1.3. Сучасні підходи до обмеження хронічного опромінення людини і прогнозування його рівнів

1.3.1. Основні біологічні ефекти хронічного опромінення людини малими рівнями іонізуючого випромінювання

Прояви хронічного опромінення людини достатньо різноманітні. Для доз порядку декількох зівертів – це хронічна променева хвороба, ураження шкіри, кісткового мозку та інші хвороби. У віддаленому періоді можуть виникати стохастичні ефекти: соматичні злоякісні пухлини і спадкові генетичні порушення. Ефекти обох типів виникають у результаті мутацій та інших порушень у клітинних структурах, які відповідають за спадковість.

Відповідно до сучасних поглядів, вихід генетичних і соматико-стохастичних ефектів у діапазоні доз, які реально зустрічаються у повсякденному житті, мало залежить від потужності дози. Тобто ефект визначається, перш за все, сумарною накопиченою дозою, незалежно від того, за який час вона отримана: за добу, місяць, рік чи 50 років.

З точки зору організації радіаційного захисту людини, найбільший інтерес мають дані про біологічні ефекти випромінювання в межах доз, які не перевищують десятих долів зіверту, тобто є близькими до доз від природного радіаційного фону чи доз, що не перевищують декількох сантизівертів на рік при багаторічному опроміненні.

Сьогодні можна сказати, що тривале опромінення людини в дозах декількох мілізівертів на рік у населення в цілому не викликає ніяких соматичних змін. Однак стосовно генетичних і соматико-стохастичних ефектів «малих» і «зверхмалих» доз немає прямих доказів їхньому існуванню, але це не служить доказом їхньої відсутності, бо встановити наявність таких біологічних ефектів дуже важко внаслідок малої, на фоні природно спонтанної, ймовірності їхніх проявів.

Однак при цьому сьогодні відомі дані виникнення певних змін і порушень в організмі людей, які відчули на собі вплив іонізуючого випромінювання у малих дозах та ще й у комбінації з токсичними речовинами: наприклад, «синдром Персидського заливу» пояснюється комбінованим ефектом впливу уранових доз, альфа-випромінювання і окислювачів ракетного палива [205].

Причину виникнення біологічних негараздів у відповідь на дію іонізуючого випромінювання у малих дозах сьогодні пояснюють відсутністю адаптивної відповіді клітини на подразнюючий вплив випромінювання, тобто клітина не розпізнає загрози від малих доз радіації і взагалі не включає механізми захисту [25]. Як свідчать результати досліджень російських учених, вплив малих доз радіації і токсичних речовин здійснює не менш руйнуючий вплив на організм людини і тварин, хоча шляхи впливу є іншими [25].

Крім цього, результати досліджень впливу іонізуючої радіації на рослини, тварини і людину, які отримано після аварії на ЧАЕС, виявили багато феноменів. Так, не завжди люди, які мешкали в забрудненій місцевості, підлягали змінам на рівні генетичних клітин, але з'ясовано, що змінам підлягала здатність адаптації людини до змін оточуючого середовища: вона є або зниженою, або відсутня, або спостерігався протилежний ефект: підвищена чутливість до впливу «незвичних» агентів – вторинного випромінювання, антибіотиків, лікарських препаратів. Людина може стати непрацездатною щодо певних видів робіт та існувати у тих умовах, котрі до опромінення були для неї звичними – через зверхчутливість до деяких речовин, яка виникла внаслідок опромінення. Вважається, що це дуже небезпечний феномен, який може виникнути при опроміненні у малих дозах і який свідчить про небайдужість організму до дії малих доз [205].

Є дані про негативний вплив малих доз іонізуючої радіації на протидифтерійний, протистовбнячний, протикоровий і протикоклюшний імунітет у дітей, які мешкають на забруднених радіонуклідами територіях [199]. Існують результати досліджень, які вказують на дозозалежні ефекти в імунній системі навіть через

15 років після опромінення, а границя дії іонізуючої радіації на імунну систему за більшістю вивчених параметрів складає 250 мЗв [15; 16; 304]. Вважається, що підвищенню ймовірності виникнення лейкозів сприяє саме пригноблення імунної системи через спільну дію токсикантів і малих доз іонізуючого випромінювання [205].

Сьогодні є доведеним той факт, що високий рівень впливу хронічно діючих на людину фізичних і хімічних факторів довкілля, в першу чергу іонізуючого випромінювання, послаблюють загальну резистентність організму і через зміну його адаптаційних можливостей робить його більш підданим впливу токсичних речовин, достатньо розповсюджених у довкіллі. Іонізуюче випромінювання може виступати не як ініціатор канцерогенезу, а як його прискорювач: якщо перший етап канцерогенезу індукований хімічно, то радіація може відігравати роль «останньої краплини» [120]. Сьогодні вважається, що тривале опромінення людини у дозах декількох мілізівертів на рік у населення в цілому не викликає ніяких соматичних змін. Однак щодо генетичних і соматико-стохастичних ефектів «малих» і «зверхмалих» доз, хоча і немає прямих доказів їхньому існуванню, але їх не заперечують, бо встановити наявність таких біологічних ефектів дуже важко внаслідок малої, на фоні природно спонтанної, ймовірності їхніх проявів. Таким чином, не виникає ніякого сумніву у необхідності дослідження величин дозового навантаження на людину та населення від розповсюджених сьогодні у довкіллі радіонуклідів природного і штучного походження.

При цьому важливим є те, що в результаті неминучого опромінення через природний радіаційний фон жодна людина за своє життя не може отримати 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 від природних джерел радіації, чи від певного штучного джерела: важливою величиною є сумарна доза [110; 237]. Тому, з точки зору організації радіаційного захисту людини, найбільшої уваги заслуговують дози, які не перевищують десятих долей зіверту, тобто є близькими до доз від природного радіаційного фону, чи дози, що не перевищують декількох сЗв на рік при багаторічному опроміненні.

Саме завдяки цьому факту сьогодні у нормуванні радіаційного фактору використовується концепція безпорогової лінійної залежності «доза – ефект», яка прийнята МКРЗ і Науковим Комітетом з дії атомної радіації при ООН. Ця концепція використовується при оцінці і прогнозуванні втрат від використання джерел іонізуючого випромінювання і для проведення практичних розробок у галузі радіаційного захисту і радіаційної безпеки.

1.3.2. Методичні підходи і норми регламентації дії іонізуючого випромінювання на людину

Радіаційна безпека людини забезпечується системою законодавчих актів (правил), спрямованою на обмеження опромінення людини і населення в цілому від різних джерел іонізуючого випромінювання. На основі переосмислення і перевірки доз, які населення отримало під час аварії на ЧАЕС, та інших техногенних радіаційних явищ, актуальним і досить важливим є доповнення принципів радіаційної безпеки в Україні, оскільки радіоактивне забруднення екосистем є найбільшим серед антропогенних впливів у державі [117] і стосується життя і здоров'я десятків мільйонів людей.

Оцінка стохастичних ефектів, головним чином канцерогенних, у даний час базується на лінійній безпороговій концепції «доза – ефект». Вважають, що іонізуюче випромінювання, незалежно від дози і потужності дози, є абсолютно шкідливим чинником. Опромінення в будь-якій дозі, відмінній від нуля, пов'язане з ризиком

можливої канцерогенної дії, що виявляється у віддалені терміни після опромінення. Тягар стохастичних ефектів, таким чином, не залежить від дози. Вірогідність їх виникнення підвищується з дозою, починаючи з нуля, досягаючи 100 % із зростанням дози, а потім зменшується унаслідок загибелі все більшого числа трансформованих клітин від опромінення. Цієї концепції дотримуються МКРЗ, НКДАР при ООН і Національна КРЗ України.

Визнання МКРЗ та іншими міжнародними організаціями цієї концепції в якості основи для регламентації опромінення людини надало, разом зі встановленням дозових лімітів, стимул у напрямку максимального зниження додаткових навантажень на людину.

У Рекомендаціях МКРЗ, присвячених регламентації дозових навантажень [226], визначені основні принципи:

1) ніякий вид використання іонізуючого випромінювання не повинен вводитися у практику, якщо він не дає реальної користі;
2) усі дози опромінення повинні підтримуватися на таких низьких рівнях, які тільки можливо досягнути з урахуванням економічних і соціальних факторів (принцип ALARA);
3) еквівалентна доза опромінення окремих осіб не повинна перевищувати ліміт, рекомендований Комісією для відповідних умов.

Таким чином, основні принципи регламентації опромінення людини передбачають, що профілактика нестохастичних ефектів забезпечується регламентацією достатньо низького ліміту річної еквівалентної дози. При цьому передбачається, що ліміт дози, перевищення якого може викликати відповідні ефекти, не буде досягнутий протягом усього терміну трудової діяльності і після опромінення протягом усього життя.

Достатнього рівня безпеки досягають за допомогою відповідних нормативно-правових, організаційних та технічних заходів. Основним документом, що регламентує роботу з ДІВ, є Норми радіаційної безпеки України [167], які охоплюють систему принципів, критеріїв, нормативів і правил, виконання яких є обов'язковою нормою в політиці держави щодо забезпечення протирадіаційного захисту людини та радіаційної безпеки. Ці норми розроблені згідно з основними положеннями Конституції та законів України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення», «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку», «Про поводження з радіоактивними відходами». НРБУ-97 встановлює два принципово відмінні підходи до забезпечення протирадіаційного захисту:

- при всіх видах практичної діяльності[*] в умовах нормальної експлуатації індустріальних та медичних джерел іонізуючого випромінювання;
- при втручанні[**], що пов'язане з опромінюванням населення в умовах аварійного опромінення, а також при хронічному опромінюванні за рахунок техногенно-підсилених джерел природного походження.

---

[*] *Практична діяльність* – діяльність людини, що пов'язана з використанням джерел іонізуючого випромінювання та спрямована на досягнення матеріальної чи іншої користі, яка призводить чи може призвести до контрольованого та передбачуваного наперед: деякого збільшення дози опромінення; та/або створення додаткових шляхів опромінення; та/або збільшення кількості людей, які зазнають опромінення; та/або зміни структури шляхів опромінення від усіх, пов'язаних з цією діяльністю джерел. При цьому може збільшуватися доза, імовірність опромінення, або кількість людей, які опромінюються. *До практичної діяльності відносяться*: виробництво джерел випромінювання; використання джерел випромінювання і радіоактивних речовин в медицині, дослідженнях, промисловості, сільському господарстві, освіті тощо; виробництво ядерної енергії, включаючи всі елементи паливно-енергетичного циклу; зберігання та транспортування джерел іонізуючого випромінювання; поводження з радіоактивними відходами [168].

[**] *Втручання* – такий вид людської діяльності, що завжди спрямований на зниження та відвернення неконтрольованого та непередбачуваного опромінення або імовірності опромінення в ситуаціях:

- аварійного опромінення (гострого, короткочасного або хронічного);
- хронічного опромінення від техногенно-підсилених джерел природного походження;
- інших ситуаціях тимчасового опромінення, визначених регулюючим органом як таких, що вимагають втручання [168].

Радіаційна безпека та протирадіаційний захист у практичній діяльності виходять з таких основних принципів:

- будь-яка практична діяльність, що супроводжується опроміненням людей, не повинна здійснюватися, якщо вона не приносить більшої користі опроміненим особам або суспільству в цілому порівняно зі шкодою, яку вона завдає (принцип виправданості);
- рівні опромінення від усіх значимих видів практичної діяльності не повинні перевищувати встановлені ліміти доз (принцип неперевищення);
- рівні індивідуальних доз та/або кількість опромінюваних осіб по відношенню до кожного джерела випромінювання повинні бути настільки низькими, наскільки це може бути досягнуто з урахуванням економічних та соціальних факторів (*принцип оптимізації*).

Ліміти доз встановлені на рівнях, що виключають можливість виникнення детерміністичних ефектів опромінення і водночас гарантують таку низьку ймовірність виникнення стохастичних ефектів опромінення, що вона прийнятна як для окремих осіб, так і для суспільства загалом.

Таким чином, встановлення конкретних регламентованих величин, прийнятих в НРБУ-97, виходило із необхідності дотримання сформульованих МКРЗ принципів, відповідно до яких уся система обмежень у сфері захисту людини від дії іонізуючого випромінювання не приводила до прояву шкідливих стохастичних ефектів серед будь-яких контингентів опромінених осіб та їхніх нащадків.

Встановлені відповідно до цих принципів ліміти доз в Україні відображено у Нормах радіаційної безпеки України НРБУ-97/Д-2000 [167], згідно яких ці ліміти розроблено на рівнях, що виключають можливість виникнення детерміністичних ефектів опромінення і водночас гарантують таку низьку ймовірність виникнення стохастичних ефектів опромінення, яка прийнятна як для окремих осіб, так і для суспільства загалом. Для оцінки величини опромінення людини у НРБУ-97/Д-2000 використовується концепція ефективної дози, зокрема річної ефективної дози (РЕД) як суми ефективної дози зовнішнього опромінення протягом року та очікуваної ефективної дози внутрішнього опромінення, яка сформована надходженням радіонуклідів до людини протягом одного року.

Концепція ефективної еквівалентної дози, як узагальненої інтегральної характеристики ефекту опромінення, є у діючий час загальноприйнятою для міжнародних організацій МКРЗ, МАГАТЕ, НКДАР ООН і відповідних країн Європи, США, Японії. Вважається, що вона найкращим чином пристосована для задач прийняття рішень і планування заходів, бо дозволяє єдиним чином охарактеризувати радіаційні ефекти від опромінення різних типів, яке діє на різні органи. Потрібно зазначити, що у [313] рекомендовано використовувати більше коротку назву «ефективна доза», тому нами у роботі також використовується це поняття у такому визначенні.

Однак і сучасна система нормування техногенного радіоактивного забруднення довкілля хоч і постійно поліпшується, та все ж, як виявляється, потребує вдосконалення [117]. Це виражається у недостатньому врахуванні існуючих параметрів впливу техногенних радіонуклідів на екосистеми та екологічного ефекту різноманітних взаємодій радіації з іншими промисловими полютантами.

Недосконаліть уявлень про безпечний рівень опромінення показує швидке його зниження стосовно максимальної еквівалентної дози для спеціального персоналу, який працює з радіоактивними речовинами [137]: 1925 р. – 1560 мЗв·рік$^{-1}$; 1934 р. – 300 мЗв·рік$^{-1}$; 1954 р. – 150 мЗв·рік$^{-1}$; 1958 р. – 50 мЗв·рік$^{-1}$; 1990 р. – 20 мЗв·рік$^{-1}$. Отже, від початку впровадження нормування радіаційного навантаження доза зменшилася у 78 разів. У цей час упродовж XX ст. безпечний рівень опромінення населення зменшився у тисячі разів. При цьому за цей період з'явилися нові ДІВ, які завдають хронічного опромінення людини.

На основі порад провідних фахівців-радіоекологів [82; 135; 290; 291; 292; 293; 294; 295] сьогодні виявлено низку недоопрацювань стосовно чинних норм радіаційного захисту, в першу чергу, нормування техногенної радіації. Так вважається, що сучасні норми радіаційного захисту потребують урахування значної різниці між гострим, фракціонованим та хронічним опроміненням [117]. Наважливішу роль в удосконаленні системи нормування та радіаційного захисту довкілля повинно відіграти врахування зміни радіочутливості – як групової, так і індивідуальної. Проблема полягає в тому, що всі розрахунки радіаційних норм розроблені для умовно «стандартної людини» – чоловіка білої раси віком 20 років із добрим станом здоров'я. Зрозуміло, що такої «стандартної людини», як і «ідеального газу» у фізиці, в природі не існує.

Навіть у середині будь-якої групи, однорідної етнічно, за віком, статтю та фізіологією, в певний момент часу завжди існують варіації між двома особинами за радіочутливістю, що зумовлює їхні індивідуальні зміни радіочутливості. Тому стверджується, що єдині для всіх людей норми радіаційної безпеки є непридатними через підвищення ризику ураження значної частини населення. Придатним для використання треба вважати нормування, яке враховуватиме необхідність захисту не «для середньої людини», а для найчутливіших груп населення: вагітних жінок, дітей, пенсіонерів, хворих тощо [117].

Результати багаторічних радіоекологічних досліджень підтверджують, що навіть незначна додаткова доза до природного опромінення може мати негативний вплив на довкілля. Зауважимо, що у сучасному радіаційному нормуванні прийнята безпорогова концепція, яка не бере до уваги нелінійний вплив малих доз. Відомо, що нижнього порогу дії радіації не існує, але суспільством прийняті певні межі безпеки. В одних екосистемах для одних груп населення цей поріг один, в інших екосистемах і для інших груп – зовсім інакший.

Для населення України межа небезпечної дози з 1952 року змінилася від 15 мЗв·рік$^{-1}$ до 1 мЗв·рік$^{-1}$. Сьогодні більшість фахівців-радіобіологів наголошують на подальшому зменшенні цієї дози до 0,25 мЗв·рік$^{-1}$. Однак матеріали радіоекологічних досліджень [291; 292; 293; 294] показують, що діапазон безпечних рівнів перебуває в межах від 0,02 до 0,002 мЗв·рік$^{-1}$. Це підтверджує необхідність дозиметричних досліджень сучасних факторів опромінення людини на півдні України з метою визначення, оцінки і прогнозування інтегральної дози, яку отримує людина від різних чинників опромінення протягом свого життя.

Прийняття МКРЗ безпорогової моделі ефектів радіації відновило інтерес до обчислення колективної дози. До недавнього часу це поняття застосовувалося в основному при детальному зіставленні професійних доз або доз, отриманих малими популяціями, що живуть поблизу ядерних установок. Концепція колективної дози ґрунтується на двох доповідях, опублікованих в середині 80-х рр. Унаслідок того факту, що захист від радіації в основному ведеться у напрямі захисту населення як єдиного цілого, обидві доповіді містили рекомендації за підрахунком поряд з індивідуальним збитком і потенційного колективного. МКРЗ також схвалила використання колективної дози: «Слід враховувати радіаційний збиток» і «Ефективна колективна доза є адекватним представником колективного збитку». МКРЗ переконана в тому, що колективна доза має бути як можна нижчою, що відповідає вимогам більшості європейських країн.

Крім цього, сьогодні в практиці радіаційного захисту прийнято положення про те, що будь-які норми для людини одночасно гарантують і їхню надійність для окремих біоценозів і біосфери в цілому. Сучасний етап наших знань про біологічну дію іонізуючого випромінювання на окремі компоненти біоценозів задовольняється цим положенням. Разом з цим потрібно накопичувати експериментальний і натурний матеріал радіоекологічних досліджень для отримання достатнього об'єму даних з цієї проблеми, бо сьогодні достатньо відомо випадків, коли дози опромінення біооб'єкта перевищують дози, які отримує людина.

1.3.3. Принципи прогнозування рівнів дози опромінення людини від природних і штучних джерел іонізуючого випромінювання

Сьогодні при прогнозуванні дозового навантаження на окрему людину чи на населення у цілому найчастіше використовують метод концептуальних* (камерних) моделей переносу радіонуклідів у довкіллі з подальшим моделюванням формування дози опромінення людини. Головна мета побудови таких моделей – розробка апарату відображення (інтерпретації) рівнів радіаційного забруднення у дозовий статус людини (дорослих і дітей).

У цьому випадку просторова неоднорідність реальних процесів у довкіллі моделюється за допомогою окремих ділянок (камер, компартаментів), причому на кожній ділянці (у камері) характеристики середовища і процесів, які відбуваються у цьому середовищі, як правило, усереднюються, тобто основні характеристики вважаються рівномірно розподіленими у просторі в межах ділянки (камери).

Як відомо [145], концептуальна камерна модель формування дози опромінення людини від наземних джерел випромінювання, що поєднує екологічні особливості міграції радіонуклідів (не враховуючи міграцію у водному середовищі) між компонентами біосфери з дозиметричними характеристиками опромінення людини, має вигляд, зображений на рис. 1.3.3.1 – це шестикамерна модель між джерелом випромінювання і людиною.

Головна складність при такому моделюванні полягає у визначенні параметрів цих моделей – параметрів переносу радіонуклідів між камерами (k_{ij}). Для таких моделей ці параметри, зазвичай, визначаються із застосуванням апарату теорії звичайних диференціальних рівнянь, алгебраїчних рівнянь та інших математичних методів. Зокрема, моделювання перехідних процесів переносу радіонуклідів в екологічних і трофічних ланцюгах при радіаційних аваріях через розв'язок системи диференційних рівнянь рекомендується МКРЗ [29], НКДАР ООН [114], МАГАТЕ і використовується у рекомендаціях Комісії з ядерного регулювання США [339], Комісаріата з атомної енергії Франції та ін. Це дозволяє, при відомих об'ємах надходження у довкілля радіонуклідного забруднення (камера «Джерело», рис. 1.3.3.1), визначати дозу опромінення людини від розповсюджених у довкіллі аварійних радіонуклідів. При цьому ця доза завжди є функцією часу, бо надходження в об'єкти довкілля викинутої радіоактивності завжди залежить від часу T з моменту надходження у довкілля.

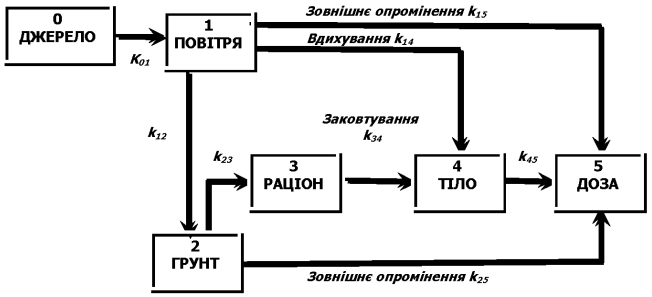

Рис. 1.3.3.1. Модель формування дози опромінення людини від наземних джерел випромінювання [313; 314]

Для математичного опису динаміки (зміни у часі) j-ого показника в i-тій камері використовується апарат теорії звичайних диференціальних рівнянь, алгебраїчні рівняння та інші математичні методи. Існує чимало математичних моделей, які

* *Концептуальна модель* – це систематизований і строго обґрунтований варіант опису реальної системи чи об'єкта (явища, процесу). Основне призначення цієї моделі – вираз чіткої концепції, підходу, обґрунтування й узагальнення всіх знань, уявлень і даних натурних спостережень про реальну систему, яка вивчається і для якої планується побудувати математичну модель [30; 145].

відображують формування дози опромінення при радіаційних аваріях на ядерних підприємствах.

В основі цих моделей лежать динамічні процеси радіонуклідного забруднення і самоочищення ґрунту, рослинності, харчових продуктів. Це моделі Публікації № 29 МКРЗ; моделі Гусєва та Бєляєва [93], моделі ECOSYS (H. Müller and G. Pröhl) [328], PATHWAY (Whicker F.W., Kirchner T.B.) [321], моделі Публікації № 129 НКРЗ США [306; 339] та ін., які відтворювали той чи інший окремий сценарій аварійного забруднення.

Георгієвським В.Б. [30] встановлені моделі оцінки екологічної і дозової ситуації при аваріях на об'єктах атомно-енергетичного циклу, головним чином, АЕС. За допомогою цих моделей можна оцінити динаміку забруднення екологічних і харчових ланцюгів кожним з «аварійних» радіонуклідів, визначити закономірності формування дози в аварійному і післяаварійному періодах, а також оцінити ситуацію при гіпотетичних аваріях. Це дає можливість швидкого аналізу радіоекологічної ситуації в аварійних умовах та прискорювання процесу прийняття управлінських рішень.

Існують еколого-дозиметричні моделі (ЕДМ) для глобальної радіаційної аварії [123; 124] – комплекс з шести чорнобиль-орієнтованих еколого-дозиметричних моделей: дві ЕДМ з комплексу відтворюють просторово-часову еволюцію доз зовнішнього опромінення на ранній та пізній фазах аварії, а три інших – загального та локального внутрішнього опромінювання від споживання радіоактивно-забруднених продуктів харчування на ранній (1986 р.) та пізній фазах.

Усі ці моделі дають можливість оцінити радіоекологічну ситуацію на місцевості у випадку аварійної ситуації на ядерному підприємстві та у післяаварійний період. Але, як нами показано у попередніх розділах, людина протягом усього свого життя піддається опроміненню внаслідок природного і техногенно-підсиленого фону від природних джерел радіації, радіоактивних речовин «станційного» походження, які постійно надходять у навколишнє середовище навіть при безаварійній роботі АЕС. Тому розробка дозиметричних моделей від наявних у регіоні чинників опромінення (ТПДПП; наслідки для регіону «аварійно-чорнобильського» викиду радіонуклідів; джерела випромінювання, пов'язані зі скидом і викидом радіонуклідів АЕС) сприятиме оцінці та прогнозуванню рівнів хронічного опромінення людини та інтегральної дози, яку отримує людина протягом життя, а також визначенню заходів щодо її зменшення.

Саме задля можливості оперативного прогнозування радіаційної і дозової ситуації від комплексу природних і техногенних чинників опромінення людини на півдні України нами застосовано цей підхід нормалізованих доз. Як і в наведених моделях, нормалізацію виконували за радіаційними характеристиками камери, яка стоїть на початку дозоформуючого ланцюга. Такий метод моделювання формування радіаційного навантаження на людину неодноразово був використаний при дозиметричній оцінці наслідків аварії на ЧАЕС [30, 123, 124]: у [30] застосовано поняття «дозової ціни одиничного забруднення елементів екосистеми внаслідок аварії на ЧАЕС»; у [123, 124] просто використовувалося поняття нормалізованої ефективної дози. Тому для реалізації можливості прогнозування дозової ситуації у формі, максимально адаптованій до її сприйняття, нами, аналогічно до використаного у [30] поняття «дозової ціни аварійного забруднення елементів екосистеми», застосовано поняття «дозової ціни чинника опромінення людини природного чи штучного походження».

Потрібно також зазначити, що при моделюванні і прогнозуванні радіаційної ситуації значна увага приділяється питанню оцінки якості та надійності. Моделі переносу радіонуклідів є багатокомпонентними, що не забезпечує отримання чітких результатів: параметри переносу радіонуклідів k_{ij} у реальних умовах визначаються з великою похибкою, а результати прогнозування залежить від невизначеності як багатьох параметрів переносу, так і умов радіонуклідних випадінь, скидів, міграції та ін. Для оцінки надійності прогнозів за дозиметричними моделями, зазвичай, застосовують статистичну методологію, на основі якої на заміну детермінованих величин змодельованої дози отримують їх стохастичні аналоги.