випадку великих доз.

За матеріалами досліджень в інституті експериментальної патології, онкології і радіобіології ім. Р.С. Кавецького НАН України виявлені характерні радіогенні зміни та особливості формування ефектів в області “малих” доз випромінювання, серед яких встановлено зростання ефекту на одиницю дози при зниженні інтенсивності випромінювання, та деякі інші особливості ефектів радіогенних ушкоджень, ініційованих різною тривалістю опромінення в малих дозах іонізуючого випромінювання. Є підтвердження тому, що ризик канцерогенних наслідків навіть вищий для хронічного опромінення, ніж для гострого, короткотривалого.

Таким чином, на сьогоднішній час серед вчених має перевагу думка відсутності нешкідливих доз іонізуючого випромінювання і що навіть малі дози можуть бути причинами появи різних захворювань. Іонізуюче випромінювання може виступати як ініціатор чи як прискорювач канцерогенезу: якщо перший етап канцерогенезу індукований хімічно, то радіація може відіграти роль “останньої краплини”.

Іонізуюче випромінювання фундаментальним чином відрізняється від токсичних речовин, які можна вводити у розчин і розбавляти до все менших і менших концентрацій. На відміну від таких речовин, мінімальною порцією впливу є одиничний іонізаційний трек, що залишається від одиночного електрона високої енергії. Електрон не

можна ні розділити, ні змусити його передавати енергію більш м'яким способом, тому навіть одиночні треки, незалежні один від одного, ніколи не бувають нешкідливими для організму з точки зору створення канцерогенних ефектів у клітинах організму.

Трековий підхід при розгляді пошкоджень організму іонізуючим випромінюванням дає обґрунтування тому факту, що первинні іонізаційні треки, незалежні один від одного, ніколи не бувають нешкідливими з точки зору створення канцерогенних ушкоджень у тих клітинах, через які вони проходять. Одиночний трек, через такі пошкодження, без допомоги іншого треку може стати причиною раку.

У радіобіологічних експериментах на клітинному та молекулярному рівнях показана можливість навіть одиночних треків, тобто одиночних актів іонізації, визвати порушення деяких генетичних механізмів. Крім того, з теоретичних уявлень про процеси виникнення раку і генетичних захворювань випливає, що при розгляді дії опромінення на людину неможливо виключити ймовірність виникнення відповідних порушень у клітинних структурах та генетичних ефектів, які обумовлені цими порушеннями.

Дослідження доз іонізуючого випромінювання в діапазоні до 1 Гр, що проведені в інституті експериментальної радіології НЦРМ України, вказали на наявність прямої дії малих доз випромінювання у вигляді патологічних змін в організмі. До ефектів впливу малих доз іонізуючого випромінювання відносяться генетичні порушення, онкологічні захворювання крові, лейкози і злоякісні новоутворення. Аналіз наслідків Чорнобильської катастрофи вказав на зростання частоти різних форм тиреоїдної патології у дітей. За даними Інституту гігієни та медичної екології АМН України, результатом дії радіоактивного йоду виявилися аберації хроматидного типу.

До життєво важливих процесів, які безпосередньо порушуються при дії іонізуючої радіації, відноситься біосинтез АТФ, що здійснюється системою окислювально-відновлювальних ферментів, локалізованих у внутрішній мембрані мітохондрій – дихального ланцюжка. Висока ступінь ушкодженості цієї системи зумовлена значною радіочутливістю металомістких ферментів (з яких, в основному, складається дихальний ланцюжок). Порушення біоенергетичних процесів внаслідок ушкодження дихального ланцюжка призводить до гострого дефіциту АТФ у клітині, результатом чого може бути або загибель клітини через нестачу енергії для функціонування систем репарації і виконання життєво важливих функцій, або перехід клітини на більш примітивний тип енергозабезпечення.

Легко порушуються під дією радіації окислювально-відновлювальні процеси в клітині. Порушення мембран і наступна активація процесів перекісного окислення ліпідів, збільшення концентрації ліпоперекисів і вільних ненасичених жирних кислот можуть зумовити втрату здібності виконання даною клітиною спеціалізованих функцій, що викликає погіршення дисбалансу у багаторівневій складній системі багатоклітинного організму.

Одним з найбільш виражених наслідків таких порушень може бути злаякісна трансформація клітини. Згідно з сучасними уявленнями про природу канцерогенезу, в основі переродження клітини лежить зміна основи її апарату спадкоємності – молекул ДНК. Це виражається в активації онкогену. Таку активацію можуть викликати фізичні фактори (іонізуюче та ультрафіолетове випромінювання), хімічні (канцерогени); вона спонтанно виникає і при звичайній життєдіяльності клітини, яка пов'язана зі старінням. В основі канцерогенезу лежить імовірнісний процес – онкогенна трансформація клітини. Іонізуюче опромінення є лише одним з багатьох канцерогенних факторів, які впливають на людину у реальному житті. Завдяки тому, що в оточуючому середовищі вже існує пул канцерогенних факторів, які явно перевищують гіпотетичний рівень, будь-яка доза лише збільшує у тому чи іншому, навіть у малому, не завжди вловимому, ступені канцерогенний ефект впливу цього пулу на популяцію.

В Інституті біофізики Росії отримані результати впливу низькоінтенсивного опромінення на молекули ДНК, на мембрани у клітинах крові, печінки, селезінки. Важливими є отримані результати про однакові ефекти від доз, які різняться у 10-20 разів. Ці результати пояснюються наявністю односторонніх розривів, зшивок ДНК-білок та іншими змінами ДНК. Вчені висувають припущення, що механізми виникнення порушень у ДНК при малих дозах радіації може бути іншим, ніж при високих, і головна роль тут відводиться порушенням мембран під дією опромінення. В першу чергу змінюються їх структурні характеристики, а потім і концентрація мембранних ферментів, у тому числі ферментів репарації ДНК.

3.2. ТОКСИКОЛОГІЯ ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^3H

^{90}Sr . Після одноразового потрапляння через рот близько 0,3, а після інгаляційного – близько 0,4 загальної кількості стронцію абсорбується у міжклітинну рідину, а приблизно половина цієї кількості відкладається у кістковій тканині (стронцій відноситься до групи остеотропних речовин). При хронічному потраплянні транспортабельних сполук стронцію частка радіоізоотопу, що відкладається у кістках, складає 99% його загальної кількості, яка присутня в організмі. В інших органах і тканинах стронцій відкладається в незначних кількостях. Таким чином, у випадку потрапляння в організм ^{90}Sr , опромінюється практично лише кісткова тканина. Продифундувавши крізь органічний матрикс кістки, ^{90}Sr обмінюється з кальцієм. Подальше включення відбувається при перебудові кістки і перекристалізації її мінерала. Найбільша кількість радіоактивних ділянок, що сильно поглинають ^{90}Sr , знаходиться у губчастій кістці. Схожим чином накопичують ^{90}Sr і зони росту довгих кісток. Величина відкладення ^{90}Sr в організмі людини залежить від віку особини, кількості радіонукліда, що надходить, від інтенсивності росту нової кісткової тканини та інше. Більшу шкоду ^{90}Sr являє для дітей, до організму котрих він надходить з молоком і накопичується в швидко підростаючій кістковій тканині. Рівні накопичення ^{90}Sr у дітей можуть в декілька разів перевищувати рівні накопичення у дорослих. Після відкладення в кістковій тканині починає переважати зворотний процес – перенесення ^{90}Sr з кістки у міжклітинну рідину і далі у нирки. З кісткової тканини ^{90}Sr виводиться дуже повільно.

Біологічна дія ^{90}Sr пов'язана з характером його розподілу в організмі (накопичення у скелеті) і залежить від дози β -опромінення, створеного ним та його дочірнім радіоізоотопом ^{90}I . Критичні частини скелету, що отримують найбільші дози внутрішнього опромінювання, локалізовані головним чином у губчастій кістці. Той факт, що в ній знаходиться кровотворний кістковий мозок, ще більше збільшує небезпеку радіаційного ураження. Опромінювання кісткового мозку ^{90}S може викликати нестачу кістковомозкового кровотворення, розвиток злоякісних пухлин і лейкозів. Найбільшого ризику радіаційного ураження зазнають здатні до поділу клітини, які покривають кісткові поверхні.

При тривалому надходженні ^{90}S в організм, навіть у невеликій кількості, в результаті безперервного опромінення кісткової тканини можуть розвиватися лейкемія і рак кісток.

^{137}Cs . Радіоцезій, як і радіостронцій, надходить до організму людини через їжу і питну воду. Характер розподілу ^{137}Cs не залежить від шляху його надходження до організму. ^{137}Cs легко всмоктується з шлунково-кишкового тракту (резорбція 100%). Потрапивши в кров, ^{137}Cs достатньо рівномірно розподіляється в органах і тканинах, потім відбувається перерозподіл з переважним (50%) накопиченням у м'язах. У скелеті відкладається незначна кількість ^{137}Cs – 3-4%.

Характер розподілу ^{137}Cs між органами і тканинами змінюється у часі. При цьому змінюється не лише рівень накопичення радіонукліда в окремих органах, але і послідовність за рівнями накопичення. В період стану динамічної рівноваги максимальна концентрація ^{137}Cs досягається в м'язах, в нирках; в інших м'яких тканинах концентрація радіонукліда нижче.

При хронічному надходженні до організму ^{137}Cs вибірково накопичується у м'язах, однак його уразливою дією можуть бути охоплені також нирки, кістковий мозок, статеві залози. Відбуваються порушення кровотворення, враження кишечника і різні пухлинні процеси м'яких тканин.

Основна кількість ^{137}Cs , незалежно від шляху надходження, виводиться з сечою. Зменшення вмісту радіонукліда в організмі підпорядковується експоненційному закону, ефективний період напіввиведення складає 70-140 дб. Висока моторність ^{137}Cs в організмі обумовлює проникнення його через різні гістогематичні бар'єри.

^3H . За літературними матеріалами, біологічні ефекти ^3H на організм людини досить різноманітні. Спираючись на цілий ряд клінічно-лабораторних досліджень, показано, що при великих дозах опромінення біологічні ефекти опромінення ^3H полягають у морфологічних змінах і порушеннях функції ендокринних і кровотворних органів, судинної системи, печінки, селезінки та інших органів, у тому числі яєчників. Опромінення ^3H у період вагітності призводить до різних ефектів у нащадків у першому та наступних поколіннях. Це, в залежності від дози та тривалості опромінення, проявляється у зниженні загальної маси нащадків, зниженні маси головного мозку, зниженні білка та ДНК у ньому, збільшенні частоти пухлин яєчників, гематом та інше. До біохімічних змін, які викликані опроміненням ^3H , відносять зниження глікогену в печінці та в м'язах, збільшення вмісту пірвіноградної кислоти у крові, зменшення вмісту нуклеїнових кислот у кістковому мозку, селезінці і тимусі.

За результатами багатьох клініко-фізіологічних і патоморфологічних досліджень, суттєвої різниці в клініці інтоксикації окисом ^3H від дії інших радіонуклідів та зовнішніх джерел радіації немає. Але при

гострому опроміненні 3H наявний більш гострий розвиток променевої хвороби. Хронічне опромінення 3H призводить до більш частіших випадків розвитку злоякісних новоутворень і значного скорочення латентного періоду їх виникнення. У віддаленні строки після ураження наслідки опромінення 3H проявляються в пухлинах молочних залоз, гіпофізі яєчників та щитовидної залоз, лейкозах, причому вважається, що окис 3H має більш високу лейкемогенну активність, ніж протони, рентгенівські та гамма-випромінювання. При порівнянні віддалених наслідків хронічної дії окису 3H та зовнішнього гамма-опромінення ^{137}Cs тварин виявлена більша ефективність 3H за цілим рядом критеріїв, а коефіцієнт відносної біологічної ефективності 3H , що розрахований при порівнянні частоти випадків виникнення злоякісних новоутворень усіх локалізацій при опроміненні 3H по відношенню до гамма-випромінення ^{137}Cs дорівнював 2,2. Це найбільш повно відображує порівнювальну ефективність 3H по відношенню до ^{137}Cs . Включаючись до структури ДНК, 3H викликає радіаційно індуковані генетичні ефекти, що зумовлені опроміненням хромосом при бета-розпаді 3H і ефектом трансмутації (^3H-Ge), коли відбувається розрив створеного гелій-вуглеводного зв'язку в хромосомі. Визначена наявність ембріональної смертності в першому поколінні від опромінених батьків. Вважається, що вплив опромінення 3H на людину виявляється, насамперед, у його дії на генетичний апарат організму. При чому звертається увага на те, що цей генетичний ефект зростає при малих дозах опромінення.

Таким чином, біологічна дія 3H різноманітна і не залежить від шляхів надходження цього радіонукліда до організму людини. Тому при оцінці впливу 3H на організм необхідно враховувати можливість надходження його за усіма можливими ланцюжками: через органи дихання, кожний покрив і, в першу чергу, через продукти харчування.

3.3. ЗАЛЕЖНІСТЬ “ДОЗА – ЕФЕКТ” ДЛЯ МАЛИХ РІВНІВ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Вивчення дії малих доз іонізуючого випромінювання проходило у декілька етапів. На початковій стадії багато радіобіологів дотримувалися думки, що малі дози не впливають на біологічні об'єкти, і вважали, що наслідки опромінення живих систем проявляються лише з певного (граничного) рівня доз, тому залежність “доза – ефект” носить

граничний характер. Згодом для оцінки стохастичних ефектів опромінення (рак, генетичні порушення) стали використовувати концепцію безграничної лінійної або лінійно-квадратичної залежності від дози. Сьогодні превалує саме ця концепція – концепція “безпорогової” дії іонізуючого випромінювання на організм людини – тобто немає межі, нижче якої дія випромінювання відсутня.

На основі детального аналізу даних опромінення населення, що постраждало від ядерного вибуху в Хіросімі і Нагасакі та від Чорнобильської аварії, побудовані чотири моделі опису залежності онкологічної смертності серед населення від отриманої дози опромінення: лінійна модель (ефект = доза¹), квадратично-лінійна (ефект = доза¹), надлінійна (ефект = доза^{3/4}), квадратична (ефект = доза²). Показано, що усі моделі з достатнім ступенем ймовірності дають уяву про залежність “доза-ефект” для малих рівнів радіаційного опромінення. Така варіабельність у моделюванні процесу ризику онкологічної смертності від опромінення малими дозами зумовлена більш високою відносною біологічною ефективністю малих доз α - , β -випромінювання, в порівнянні з прийнятою нині (20 і 2 для α - та β - випромінювання відповідно). Аналогічні висновки, стосовно більш високої відносної біологічної ефективності малих доз альфа-випромінювання (до 40), отримані іншими дослідниками. Цей факт пояснюється особливостями розподілу і поглинання енергії у кістковій тканині, практично повною сумацією ушкоджень та відсутністю відновлювальних процесів при впливі альфа-випромінювання. Тому це відповідним чином відбивається і на формі моделі “доза – ефект”. Коректне визначення залежності “доза – ефект” має важливе практичне значення, бо від вибору адекватної моделі залежить точність оцінки ризику.

Сьогодні багатьма радіобіологами визнано, що перед діапазоном доз опромінення, які спричиняють стимулюючий ефект, знаходиться область, в якій доза іонізуючого випромінювання приводить до таких самих змін у клітинах, як і більш високі дози. Ці дві області доз (низьких і високих) з однаковими ефектами впливу на біологічні об’єкти розділені інтервалом, в якому проявляється протилежний, стимулюючий ефект опромінення. Існують результати лабораторних досліджень, що порушення в мембранах селезінки, печінки, еритроцитів відбуваються за однаковими законами: бімодальна залежність ефекту від дози і однаковий ефект для доз опромінення, які різняться приблизно до 20 разів. Таким чином, існує інтервал доз, де ефекти від опромінення є такими ж, як і при великих дозах (більших у 20 разів).

У пояснення такої “бімодальної” залежності “доза – ефект” серед багатьох науковців-радіобіологів сучасності існує думка щодо наявності взаємодії двох протилежно спрямованих процесів ураження і репарації. Тобто при малих дозах опромінення системи відновлення

не індукуються або індукуються не в повній мірі, в результаті чого спостерігаються лише ефекти, які пов'язані з ураженням біомолекул. При зростанні дози іонізуючого випромінювання процеси відновлення активуються і можуть повністю “нейтралізувати” ушкодження. Саме тоді і буде спостерігатися “мертва зона” в залежності “доза – ефект”. Переважання процесів відновлення над ушкодженням приводить до ефекту гормезису. У подальшому, при підвищенні дози опромінення, відношення ушкодження/відновлення збільшується і ефект зростає лінійно або квадратично-лінійно від дози.

На основі таких тлумачень російські радіобіологи доводять нелінійність (*бімодальність*) залежності ефекту від дози випромінювання (рис. 3.3.1). Цей вигляд залежності ефекту від дози зумовлений зміною чутливості центральної нервової системи на подразнюючий вплив іонізуючого випромінювання: при малих дозах системи оновлення (або адаптації) організму або взагалі не працюють (через що відсутня адаптивна відповідь на ушкодження), або працюють не з повною інтенсивністю, тому біоефект збільшується з підвищенням дози. Потім, при повноцінному включенні адаптаційних реакцій, він або залишається постійним, або зменшується; і потім – знову наростає з підвищенням дози, коли ушкодження в біооб'єктах превалюють над оновленням. Тобто в діапазоні “малих доз” на величину ефектів має істотний вплив наявність чи відсутність адаптивної відповіді чи

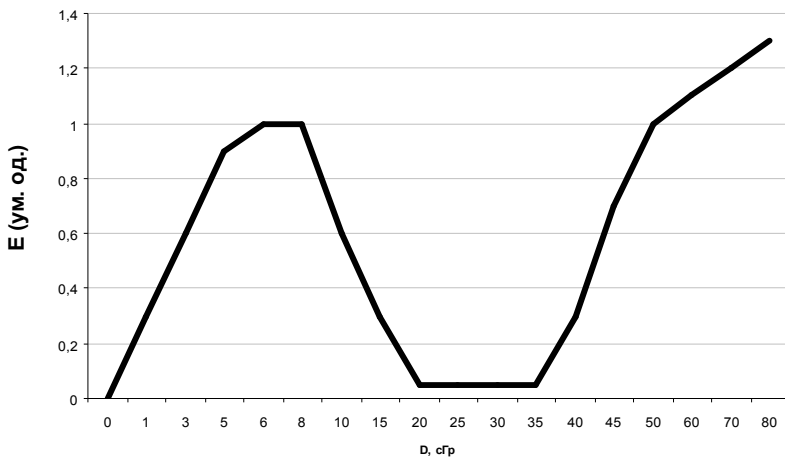


Рис. 3.3.1. Схематичне зображення залежності прояву біоефекту від дози іонізуючого випромінювання (за Е.Б.Бурлаковою)

то клітини, чи тканини, чи організму в цілому.

Таким чином, хоча на сьогоднішній час немає єдиної думки щодо моделі опису залежності “доза – ефект”, але остаточно зрозуміло, що негативний ефект впливу на людину малих доз іонізуючого випромінювання існує і навіть може бути рівнозначним ефекту від впливу більш високих рівнів опромінення. Зараз, в основному, вчені використовують лінійну і лінійно-квадратичну (особливо при розгляді малих доз) моделі опису залежності “доза – ефект”.

У діючих сьогодні нормативах радіаційної безпеки прийнята концепція відсутності границі для стохастичних ефектів опромінення і лінійної залежності між дозою та ефектом в області малих доз, а головними принципами радіаційної безпеки вважаються неперевищення встановленого основного дозового ліміту, виключення усякого необґрунтованого опромінення, зниження дози опромінення до можливо низького рівня.

Таким чином, питання опромінення населення малими дозами є сьогодні актуальним і вказує на необхідність зменшення хронічного опромінення людини малими дозами через будь-які існуючі шляхи опромінення, у тому числі, і за рахунок надходження радіонуклідів людині з продуктами харчування, які вироблені в умовах зрощування.

3.4. ПРОБЛЕМИ ОЦІНЮВАННЯ РОЗМІРУ ОПРОМІНЕННЯ НАСЕЛЕННЯ

Питання оцінювання розміру опромінення населення стало особливо актуальним завдяки переоцінці доз опромінення людей під час Чорнобильської катастрофи, а також оцінці сумарного впливу на організм природних і антропогенних джерел радіації та рівнів захворюваності населення.

Сьогодні, враховуючи сучасний стан навколишнього середовища з точки зору додаткового техногенного накопичення радіонуклідів, токсичних продуктів та важких металів, визнано, що на території України можна очікувати аномальної радіаційно-гігієнічної ситуації, яка може створювати в ряді районів екстремальні рівні забруднення сільськогосподарських продуктів, поверхневих та підземних вод, атмосфери, біологічних об’єктів та спричинити несприятливий вплив на здоров’я людини.

Завдяки вивченню радіаційної ситуації на забруднених в результа-

ті аварії на Чорнобильській АЕС територіях сьогодні чітко визнано, що основним фактором дозового навантаження є дози внутрішнього опромінення, а їх формування зумовлено надходженням радіонуклідів до організму людини за біологічним ланцюгом “грунт – рослина – тварина – продукти харчування – людина”. Так, опромінення населення, яке постраждало від аварії на Чорнобильській АЕС, складається, в основному, за рахунок ^{137}Cs , і динаміка його вмісту в сумарному раціоні харчування населення на забруднених територіях визначає динаміку доз опромінення. Однак, частка ^{90}Sr на одиницю надходження ^{137}Cs до організму зростає. Також зростає внесок ^{90}Sr у сумарну дозу внутрішнього опромінення. Таким чином, зміна в радіаційній ситуації навколишнього середовища визначає і зміни в розмірах дозового навантаження на населення.

Аналіз основних закономірностей формування доз внутрішнього опромінення населення після аварії на ЧАЕС свідчить, що з числа трьох основних можливих шляхів надходження радіонуклідів до організму (інгаляційний, аліментарний та через шкіру) при потраплянні з повітрям (інгаляційний) сумарний внесок становить 1-2%, а на частку внеску харчових продуктів (аліментарний) у дозу внутрішнього опромінення припадає близько 98-99%. При цьому основним компонентом раціону внутрішнього опромінення, що є відповідальним за утворення дозового навантаження на людину, виступає молоко (60-80%). На м'ясо припадає 5-10%, на овочі – 5-6%. Таким чином, при хронічному надходженні до організму людини штучних радіонуклідів, розповсюджених в компонентах агроценозів, харчовий ланцюжок опромінення людини є визначальним серед інших існуючих ланцюжків.

Однак, крім дії іонізуючого випромінювання штучного походження, населення зазнає дозу опромінення ще й джерелами іонізуючого випромінювання природного походження. На територіях України, які розташовані на кристалічному масиві з підвищеним вмістом природних радіонуклідів (*U*, *Ra*, *Th* та їх похідних), дози опромінення за рахунок цього фактора можуть бути суттєвими. Для дитячого і дорослого населення, що постраждало від аварії на Чорнобильській АЕС, найбільш значний внесок у формування сумарних колективних доз опромінення внесли неаварійні джерела іонізуючого випромінювання, їх питома вага становила у дітей 87%, у дорослих 84%.

На сьогодні в світовій практиці існують багато підходів до оцінки дози опромінення населення, але серед них виділяють два основних. Перший з них базується безпосередньо на даних радіаційно-гігієнічного моніторингу рівнів забруднення компонентів раціону. Другий принцип стосується екологічного моделювання і базується на оцінці швидкості надходження радіонуклідів до організму людини

через врахування міграції радіонуклідів із рослин за трофічними ланцюжками до людини.

При прогнозуванні дозового опромінення населення важливим є використання саме принципів екологічного моделювання, тобто врахування усіх природних причин забруднення продуктів харчування за рахунок надходження радіонуклідів у рослинну ланку та врахування при оцінках дозового навантаження існуючої широкої територіальної варіабельності рівнів забруднення окремих ланок трофічних шляхів людини. Так, через неоднорідний характер впливу природних чинників на процес забруднення трофічних ланцюжків, для оцінки дози від інкорпорованих ^{137}Cs та ^{90}Sr значимим фактором є природне розмаїття території.

ВИСНОВКИ

1. Процес взаємодії іонізуючого випромінювання з біологічними об'єктами представляє собою ланцюг послідовних фізичних і фізико-хімічних перебудов, які проявляються у вигляді збудження, первинної і вторинної іонізації молекул, що, в свою чергу, призводить до появи збуджених атомів і вільних радикалів, які реагують один з одним та інтактними біомолекулами та спричиняють або прискорюють розвиток патологічних змін в організмі.
2. До ефектів впливу малих доз іонізуючого випромінювання, в першу чергу, відносяться генетичні порушення, онкологічні захворювання крові, лейкози і злоякісні новоутворення.
3. Біологічна дія ^{90}Sr пов'язана з характером його розподілу в організмі: переважно він накопичується у скелеті і залежить від дози β -опромінення, яке створюється ним та його дочірнім радіоізотопом ^{90}Y . При тривалому надходженні ^{90}Sr в організм, навіть у невеликій кількості, в результаті безперервного опромінення кісткової тканини можуть розвиватися лейкемія і рак кісток.
4. ^{137}Cs переважно (50%) накопичується у м'язах. При хронічному надходженні до організму ^{137}Cs його уразливою дією, крім м'яких тканин, можуть бути охоплені нирки, кістковий мозок, статеві залози. Відбуваються порушення кровотворення, враження кишечника і різні пухлинні процеси м'яких тканин.
5. Біологічні ефекти ^3H на організм людини досить різноманітні. При великих дозах опромінення біологічні ефекти від ^3H полягають у морфологічних змінах і порушеннях функції ендокринних і

кровотворних органів, судинної системи, печінки, селезінки та інших органів, у тому числі яєчників. Основний біологічний ефект від 3H пов'язують з виникненням генетичних ефектів у нащадків у першому та наступних поколіннях (зниження загальної маси нащадків, зниження маси головного мозку, зниження в ньому білка та ДНК, збільшення частоти пухлин яєчників, гематом та інше). Хронічне опромінення 3H призводить до більш частіших випадків розвитку злоякісних новоутворень і значного скорочення латентного періоду їх виникнення [130]. У віддаленні строки після ураження наслідки опромінення 3H проявляються в пухлинах молочних залози, гіпофізі яєчників та щитовидної залози, лейкозах, причому вважається, що окис 3H має більш високу лейкомогенну активність, ніж протони, рентгенівські та гамма-випромінювання

6. Визнання наявності негативного ефекту впливу на людину малих доз іонізуючого випромінювання потребує зменшення хронічного опромінення людини малими дозами через будь-які існуючі шляхи опромінення, у тому числі і за рахунок надходження радіонуклідів людині з продуктами харчування, які вироблені в умовах зрошування.
7. При хронічному надходженні до організму людини штучних радіонуклідів, розповсюджених в компонентах агроценозів, харчовий ланцюжок опромінення людини є визначальним серед інших існуючих ланцюжків.
8. При прогнозуванні дозового опромінення населення важливим є використання принципів екологічного моделювання, тобто врахування усіх природних причин забруднення продуктів харчування за рахунок надходження радіонуклідів у рослинну ланку та врахування при оцінках дозового навантаження існуючої широкої територіальної варіабельності рівнів забруднення окремих ланок трофічних шляхів людини.