

В. А. Курочкіна*, Т. В. Циганок

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна**Відповідальний автор: knitel@ukr.net**ОСОБЛИВОСТІ ВНУТРІШНЬОГО ОПРОМІНЕННЯ ЛЮДИНИ
ТА ПРОБЛЕМИ ЙОГО ДОЗИМЕТРІЇ.
І. ХАРАКТЕРИСТИКА ІНКОРПОРОВАНИХ РАДІОНУКЛІДІВ
ТА ЇХНЯ ДОЗИМЕТРІЯ**

Наведено дані літератури щодо особливостей внутрішнього опромінення людини. Проаналізовано рекомендовані МКРЗ біокінетичні моделі, створені в Україні еколого-дозиметричні моделі та деякі методи дозиметрії внутрішнього опромінення. Частина I огляду містить дані щодо аспектів фізичної дозиметрії. У частині II буде описано та обговорено проблеми та методи біологічної дозиметрії.

Ключові слова: інкорпоровані радіонукліди, внутрішнє опромінення, дозиметрія внутрішнього опромінення, біокінетична модель, еколого-дозиметрична модель.

1. Вступ

Норми радіаційної безпеки України визначають внутрішнє опромінення, як вплив на людину іонізуючого випромінювання від джерел, що перебувають всередині організму [1]. Оцінка його дози має важливе значення щодо відповідності нормам радіаційної безпеки та визначення наслідків для здоров'я персоналу об'єктів ядерно-промислового комплексу, населення радіаційно забруднених внаслідок аварій територій та пацієнтів, які отримують лікування із введенням радіофармацевтичних препаратів (РФП).

Згідно з міжнародно прийнятими нормами в радіаційному захисті [2], внутрішнє опромінення класифікують за трьома основними напрямками: професійне, опромінення населення радіаційно забруднених територій та медичне. Основними способами надходження радіонуклідів до організму в цих випадках є: інгаляційний, оральний, через шкіру та парентеральний. Після потрапляння до організму людини радіонукліди, залежно від тропності, можуть осідати в легенях, шлунково-кишковому тракті, переходити в кров і переміщатися в інші органи і тканини. Виводяться радіонукліди з організму, в основному, через нирки і кишковик, а деякі, зокрема радіойод, і через пори шкіри.

Метою даного огляду є аналіз літературних даних стосовно внутрішнього опромінення α - та β -випромінювачами, їхньої біологічної поведінки та аналіз сучасних методів і програм для оцінки доз, отриманих внаслідок інкорпорації.

**2. Основні типи класифікації
інкорпорованих радіонуклідів**

Інкорпоровані радіонукліди за типом випромінювання, в основному, належать до двох категорій – α - та β -випромінювачів, які у свою чергу можна поділити на «чисті» та «змішані». «Чисті» випромінювачі, тобто радіонукліди, що мають один тип випромінювання та стабільний ізотоп, як продукт розпаду, зустрічаються вкрай рідко (^{90}Sr , ^{90}Y , ^{125}I , ^3H тощо). Переважний тип випромінювання інкорпорованих радіонуклідів – змішаний і його вплив розраховується на основі енергії, яку вносять дочірні продукти впродовж усього ланцюга розпаду, інтегрованого за передбачуваний період впливу – 50 років після початку опромінення для дорослих та 70 років для дітей [3, 4].

Загальні радіобіологічні наслідки впливу «змішаних» випромінювачів є результатом спільного впливу їхнього власного випромінювання та дочірніх продуктів розпаду (^{10}C , ^{11}C , ^{24}Na , ^{47}Ca , ^{238}U тощо). Однак, у деяких випадках, з точки зору енергетичного внеску в радіобіологічний ефект, може домінувати один тип випромінювання. Так, за інкорпорації ^{137}Cs , ^{131}I , домінуючим є β -випромінювання і їхній радіобіологічний ефект можна вважати спричиненим лише β -частинками.

З позиції тривалості пошкоджуючого впливу інкорпоровані радіонукліди можна умовно поділити на три загальні класи:

перший клас – радіонукліди з коротким фізичним періодом напіврозпаду. Вони спричиняють

короткочасне радіаційне опромінення. До цього класу належать більшість медичних ізотопів (^{99m}Tc , ^{22}Na , ^{24}Na , ^{32}P , ^{51}Cr , ^{198}Au тощо), а також багато нуклідів, що утворюються після аварій на ядерних об'єктах (^{131}I , ^{134}Cs , ^{132}Te , ^{140}Ba , ^{99}Mo , ^{239}Np тощо) [5];

другий клас – радіонукліди з досить довгим фізичним періодом напіврозпаду, але коротким часом утримання в організмі. Прикладами є ^{137}Cs та ^3H . ^{137}Cs має 30-річний фізичний період напіврозпаду, але його біологічний період напіввиведення з організму становить, в середньому, 110 діб. Фізичний період напіврозпаду ^3H – 12,5 р., а біологічний період напіввиведення з організму 10 діб [5];

третій клас – найбільш небезпечний з радіобіологічної точки зору. Радіонукліди мають довготривалий фізичний період напіврозпаду та утримуються в організмі довгий час (^{238}U , ^{237}Np , ^{244}Pu , ^{243}Am тощо). Це зумовлено їхньою хімічною природою, способом потрапляння до організму або специфічною мішенню, до якої вони виявляють тропність. Так, розчинні форми ^{90}Sr і ^{226}Ra депонуються переважно в кістках. Вони зберігаються в кістковому матриксі протягом тривалого періоду часу і призводять до хронічного впливу на кістковий мозок. Трансуранові радіонукліди за інгаляційного надходження накопичуються в легенях з подальшим повільним переміщенням у печінку і кістки.

При потрапленні в організм радіонукліди виявляють різну тропність [6], а саме до:

кісток (^{32}P , ^{45}Ca , ^{90}Sr , ^{140}Ba , ^{239}Pu , ^{226}Ra);

ретикулоендотеліальної системи (Pr , Zn , ^{241}Am , а також колоїдні форми деяких нуклідів, наприклад, колоїдний ^{198}Au);

нирок (^{99}Mo , ^{121}Te , ^{125}Te);

печінки ($^{27,28}\text{Mg}$, ^{147}Nd);

щитоподібної залози (^{125}I , ^{131}I);

дифузно розподіляються у паренхіматозних органах і м'язах (^3H , ^{134}Cs , ^{137}Cs).

Крім способів потрапляння до організму, період напіввиведення певних радіонуклідів також залежить від їхнього агрегатного стану. Так, ^{137}Cs в організмі знаходиться, зазвичай, у розчиненому стані, але якщо він потрапив інгаляційним шляхом у вигляді твердої частинки, тоді він може тривалий час утримуватися в легенях, призводячи до нерівномірного локального опромінення (відомі випадки утримання ^{137}Cs у легеневих альвеолах до 1600 діб) [7].

3. Моніторингові програми та моделі для дозиметрії внутрішнього опромінення

3.1. Програми моніторингу радіоактивності та розрахунку доз внутрішнього опромінення людини

Дозиметрія внутрішнього опромінення людини є складною, багатоетапною та включає багато

факторів впливу. Одним із ускладнюючих факторів є те, що внутрішнє опромінення тіла, зазвичай, відбувається дуже нерівномірно і це пов'язано з місцем депонування радіонукліда. Винятком є рівномірне внутрішнє опромінення у разі надходження до організму радіоцезію, тритію, а також радіойоду у людей з видаленою щитоподібною залозою. Тому, наразі немає жодної фізичної методики для прямого вимірювання дози, отриманої особою від інкорпорованих радіонуклідів. Натомість, дозу пропонують оцінювати або на основі даних про включену в тіло радіоактивність на момент спостереження, або на основі результатів програм моніторингу, що оцінюють активність, яка утримується в тілі (Бк) або ту, що виводиться з нього (Бк/доба).

У багатьох локальних аварійних ситуаціях опромінення зумовлене одним радіонуклідом або обмеженою їх кількістю. У таких випадках, має бути зрозуміло який метод визначення або ж яку програму моніторингу радіоактивності найкраще застосувати. Міжнародний стандарт ISO 20553 [8] надає вказівки щодо використання програм моніторингу та їхнього модифікування відносно кожної конкретної ситуації. Зокрема, запропоновано максимальні періоди моніторингу для різних радіонуклідів, індивідуальний моніторинг працівників, а також рекомендовані методи для спеціальних програм моніторингу після вдихання. Так, зокрема, індивідуальний моніторинг надає інформацію, необхідну для оцінки опромінення окремого працівника на основі вимірювання радіоактивності в організмі, швидкості виділення (екскреції) або вдихуваної радіоактивності (за допомогою персональних пробовідбірок повітря). Колективний моніторинг, своєю чергою, дає змогу оцінити опромінення групи працівників за однакових умов праці, а також врахувати всі чинники, що впливають на остаточні дози опромінення. Відповідно до стандарту ISO 20553, індивідуальний моніторинг рекомендується запроваджувати на робочому місці, якщо очікувана річна ефективна доза перевищує 1 мЗв.

Як уже зазначалося вище, дози, отримані від інкорпорованих радіонуклідів, неможливо виміряти напряму, а лише оцінити на основі даних моніторингу вимірювань радіоактивності всього тіла, сечі або фекалій. Такі оцінки вимагають застосування біокінетичних та дозиметричних моделей, і припущення щодо таких факторів, як характер надходження та властивості радіонукліда. Порівняльні дослідження показали широкий діапазон доз, які можна отримати з одного й того ж набору даних, а отже підтвердили потребу в розробці рекомендацій щодо уніфікації оцінки доз як внутрішніми службами дозиметричного

контролю, так і іншими спеціалістами [9]. Міжнародний стандарт ISO 27048 [10] розроблено для мінімізації похибок в оцінці дози внутрішнього опромінення працівників. Він встановлює мінімальні вимоги до оцінки даних моніторингу та визначає стандартні процедури для їхньої інтерпретації з метою досягнення прийнятного рівня надійності відповідно до зазначених норм. Водночас, інтерпретація цих даних, у більшості випадків, потребує відповідних програмних засобів. Тому, в рамках проекту «IDEAS for the

Estimation of Committed Doses from Incorporation Monitoring Data» міжнародної дозиметричної мережі EURADOS, було спеціально розроблено програмне забезпечення, яке при розрахунках дози внутрішнього опромінення людини включає покроковий моніторинг біозразків, різні сценарії надходження радіонуклідів, облік часу після опромінення [11 - 13]. Разом з тим існують й інші програми для визначення доз внутрішнього опромінення людини, основні з яких наведено в таблиці.

Основні програми для розрахунку доз внутрішнього опромінення людини

Назва програми	Опис	Офіційні джерела доступу до програм
IMBA (Integrated Modules for Bioassay Analysis)	Програма для оцінки внутрішнього опромінення за результатами біодозиметрії, спектрометрії, аналізу сечі тощо	UKHSA (UK Health Security Agency) – офіційний сайт (Radiation Protection Services); продаж для Європи через UKHSA – ukhsa-protectionservices.org.uk , для інших регіонів – через програму RAMP (NRC, США) – ukhsa-protectionservices.org.uk
DCAL (Dose and Risk Calculation)	Бібліотека/пакет від ORNL (Oak Ridge National Lab, США), створена для реалізації МКРЗ моделей	Сайт EPA (США, розділ «Radiation Protection») – безкоштовне завантаження системи DCAL – epa.gov
AIDE (Activity and Intake Dose Estimator)	Програма DOE/EPA для внутрішньої дозиметрії в аварійних ситуаціях	Розроблено L. Bertelli (LANL, США) – iaea.org ; офіційного сайту для завантаження немає (lbartelli@lanl.gov)
INDOS	Система для визначення доз, що використовувалася в багатьох країнах, зокрема в СРСР та Україні після аварії на ЧАЕС	Розроблено К.В. Skrable (США) – ornl.gov ; офіційного сайту для завантаження немає
MONDAL3	Програма для моделювання доз за інгаляційного та ін'єкційного потрапляння до організму	QST/NIRS (Японія, Національний інститут радіології) – звернення за e-mail: mondal@qst.go.jp ; (оновлення через запит) qst.go.jp

Вимірювання наявної в тілі радіоактивності відбувається за допомогою високочутливих зовнішніх детекторів випромінювання, розміщених в екранованому середовищі з низьким радіаційним фоном. Крім вимірювання активності всього тіла, розроблено методи моніторингу для локалізованого визначення радіоактивності: у щитоподібній залозі (для радіоіотопів йоду), легенях (у разі вдихання нерозчинних аерозолів), черепі та коліні (для оцінки вмісту радіонуклідів у кістковій тканині), а також у печінці (для виявлення актиноїдів) [14].

Визначення радіоактивності, що виводиться з тіла, проводять вимірюванням екскретів (сеча, фекалії). Це, зазвичай, використовується для радіонуклідів, що випромінюють лише фотони низької енергії, α - та β -частинки. Для специфічного обстеження, при підозрі на інгаляційне опромінення трансурановими радіонуклідами, можна використовувати мазки з носа. За особливих обставин, також можна вимірювати радіо-

активність крові, волосся, зубів. Аналіз γ -випромінюючих радіонуклідів (^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{60}Co тощо у зразках біопроб можна проводити прямим вимірюванням за допомогою сцинтиляційних або напівпровідникових детекторів. Проте, аналіз α - і β -випромінюючих радіонуклідів потребує більш складних методів вимірювання [15].

Труднощі розрахунку поглиненої дози внутрішнього опромінення (навіть у контрольованих умовах), можна проілюструвати на прикладі оцінки дози отриманої від ^3H , як найбільш вивченого, з радіобіологічної точки зору, радіоіотопу. Відомо, що незалежно від способу надходження, тритій швидко засвоюється (приблизно за 1 год) і рівномірно розподіляється в організмі. 97 % інкорпорованого тритію знаходиться у формі води з біологічним періодом напіввиведення 10 діб, решта – 3 % у формі органовмісних сполук (ОВС) з біологічним періодом напіввиведення 40 діб. Тому, для визначення загальної поглиненої дози необхідно вирахувати окремо

концентрацію тритію у формі води та у формі ОВС і за допомогою ефективного коефіцієнта дози перерахувати у загальну ефективну дозу. Крім того, для коректного розрахунку необхідно враховувати такі фактори, як швидкість переміщення тритію в організмі, кількість його ядерних перетворень, загальний об'єм води в тілі людини (у референтної людини масою 70 кг він становить близько 42 л), а також надходження та виведення рідини протягом доби (еталонна людина втрачає приблизно 2,9 л рідини на добу). Слід також зважати на низку інших аспектів [16], зокрема: способи та тривалість надходження радіонукліда, оцінку тривалості його впливу, фізико-хімічні характеристики радіоактивної речовини (розмір частинок, агрегатний стан, розчинність), поглинання в шлунково-кишковому тракті, метаболічну поведінку в організмі та шляхи його виведення. Ці дані враховуються в біокінетичних моделях, а оцінка дози з їх використанням здійснюється на основі математичних розрахунків [17].

3.2. Біокінетичні моделі

Уперше, загальну біокінетичну модель для розрахунку ефективної дози, описану у формі компартментної моделі, було продемонстровано у 1979 р. в публікації МКРЗ № 30. Вона складалася з таких блоків: дозиметрична модель для дихальної системи, дозиметрична модель для травного тракту, дозиметрична модель для кісток [12]. У подальшому, біокінетичні моделі неодноразово вдосконалювали і оновлювали. Нещодавно оновлені моделі респіраторного і травного трактів людини були представлені у публікаціях МКРЗ № 66 та № 100 [18, 19].

Запропоновані МКРЗ біокінетичні моделі є узагальнюючими, довідниковими моделями для вирішення задач радіаційного захисту людини. Ці моделі не можуть бути застосовані для визначення поглиненої дози, спричиненої застосуванням РФП. Особливість та складність дозиметрії РФП полягає в тому, що це хімічні сполуки, що складаються з радіонукліда, зв'язаного зі специфічним вектором, який регулює поведінку останнього в організмі (потрапляння та утримання в органі/тканині-мішені, перерозподіл РФП та його метаболітів в організмі, всмоктування в кишкового сполук, що вводяться перорально, та їхнього остаточного розподілу в кожній тканині тощо). Наразі, існує понад сто найбільш уживаних РФП, де радіонуклід може бути у формі іонів, органічних молекул або бути присутнім у вигляді мічених клітинних препаратів [20]. Для більшості з цих сполук біокінетичні дані, отримані на людях, є обмеженими [21]. Ще однією складністю цих

моделей є те, що РФП вводяться пацієнтам, які можуть значно відрізнятися від референтної особи, визначеної МКРЗ, за віком, статтю, розміром та метаболічними функціями.

Перенесення енергії випромінювання в організмі залежить, в основному, від анатомії особи, яка зазнала опромінення, та фізичних характеристик інкорпорованого радіонукліда. На даний час для проведення розрахунків методом Монте-Карло перенесення γ - і β -енергетичного випромінювання, використовують воксельні фантоми – анатомічні моделі, створені на основі даних зображення комп'ютерної та магнітно-резонансної томографії або інших медичних зображень людського тіла, що забезпечують більш реалістичне уявлення про анатомію конкретної людини. Для фотонів розглядали енергії від 10 кеВ до 10 МеВ, а для електронів – від 15 кеВ до 10 МеВ. Для кожного діапазону енергії було відстежено 5 млн треків частинок в організмі з використанням транспортного коду Монте-Карло EGSnrc [22]. Ці особливості необхідно враховувати при створенні індивідуальних моделей і для цього потрібні значні зусилля [23]. Насамперед, важливо чітко визначити чутливі до радіації мішені, щоб якомога точніше розрахувати енергію, що виділяється в них під час розпаду радіонукліда. З цією метою, МКРЗ було запропоновано кілька підходів до розрахунку доз, задіяних РФП: для цілих органів, за умови рівномірного розподілу радіонуклідів у чутливих клітинах; для конкретних клітин-мішеней у випадку гетерогенних тканин (легені, травний тракт, сечовий міхур та скелет); а у випадку специфічного внутрішньоклітинного розподілу радіонукліда розрахувати дозу, яку конкретно отримує ДНК. Цього можна досягти за допомогою комп'ютерних кодів, таких як GEANT4, удосконалення яких постійно відбувається [24]. Однак, доза, отримана ДНК, не завжди проявляється на вищому клітинному рівні організації завдяки механізмам репарації. Клітинні ефекти можуть прямо не корелювати з тканинними через процеси мітозу, амітозу, апоптозу, некрозу, що сприяють елімінації індукованих опроміненням пошкоджень. Тому, розрахунок дози на молекулярному рівні не може точно визначити ефекти на рівні органів, не кажучи вже про весь організм.

Таким чином, на сьогодні доступні біокінетичні моделі, що у найбільш поширених випадках дають змогу оцінити дози після безпосереднього надходження радіонукліда (за аварійної ситуації чи з медичною метою), а також в експериментальних дослідженнях *in vivo* та *in vitro*. Проте

слід зазначити, що наявні моделі мають низку недоліків. Зокрема: вони переважно ґрунтуються на даних, отриманих під час опитування постраждалих, які не завжди є достатньо повними та достовірними; бракує інформації про поведінку в організмі деяких радіоактивних елементів, зокрема більшості лантаноїдів; не враховується індивідуальна мінливість суб'єктів радіаційного впливу в межах популяції; залишається невизначеним питання допустимості екстраполяції на людину біокінетичних експериментальних даних, отриманих для інших видів ссавців, з огляду на відмінності в метаболізмі [25 - 28].

3.3. Еколого-дозиметрична модель

Після аварії на ЧАЕС в Україні почали активно розроблятися еколого-дозиметричні моделі для визначення/реконструкції доз як зовнішнього, так і внутрішнього опромінення на основі реальних даних про забруднення довкілля, з урахуванням харчових ланцюгів, віку, раціону та біологічних параметрів людини (для 1986 р. доза вираховувалася від усіх основних радіонуклідів радіоактивного аварійного викиду, а після 1987 р. – лише від радіоізоотопів цезію (^{134}Cs та ^{137}Cs)) [29]. Дана методика базується на результатах радіоекологічного (ґрунт, продукти харчування) та дозиметричного (на лічильнику випромінювання людини) моніторингу. Це компартментна модель, що включає декілька взаємопов'язаних рівнів. Для кожного рівня створено окрему, еколого-дозиметричну модель для оцінки дози у певній ситуації опромінення з набором параметрів, що враховують особливості опромінення. Кожний наступний рівень моделі базується на попередньому і враховує додаткові параметри, завдяки чому модель наступного рівня є точнішою. Всього є 4 рівні.

Базовий рівень – реконструюється річна доза опромінення на одиницю щільності випадіння радіоізоотопів на ґрунті для випадкової дорослої людини, що мешкає протягом 1 року в одному й тому ж населеному пункті.

Рівень населеного пункту – враховує його радіологічні характеристики і параметри опромінення випадкового жителя за 1 рік.

Рівень «особливостей поведінки» – пов'язаний з віком особи та умовами проживання на радіоактивно забрудненій території.

Рівень відтворення динаміки опромінення у часі – оцінюється доза опромінення за певний період часу.

На кожному такому рівні оцінюються ефективні дози зовнішнього та внутрішнього опромінення та їхня сумарна доза [30, 31]. Проте, незважаючи на великий масив застосовуваних

даних для кожного рівня моделі, а також уточнюючих компонент, дана модель, хоча і вважається придатною для персоналізованої оцінки дози внутрішнього опромінення, все ж таки дає усереднений показник поглиненої дози і більше підходить для застосування в санітарно-епідеміологічних дослідженнях (моделі були застосовані для оцінки ризику раку щитоподібної залози, лейкозів тощо).

4. Метод електронно-парамагнітного резонансу

Ще одним способом оцінки дози внутрішнього опромінення людини є кількісне визначення стабільних радикалів в емалі зуба методом електронно-парамагнітного резонансу (ЕПР) [32]. Радіонукліди, які мають тропність до кісток, можуть надходити безпосередньо в емаль зуба або в дентин (в основному в процесі кристалізації гідроксиапатиту), а також у кістки щелеп. В останньому випадку вони будуть впливати на зубну емаль як зовнішні джерела опромінення. Для аналізу достатньо провести біопсію зубної емалі здорового (без карієсу) зуба, що займає 5-те або 6-те положення в зубному ряді. Нижня межа чутливості методу ЕПР становить 0,1 - 0,2 Гр, а тривалість визначення дози становить від кількох хвилин до декількох годин [33, 34]. ЕПР-дозиметрія визначає кумулятивну дозу опромінення емалі зуба впродовж усього життя, спричинену і внутрішнім і зовнішнім опроміненням від навколишнього середовища, медичних процедур, професійної діяльності. Цей метод вимагає тривалої ретельної підготовки та максимального дотримання методики на етапах відбору, обробки, зберігання і підготовки зразків до вимірювання. Неправильні механічна, термічна, хімічна обробки та надлишок води під час зберігання зуба можуть генерувати нові радикали, які є перешкодами для сигналів ЕПР. Відсутність інформації про вік донора зуба (фонові інтегрована доза може становити від 20 до 150 мГр) та тривалість опромінення впливає на інтерпретацію сигналу ЕПР.

5. Висновки

Підсумовуючи вище викладене, можна констатувати, що дозиметрія внутрішнього опромінення (фізичними методами) значною мірою розроблена, постійно розвивається та вдосконалюється. Розробляються нові методики з використанням надчутливих детекторів; вдосконалюються біокінетичні, еколого-дозиметричні моделі, створюються програмні забезпечення для оцінки дози на основі даних, отриманих від

вимірювання концентрації радіонуклідів у біологічних зразках. Проте існує чимало прогалин і невизначеностей у знаннях щодо характеру впливу багатьох радіоізотопів. Це стосується, зокрема, розрахунку ефективної дози для РФП, який мав би враховувати похибки, пов'язані з вектором переносу. Еколого-дозиметричні моделі

також оперують наближеними усередненими значеннями дози внутрішнього опромінення. Усі відомі на сьогодні моделі та програмні засоби потребують коригування та подальшого вдосконалення у зв'язку з надходженням нових наукових даних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. НРБУ-97/Д-2000. Норми радіаційної безпеки України. Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення. Державні гігієнічні нормативи (ДГН 6.6.1. - 6.5.061-2000). / NRBU-97/D-2000. Norms of Radiation Safety of Ukraine. Radiation Protection from Sources of Potential Exposure. State Hygienic Norms (SHN 6.6.1. - 6.5.061-2000). (Ukr)
2. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2007) (2-4) 35 p.
3. Some internally deposited radionuclides. International Agency for Research on Cancer (IARC) – Summaries & Evaluations.
4. F. Paquet. Internal dosimetry: State of the art and research needed. J. Radiat. Prot. Res. 47(4) (2022) 181.
5. *Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies* (Vienna, IAEA, 2011) 229 p.
6. К.І. Богуцька, Ю.І. Прилуцький, Ю.П. Складаров. *Вибрані лекції з курсу «Радіаційна біофізика»*. Навч.-метод. розроб. (Київ: Поліграфічна дільниця Інституту металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, 2012) 88 с. / K.I. Bogutska, Yu.I. Prylutsky, Yu.P. Sklyarov. *Selected Lectures on the Course "Radiation Biophysics"* (Kyiv: G.V. Kurdyumov Institute of Metal Physics of NASU, 2012) 88 p.
7. M.A. Bender et al. Current status of cytogenetic procedures to detect and quantify previous exposures to radiation. Mutat. Res. 196(2) (1988) 103.
8. ISO 20553:2006(E). Radiation protection – Monitoring of workers occupationally exposed to a risk of internal contamination with radioactive material (Geneva, International Organization for Standardization, 2006) 12 p.
9. H. Doerfel et al. Third European intercomparison exercise on internal dose assessment. Results of a research programme in the framework of the EULEP/EURADOS action group "Derivation of parameter values for application to the new respiratory tract for occupational exposure" 1997 - 1999 (FZKA-6457) (Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2000) 214 p.
10. ISO 27048:2011(E). Radiation protection – Dose assessment for monitoring of workers for internal radiation exposure (Geneva, International Organization for Standardization, 2011) 76 p.
11. C.M. Castellani et al. IDEAS Guidelines (Version 2) for the Estimation of Committed Doses from Incorporation Monitoring Data. EURADOS Report 2013-01 (Braunschweig, 2013) 214 p.
12. B. Breustedt, A. Giussani, D. Noßke. Internal dose assessments – concepts, models and uncertainties. Radiat. Meas. 115 (2018) 49.
13. G. Etherington et al. Technical recommendations for monitoring individuals for occupational intakes of radionuclides. Radiat. Prot. Dosim. 170(1-4) (2016) 8.
14. A. Giussani et al. Eurados review of retrospective dosimetry techniques for internal exposures to ionizing radiation and their applications. Radiat. Environ. Biophys. 59 (2020) 357.
15. W. Sudprasert, O.V. Belyakov, S. Tashiro. Biological and internal dosimetry for radiation medicine: current status and future perspectives. J. Radiat. Res. 63(2) (2022) 247.
16. F. Chen et al. Analysis of tritium activity concentrations in urine and internal dose assessment for nuclear power plant workers. Radiat. Med. Prot. 2(1) (2021) 1.
17. H. Doerfel et al. RC-6. Internal Dosimetry: The science and art of internal dose assessment. In: *Proceedings of the 12th International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA-12)*, Buenos Aires, Argentina, 19 - 24 October 2008, 63 p.
18. *Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection*. ICRP Publication 66. Ann. ICRP 24(1-3) (1994) 482 p.
19. *Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection*. ICRP Publication 100. Ann. ICRP 36(1-2) (2006) 327 p.
20. *Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals*. Addendum 3 to ICRP Publication 53. Ann. ICRP 18(1-4) (1988) 37 p.
21. S. Mattsson et al. *Radiation Dose to Patients from Radiopharmaceuticals: A Compendium of Current Information Related to Frequently Used Substances*. ICRP Publication 128. Ann. ICRP 44(2S) (2015) 321 p.
22. W.B. Li. Internal dosimetry. A Review of progress. Jpn. J. Health Phys. 53(2) (2018) 72.
23. C. Lee. A review of organ dose calculation methods and tools for patients undergoing diagnostic nuclear medicine procedures. J. Radiat. Prot. Res. 49(1) (2024) 1.
24. S. Incerti et al. Review of Geant4-DNA applications for micro and nanoscale simulations. Phys. Med. 32(10) (2016) 1187.
25. F. Paquet et al. Assessment and interpretation of internal doses: uncertainty and variability. Ann. ICRP 45 (2016) 202.

26. J.D. Harrison et al. Reliability of the ICRP's dose coefficients for members of the public, II. Uncertainties in the absorption of ingested radionuclides and the effect on dose estimates. *Radiat. Prot. Dosim.* 95(4) (2001) 295.
27. R.W. Leggett. Reliability of the ICRP's dose coefficients for members of the public. 1. Sources of uncertainty in the biokinetic models. *Radiat. Prot. Dosim.* 95(3) (2001) 199.
28. R.W. Leggett, A. Bouville, K.F. Eckerman. Reliability of the ICRP's systemic biokinetic models. *Radiat. Prot. Dosim.* 79(1-4) (1998) 335.
29. Радіаційно-протекційний інститут (РПІ) Національної академії технологічних наук України. Оцінка доз та ризику для здоров'я внаслідок радіаційного опромінення. / Radiation Protection Institute (RPI) of the National Academy of Technological Sciences of Ukraine. Dose and health risk assessment due to the effects of radiation exposure.
30. И.А. Лихтарев, и др. Реконструкция индивидуализированных доз внутреннего облучения субъектов государственного регистра Украины: Сообщение 2. Локально-специфические модели и дозы облучения жителей Козелецкого и Репкинского районов Черниговской области. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології* 19 (2014) 102. / I.A. Likhtarov et al. Individualized internal exposure doses reconstruction for the persons of Ukraine State Register: Report 2. Locally-specific models and doses of persons living in Kozelets and Ripky raions of Chernihiv oblast. *Probl. Radiat. Med. Radiobiol.* 19 (2014) 102. (Rus)
31. О.М. Іванова, Л.М. Ковган, С.В. Масюк. Методика реконструкції індивідуалізованих доз опромінення осіб, що мешкають на радіоактивно забруднених територіях України. *Проблеми радіаційної медицини та радіобіології* 23 (2018) 164. / O.M. Ivanova, L.M. Kovgan, S.V. Masiuk. Methodology of reconstruction of individualized exposure doses for persons residing at radioactively contaminated territories of Ukraine. *Probl. Radiat. Med. Radiobiol.* 23 (2018) 164. (Ukr)
32. IAEA-TECDOC-1331. Use of the electron paramagnetic resonance dosimetry with tooth enamel for retrospective dose assessment (Vienna, IAEA, 2002) 64 p.
33. A. Wieser et al. Assessment of performance parameters for EPR dosimetry with tooth enamel. *Radiat. Meas.* 43 (2008) 731.
34. P. Fattibene, F. Callens. EPR dosimetry with tooth enamel: A review. *Appl. Radiat. Isot.* 68 (2010) 2033.

V. A. Kurochkina*, T. V. Tsyganok

Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: knitel@ukr.net

FEATURES OF INTERNAL HUMAN IRRADIATION AND PROBLEMS OF ITS DOSIMETRY. I. CHARACTERIZATION OF INCORPORATED RADIONUCLIDES AND THEIR DOSIMETRY

The literature data on the features of internal human exposure are presented. The following are analyzed: biokinetic models recommended by the ICRP; ecological-dosimetric model created in Ukraine and some methods of internal exposure dosimetry. Part I of the review contains data on aspects of physical dosimetry. Part II will describe and discuss the problems and methods of biological dosimetry.

Keywords: incorporated radionuclides, internal exposure, internal exposure dosimetry, biokinetic model, ecological dosimetric model.

Надійшла / Received 13.05.2025