

ДО ПИТАННЯ БІОЛОГІЧНОЇ ДІЇ РАДІОАКТИВНИХ РЕЧОВИН, ЯК ТОКСИКАНТІВ

В.Ф. Торбін

Українська військово-медична академія

Резюме. Представлені матеріали з токсичності радіоактивних елементів, що надходять в організм, внаслідок радіаційних інцидентів.

Наводиться класифікація токсичних радіонуклідів за ступенем токсичності, аналізуються особливості їх токсичної дії на організм людини, шляхи поступлення та виведення.

Дається характеристика відмінностей клінічних проявів токсичної дії нуклідів при внутрішньому опромінуванні.

Ключові слова: ядерна енергетика, радіотоксичність, шляхи поступлення, шляхи виведення, особливість клініки токсичної дії нуклідів.

Вступ. Інтенсивний розвиток атомної енергетики у багатьох країнах світу в останні декілька десятиліть, наряду зі значними перевагами над традиційними джерелами електрики, створив реальну загрозу масштабного радіоактивного забруднення великих територій у випадку аварійних ситуацій на об'єктах ядерно-паливного циклу і перш за все – атомних електростанціях.

На сьогодні у світі працює 442 атомних реактора, будуються 24, 62 реактори знаходяться у стадії здобуття дозволів на будівництво, а ще 162 - в процесі розробки проектів. Ядерні реактори є генераторами величезної кількості штучних радіонуклідів. За час роботи ядерного реактора в ньому утворюється близько 700 різних радіонуклідів, що включають як легкі (криптон, ксенон, йод, цезій і телур), так і важкі радіоізотопи (молібден, цирконій, церій, плутоній і в значній мірі стронцій). Це означає, що наша біосфера постійно живиться і буде підживлюватися штучними радіонуклідами як за рахунок неконтрольованих витоків, так і за рахунок аварій на атомних станціях. Так при перегріванні палива і механічному руйнуванні активної зони реактора, що трапилось у Чорнобилі, токсичні радіонукліди у вигляді газоаерозольного компоненту та дрібнодисперсного пилу надходять у навколишнє середовище і можуть спричиняти, в залежності від обставин, ураження людей за рахунок іонізуючого випромінювання та прямого токсичного впливу радіоактивних речовин на організм.

Характерним є те, що вплив іонізуючого випромінювання досить широко відомий значному загалу науковців і практичних фахівців. Що стосується біологічної дії радіоактивних речовин як токсичних агентів, то цей напрямок впливу на організм радіоізотопів менше привертає уваги.

Мета дослідження. Розглянути основні напрямки токсичної дії радіоактивних речовин на організм людей.

Матеріали та методи дослідження. Основними джерелами інформації були матеріали наукових джерел (статті у наукових виданнях, монографії тощо - 11).

Результати дослідження та їх обговорення. Як встановлено при аналізі наукових джерел, негативний вплив при надходженні (інкорпорації) радіонуклідів до організму зумовлений з одного боку фізичними властивостями (вид та енергія випромінювання, період напіврозпаду), і з іншого – біологічними особливостями (величинами коефіцієнту резорбції, характером розподілу в організмі, біологічним періодом напіввиведення із організму).

При надходженні в організм радіонуклідів з однаковою активністю найбільшу небезпеку несуть ті, які мають альфа-розпад, більший період напіврозпаду, добре всмоктуються в кров, вибірково накопичуються в певних органах та з більшим періодом біологічного напіввиведення.

Токсична дія на організм має свої особливості :

1. На відміну від більшості хімічних речовин токсична дія радіонуклідів виявляється в незрівнянно малій їх ваговій кількості. Біологічно вагомі активності радіонуклідів, що надходять в організм, мають масу в межах 10^{-14} - 10^{-11} г/добу. Це в мільйони разів менше, ніж надходження в організм відповідних стабільних мікроелементів, кількості надходження яких вимірюються величинами порядку 10^{-4} - 10^{-2} г/добу.

2. Токсична дія самих радіонуклідів зумовлена не стільки хімічними, скільки фізичними властивостями (здатність до іонізуючого випромінювання при їх радіоактивному розпаді). Хімічні ж властивості радіонуклідів впливають на їх надходження, розподіл та виведення з організму.

3. Механізм токсичної дії радіонуклідів суттєво відрізняється від дії хімічних отрут (ОР та інші). Ця відмінність зумовлена дією іонізуючого випромінювання, джерелами якого є радіонукліди, що надійшли до організму.

Радіотоксичність характеризує ступінь тяжкості радіаційного ураження при надходженні радіонукліду до організму.

В медичній радіології та радіаційній гігієні за мінімально значимою активністю (МЗА) на робочому місці всі радіонукліди, як джерела внутрішнього опромінювання, прийнято ділити на чотири групи радіаційної токсичності (небезпечності) - А, Б, В, Г (табл. 1).

Основними чинниками, що зумовлюють ступінь радіотоксичності нукліду, є: тип та схема радіоактивного розпаду, період напіврозпаду, вид та енергія випромінювання, шлях та тривалість надходження до організму, характер розподілу та час перебування в організмі, шлях виведення з організму.

Органи, через які радіоактивні речовини надходять до організму, першими зазнають ушкоджуючої дії іонізуючого випромінювання.

Класифікація радіонуклідів, що входять до складу аварійних викидів ядерних реакторів, за ступенем радіаційної токсичності (небезпечності)

Індекс групи МЗА, Бк (мкКі)	Ступінь радіотоксичності	Радіонукліди
А	3,7103	Плутоній-239
	(0,1)	Плутоній-240 Плутоній-241 Америцій-241 Кюрий-242
Б	3,7104	Стронцій-90
	(1,0)	Рутеній-106 Йод-131 Церій-144
В	3,7105	Цирконій-95
	(10)	Цезій-134 Цезій-137
Г	3,7106	Водень-3 (тритій)
	(100)	Вуглець-14

Надходження радіоактивних речовин в організм можливе через органи дихання, шлунково-кишковий тракт, через неушкоджену шкіру та поверхню ран і опіків.

Надходження радіоактивних речовин через органи дихання найбільш небезпечно, що характерно для ранньої (гострої) фази радіаційно-ядерної аварії. Це пояснюється: по-перше, великою площею поверхні альвеол – 100 м², через яку йде безпосереднє всмоктування радіонуклідів в кров, а також великим об'ємом легеневої вентиляції (2,2106 л/рік); по-друге, досить високим значенням коефіцієнтів затримки радіоактивних речовин в бронхіальному дереві.

Надходження радіонуклідів через органи дихання має місце в період випадання радіоактивних опадів при формуванні сліду радіоактивної хмари, коли людина попадає в шлейф радіоактивної хмари, а також при сильному пилоутворенні на вже сформованому сліді.

Інгаляційно можуть надходити радіоактивні гази і випари, а також радіоактивні аерозолі. Гази і випари легко проникають в альвеоли, де в залежності від їх фізико-хімічних властивостей всмоктуються. Аерозолі, у залежності від розміру частинок, поділяються на дим, туман і пил.

Встановлено, що тільки дрібнодисперсна фракція аерозолів з діаметром частинок від 0,001 до 0,1 мкм (дим) доходить до альвеол, фракція аерозолів з діаметром частинок від 0,1 до 10 мкм (туман) затримуються в трахеї чи

бронхах, а великодисперсна фракція з діаметром частинок більше 10 мкм (пил) - в носоглотці.

Малорозчинні аерозолі, затримані в трахеобронхіальній ділянці, швидко виводяться під дією в'язкого епітелію і при ковтанні надходять у шлунково-кишковий тракт.

Надходження радіонуклідів через шлунково-кишковий тракт має найбільш важливе значення. Особливо в середню (стабілізаційну) та пізню фази аварії, так як на забруднених радіонуклідами територіях таке надходження носить тривалий характер і дози внутрішнього опромінення людей, як правило, стають більшими, ніж зовнішнього.

Для оцінки наслідків надходження радіоактивних речовин через шлунково-кишковий тракт велике значення має величина коефіцієнту резорбції, що характеризує частку радіоактивної речовини, яка переходить безпосередньо в кров. В залежності від природи ізотопу та хімічної форми сполуки, що потрапила в організм, коефіцієнт резорбції змінюється в широких межах – від 0,01% (цирконій, ніобій, рідкоземельні елементи, актиноїди) до кількох відсотків (вуглець – 1%, барій – 5%, полоній – 6%), десятків відсотків (залізо – 10%, кобальт, стронцій, радій – 30%) і 100% (водень, лужноземельні елементи, йод, цезій).

Резорбція через неушкоджену шкіру в 200-300 разів менша, ніж через шлунково-кишковий тракт і як правило не відіграє суттєвої ролі. Виключення становить тритій, що легко проникає в кров через шкіряні покриви.

Встановлено, що основними харчовими шляхами надходження радіонуклідів в організм людини є: рослина а людина; рослина а тварина а м'ясо а людина; рослина а тварина а молоко а людина; вода а гідробіонти а людина.

Забруднення харчової продукції сільського господарства може бути поверхневим та структурним.

Поверхнєве забруднення сільськогосподарських культур і тварин проходить, в основному, у весняно-літній період під час випадання радіоактивних опадів із хмари, а також при підйомі у повітрі радіоактивних речовин, що випали на ґрунт в процесі радіоактивного забруднення території аварійними викидами. При цьому нерозчинні продукти залишаються на поверхні рослин, а розчинні - в значній мірі поглинаються листям, плодами, стеблами.

Структурне забруднення сільськогосподарських культур проходить за рахунок усвоєння депонованих у ґрунті радіонуклідів через кореневу систему рослин. Засвоєння радіонуклідів із ґрунту рослинами залежить від біологічної доступності (розчинності) радіонуклідів, ґрунтово-кліматичних умов і фізіологічних особливостей рослин.

За ступенем переходу в рослини радіонукліди можна розподілити в такий ряд: стронцій-90 > йод-131 > барій-140 > цезій-137 > рутеній-106 > церій-144 > цинк-45 > ніобій-95. Високі коефіцієнти переходу характерні для піщаних та торф'яно - болотистих ґрунтів.

За ступенем концентрації радіонуклідів рослинні продукти розподіляються наступним рядом: боби > картопля > овес > квасоля > гречка > пшениця > просо > ячмінь. За таким же принципом тваринні продукти утворюють ряд: курятина > свинина > баранина > телятина. Із продуктів тваринного походження критичними за надходженням радіонуклідів в організм є молоко і м'ясо, а рослинного походження - картопля.

По суті радіоактивні ізотопи розподіляються в організмі так, як і стабільні ізотопи хімічних елементів. На цих властивостях ґрунтується ряд методів радіонуклідної діагностики. За характером розподілу радіонуклідів в організмі людини їх поділяють на дві групи:

- радіонукліди, що рівномірно, або відносно рівномірно розподілені по всьому тілі людини - тритій, натрій-24, рубідій-86, ніобій-95, цирконій-95, цезій-134, цезій-137 та ін.;

- радіонукліди, що вибірково або переважно накопичуються в окремих органах і тканинах (органотропні радіонукліди):

- в щитовидній залозі (тіреотропні радіонукліди) - радіоізотопи йоду, найбільш вагомий серед яких є йод-131;

- в скелеті (остеотропні радіонукліди) - фосфор-32, кальцій-45, стронцій-90, барій-140, плутоній-239 і ін.;

- в печінці (гепатотропні радіонукліди) - марганець-54, церій-139, неодім-147 і ін.;

- в нирках (ренотропні радіонукліди) - молібден-99, телур-121, телур-125м і ін.

За ступенем накопичення радіонуклідів основні органи і тканини розташовують наступним чином: щитовидна залоза > печінка > нирки > скелет > м'язи.

Слід відзначити, що радіонукліди, з досить короткими періодами напіврозпаду не встигають досягнути органу свого потенційного депонування. Швидко розпадаючись, вони реалізують дозу опромінення на шляху до нього тобто в органі первинного проникнення (легені чи шлунково-кишковий тракт) або в кровоносних чи лімфатичних судинах. Через це при надходженні радіонуклідів з різними періодами напіврозпаду розподіл і формування поглинутих доз в окремих органах (окрім скелету) іде неоднаково. Зокрема при надходженні короткоживучих радіонуклідів дози формуються швидко: на протязі першої доби на 30-50%, а до кінця тижня - повністю. В скелеті дози формуються повільніше.

Швидкість виведення радіонуклідів із організму людини залежить від багатьох чинників, серед яких найбільше значення мають: фізико-хімічний стан депонованих радіонуклідів; обмін речовин в органах і тканинах основного їхнього депонування; функціональний стан систем виділення.

Через легені і шкіру порівняно швидко виводяться такі газоподібні нукліди, як тритій, а також радіоізотопи інертних радіоактивних газів ксенону і криптону. Найбільша кількість радіонуклідів, що надходять в організм, особливо сполук, що важко розчиняються, виводяться через шлунково-кишковий тракт.

Сполуки тритію, натрію-24, йоду-131, цезію-137 і деяких інших радіонуклідів, що добре розчиняються, легко виводяться із організму через нирки, а також потові залози і з молоком. Вони добре виділяються і через слинні залози, а також через печінку (із жовчю), але надходять при цьому в шлунково-кишковий тракт. Ці ж радіонукліди, легко долаючи плацентарний бар'єр, надходять до організму плоду.

Таким чином, в результаті процесів обміну, радіонукліди, що надійшли в організм, поступово виводяться з нього.

Час, протягом якого з організму виводиться половина введеної кількості радіонуклідів, має назву біологічного періоду напіввиведення (T_d)

Поряд з виведенням зменшення активності радіонукліду в організмі людини іде за рахунок радіоактивного розпаду, швидкість якого залежить від періоду напіврозпаду (T_f).

Час, протягом якого активність радіонукліду в організмі зменшується наполовину, одержав назву ефективного періоду напіввиведення (T_e):

$$T_e = \frac{T_f * T_d}{T_f + T_d} ;$$

При виведенні короткоживучих радіонуклідів (наприклад, йоду-131) швидкість зниження активності органів і тканин T_e залежить від тривалості періоду напіврозпаду (T_f), а при виведенні довго живучих (наприклад, плутонію-239) - від біологічного періоду напіввиведення (T_d), (табл. 2).

За величиною поглинутої дози за рахунок внутрішнього опромінювання органи складають, як правило, такий ряд: щитовидна залоза > органи дихання > ШКТ > печінка > нирки > скелет > м'язи.

Із збільшенням віку радіонукліди змінюють характер опромінювання: зменшуються дози опромінення одних органів (наприклад, щитовидної залози) і збільшуються дози опромінення інших органів (наприклад, скелету).

Радіонукліди, що рівномірно розподіляються в організмі, складають відносно рівномірне променеве навантаження на все тіло. Через це гостра променева хвороба (ГПХ), в такому випадку, матиме клінічну картину, яка характерна для зовнішнього рівномірного опромінювання всього тіла.

Періоди напіврозпаду (Тф) та напіввиведення (Тd і Те) радіонуклідів із всього організму

Радіонуклід	Тф	Тd	Те
Стронцій-90	29 років	13000 діб	5850 діб
Йод-131	8 діб	138 діб	7,4 доби
Цезій-137	30 років	70 діб	69,5 діб
Плутоній-239	24000 років	65000 діб	654000 діб

В разі радіаційних катастроф виникнення навіть одиничних випадків гострої променевої хвороби виключно від внутрішнього опромінювання радіоізотопами мало ймовірно. Більш коректно говорити про випадки поєднаної дії зовнішнього та внутрішнього опромінювання з перевагою останнього. Хоча слід зауважити, що ГПХ від внутрішнього опромінювання все ж має свої особливості і характеризується меншою вираженістю первинної реакції, довшою тривалістю в часі і більш сильним ураженням критичних органів, в яких вибірково накопичуватимуться радіоактивні ізотопи, наявністю місцевих уражень в місцях їх резорбції до організму.

Надходження в організм радіонуклідів (в кількості, недостатній для виникнення гострих ефектів) може привести до виникнення різних соматичних ушкоджень і навіть хронічної променевої хвороби (ХПХ) (при тривалому надходженні) різного ступеня вираженості.

До ранніх і відносно неспецифічних проявів хронічного надходження радіонуклідів відносять астеновегетативні розлади, що проявляються загальною слабкістю, підвищеною стомлюваністю, запамороченнями, серцевими болями тощо.

До віддалених наслідків відносять: скорочення тривалості життя, розвиток новоутворень, а також розвиток деяких патологічних станів (склеротичні процеси, ураження ЦНС з вогнищевою дифузною гліальною реакцією тощо).

При інкорпорації радіонуклідів, які вибірково накопичуються в окремих органах і тканинах, має місце нерівномірне опромінювання організму. Поглинуті дози бета-випромінювання в окремих органах можуть відрізнятись в 100-1000 і більше разів.

Найбільш вивчена дія радіоактивного йоду, що накопичується в щитовидній залозі, опромінювання якої приводить до розвитку пухлинних процесів. Основними не пухлинними наслідками опромінювання є радіаційний тиреоїдит та гіпотиреоїдизм.

Висновки

1. Особливості у токсичній дії радіонуклідів, на відміну від інших хімічних елементів, обумовлені їх фізичними властивостями (здатність до іонізуючого випромінювання).

2. Ступінь радіотоксичності нуклідів визначається типом та схемою радіоактивного розпаду, періодом напіврозпаду, видом та енергією випромінювання, шляхом та тривалістю надходження до організму, характером розподілу та часом перебування в організмі, шляхом виведення з організму.

3. Надходження радіоактивних речовин через органи дихання найбільш небезпечно, що характерно для ранньої (гострої) фази радіаційно-ядерної аварії, коли переважає зовнішнє опромінювання. В середню (стабілізаційну) та пізню фази аварії, коли на забруднених радіонуклідами територіях дози внутрішнього опромінювання людей, як правило, стають більшими, ніж зовнішнього, найбільш важливе значення має надходження радіонуклідів через шлунково-кишковий тракт. Резорбція через неушкоджену шкіру не відіграє суттєвої ролі.

4. Швидкість виведення радіонуклідів із організму людини залежить, як і інших хімічних елементів, перш за все від їх фізико-хімічних властивостей. Через легені і шкіру порівняно швидко виводяться газоподібні нукліди, а також радіоізотопи інертних радіоактивних газів. Радіонукліди, що важко розчиняються, виводяться через шлунково-кишковий тракт. Радіонукліди, що добре розчиняються, легко виводяться із організму через нирки, а також потові залози і з молоком. Вони добре виділяються і через слинні залози, а також через печінку (із жовчю), але надходять при цьому в шлунково-кишковий тракт. Ці ж радіонукліди, легко долаючи плацентарний бар'єр, надходять до організму плоду.

5. ГПХ, як наслідок токсичної дії радіоізоотопів при внутрішньому їх надходженні, має свої особливості і характеризується меншою вираженістю первинної реакції, довшою тривалістю в часі і більш сильним ураженням критичних органів, в яких вибірково накопичуватимуться радіоактивні ізотопи, наявністю місцевих уражень в місцях їх резорбції до організму.

Надходження в організм радіонуклідів (в кількості, недостатній для виникнення гострих ефектів) може привести до виникнення різних соматичних ушкоджень і навіть хронічної променевої хвороби (при тривалому надходженні) різного ступеня вираженості.

Література

1. Закутінський Д. І., Питання токсикології радіоактивних речовин / Д.І. Закутінський. - М., 1959. – 278 с.

2. Балабуха В.С., Фрадкін Г.Е. Накопление радиоактивных элементов в организме и их выведение / В.С. Балабуха, Г.Е. Фрадкин. - М., Энергоатомиздат, 1958. – 158 с.

3. Баженов В.А., Булдаков Л.А., Василенко И.И. и др. Вредные химические вещества. Радиоактивные вещества: Справочник / [В.А. Баженов, Л.А. Булдаков, И.И. Василенко и др.]; Под ред. Л.А. Ильина и В.А. Филова. - Л.: Химия, 1990. 464 с.

4. Журавлев В.Ф. Токсикология радиоактивных веществ / В.Ф. Журавлев. - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 336 с.

5. Василенко И.Я. Токсикология продуктов ядерного деления / И.Я. Василенко. - М.: Энергоатомиздат, 1999. - 210 с.

6. Скалецкий Ю.М., Барасій М.І., Худецький І.Ю., Торбін В.Ф. та ін. Медичні аспекти ядерних аварій / Ю.М. Скалецкий, М.І. Барасій, І.Ю. Худецький, В.Ф. Торбін та ін.: Навчальний посібник для слухачів УВМА та студентів вищих медичних навчальних закладів. - К.: УВМА, 2000. - 55 с.

7. Курляндский Б.А., Филлов В.А. (ред.) Общая токсикология / Под ред. Б.А. Курляндского, В.А. Филова. - М.: Медицина, 2002. - 608 с.

8. Військова токсикологія, радіологія та медичний захист: Підручник / За ред. Ю.М. Скалецького, І.Р. Мисули. - Тернопіль: Укрмедкнига, 2003. - 360 с.

9. Куценко С.А. Военная токсикология, радиобиология и медицинская защита / С.А. Куценко. - С.-П., 2004. - 437 с.

10. Тарасов А.В., Смирнова Т.В. Основы токсикологи / А.В. Тарасов, Т.В. Смирнова. - М.: Маршрут, 2006. - 160 с.

11. Незнамова Е.Г. Экологическая токсикология / Е.Г. Незнамова. Томск, 2007. - 133 с.