

В. А. Курочкіна*

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: knitel@ukr.net

РАДІОІЗОТОПИ ЦЕЗІЮ І ДОСВІД ЦИТОГЕНЕТИЧНОЇ ДОЗИМЕТРІЇ
ЗА АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ

Представлено аналіз даних літератури та власних експериментальних досліджень стосовно радіаційних аварій з ^{137}Cs , шляхів його надходження та поведінки в організмі людини, застосування цитогенетичних показників у дозиметрії, досвіду оцінки дози потерпілих за умов зовнішнього опромінення та проблем цитогенетичної дозиметрії внутрішнього опромінення.

Ключові слова: радіоізотопи цезію, ^{137}Cs , радіаційні аварії, зовнішнє опромінення, внутрішнє опромінення, цитогенетична дозиметрія.

1. Випадки радіаційних інцидентів
з радіоізотопами цезію

Радіоактивні ізотопи цезію є антропогенними ізотопами, що у величезних кількостях надходили в навколишнє середовище під час випробувань ядерної зброї (в атмосфері та під землею), радіаційних аварій на атомних електростанціях та на підприємствах, що використовували або виробляли радіоцезій.

Інтенсивні випробування ядерної зброї в атмосфері у 1950-х - 1960-х рр. створили передумови для формування фонових рівнів забруднення ізотопом ^{137}Cs . За оцінками Наукового комітету Організації Об'єднаних Націй з дії атомної радіації (НКДАР ООН) в середині 1960-х рр. світовий фоновий рівень у північній півкулі становив близько 4000 Бк/м^2 тоді як мінімальний рівень у південній півкулі був приблизно декілька сотень Бк/м^2 [1]. На додачу до фонових рівнів, що сформувалися у 1960-х рр., до забруднення території долучилися викиди радіоцезію, що відбулися під час випробувань ядерної зброї у 1980 р. Загальна кількість ^{137}Cs , викинутого внаслідок випробування ядерної зброї у 1980 р., оцінювалася у $9,6 \cdot 10^{17} \text{ Бк}$ [2].

Після викиду в атмосферу, радіоактивні ізотопи цезію у вигляді аерозолів переміщалися на тисячі кілометрів перш ніж у вигляді опадів (дощу, снігу) або пилу досягали поверхні, забруднюючи території, що знаходяться на великій відстані від місця радіаційної події.

Радіоцезій здатний накопичуватися в ґрунті, воді і, як наслідок, у рослинах і організмах тварин та людини.

Внаслідок аварії на 4-му енергоблоці Чорнобильської АЕС у 1986 р. сумарна активність радіоізоотопів, викинутих у навколишнє середовище, за різними оцінками становила до

$14 \cdot 10^{18} \text{ Бк}$, включаючи $85 \cdot 10^{15} \text{ Бк}$ ^{137}Cs , та $47 \cdot 10^{15} \text{ Бк}$ ^{134}Cs [3 - 6]. Тільки в Україні територія, забруднена ізотопом ^{137}Cs , становила близько 42000 км^2 [4]. Усього було забруднено радіоцезієм понад 200000 км^2 , з них приблизно 70 % – території Білорусі, України та РФ, решта 30 % – інші країни Європи [6]. У перший рік після аварії формування доз опромінення було обумовлено переважно випадіннями короткоживучих радіоізоотопів (насамперед, ізотопів йоду), а у наступні роки – переважно ізотопами цезію з поступовим зменшенням доз внаслідок їхнього радіоактивного розпаду та заглиблення у ґрунт [5].

Аварія на АЕС Фукусіма Даїчі в Японії, яка сталася внаслідок землетрусу та цунамі у 2011 р. призвела до викиду в атмосферу $(7 - 20) \cdot 10^{15} \text{ Бк}$ ^{137}Cs та $(8,3 - 50) \cdot 10^{15} \text{ Бк}$ ^{134}Cs разом з іншими радіоізотопами, що приблизно дорівнює 20 % від аналогічних викидів внаслідок аварії на ЧАЕС [7]. Забруднення території ізотопами ^{137}Cs та ^{134}Cs сягало 800 км^2 (приблизно 10 - 20 % від забруднення в Чорнобилі). Крім цього, відомо про низку менш масштабних інцидентів з викидом у довкілля ізотопів цезію.

Так, внаслідок вибуху на ядерному комплексі з виробництва плутонію для військових потреб «Уіндскейл» (Великобританія) у 1957 р. в навколишнє середовище потрапило за різними даними від 22 до 180 ТБк ^{137}Cs при загальному викиді радіоізоотопів $18,6 \text{ ПБк}$ [8 - 10]. ^{137}Cs зробив основний внесок у довготривале забруднення територій і довгострокове формування дози опромінення [10]. Викиди ^{137}Cs після аварії в Уіндскейлі досі можна прослідкувати в морській воді в Ірландському морі на північ від Шотландії, вздовж Норвезького узбережжя о. Шпіцберген та на північному сході Гренландії [8].

Масштабна радіаційна аварія із джерелом ^{137}Cs сталася у 1987 р. в м. Гоянії (Бразилія). Внаслідок крадіжки та розгерметизації цезієвого джерела (активністю 50,69 ТБк) від гамма-терапевтичної установки утворилися численні локальні місця радіоактивного забруднення території. Місця забруднення ^{137}Cs виявлялися на відстані понад 100 км від міста. Постраждало 249 осіб, які отримали зовнішнє та внутрішнє опромі-

нення. Щонайменше у 50 з них виявили симптоми гострого опромінення всього тіла та його локальних ділянок [11]. У шести осіб, які отримали дози 0,5 Гр і більше, виявлено нерівномірне опромінення тіла. Четверо осіб померли невдовзі після опромінення [12].

Основні масштабні аварії із забрудненням радіоцезієм представлено в табл. 1.

Таблиця 1. Масштабні аварії, де радіоцезій був одним із основних забруднювачів

Місце та рік	Радіоцезій	Активність, Бк	Рівень аварії за шкалою МСЯІ*	Джерело літератури
Чорнобильська АЕС, СРСР, 1986	^{137}Cs ^{134}Cs	87 ПБк 47 ПБк	7 Велика аварія	1, 2
Фукусіма Даїчі АЕС, Японія, 2011	^{137}Cs ^{134}Cs	7 - 20 ПБк 8,3 - 50 ПБк		6
м. Гоянія, Бразилія, 1987	^{137}Cs	50,69 ТБк	5 Аварія з ризиком для довкілля	3
Ядерний реактор «Уіндскейл», Великобританія, 1957	^{137}Cs	22 ТБк		31

* Міжнародна система з ядерної інформації.

На теренах колишнього Радянського Союзу, за даними Федерального медичного біофізичного центру імені А. І. Бурназяна Федерального медико-біологічного агентства РФ, за період 1949 - 2003 рр. сталося 19 аварійних ситуацій виключно з ^{137}Cs , що призвели, в основному, до зовнішнього гамма-опромінення людей. Проте, у двох ви-

падках з 19, відбулося і внутрішнє бета-опромінення. Перелік аварійних ситуацій з радіоцезієм представлено в табл. 2, яка складена відповідно до інформації, представленої в [13]. На жаль, детальна інформація про більшість з них в доступній нам літературі відсутня.

Таблиця 2. Аварійні ситуації із джерелом ^{137}Cs на теренах колишнього Радянського Союзу

Дата	Місце	Тип опромінення
24.11.1969	Новомосковськ, Росія	Зовнішнє – гамма
-.1970	Челябінськ, Росія	Зовнішнє – гамма
-.1971	Тула, Росія	Зовнішнє – гамма
05.12.1971	Архангельська область, Росія	Зовнішнє – гамма
-.1971	Уфа, Росія	Зовнішнє – гамма
05.09.1973	Володимирська обл., Росія	Зовнішнє – гамма / внутрішнє – гамма, бета
-.12.1973	Донецьк, Україна	Зовнішнє – гамма
15.12.1974	Липецьк, Росія	Зовнішнє – гамма
09.01.1982	Краматорськ, Україна	Зовнішнє – гамма
05.10.1982	Баку, Азейбаржан	Зовнішнє – гамма
28.04.1983	Харків, Україна	Зовнішнє – гамма
11.06.1983	Уфа, Росія	Зовнішнє – гамма
03.03.1985	Норильськ, Росія	Зовнішнє – гамма
24.08.1991	Братськ, Росія	Зовнішнє – гамма
14.04.1993	Москва, Росія	Зовнішнє – гамма
21.10.1994	Тамміку, Естонія	Зовнішнє – гамма
07.07.1995	Москва, Росія	Зовнішнє – гамма
11.09.1995	Москва, Росія	Внутрішнє – гамма, бета
04.09.1997	Тбілісі, Грузія	Зовнішнє – гамма

Зазначають впливу радіоцезію і при професійній діяльності за планового режиму роботи: працівники урановидобувної і уранопереробної про-

мисловості, працівники АЕС, підприємств з переробки ядерного палива, при виробництві джерел радіоцезію тощо.

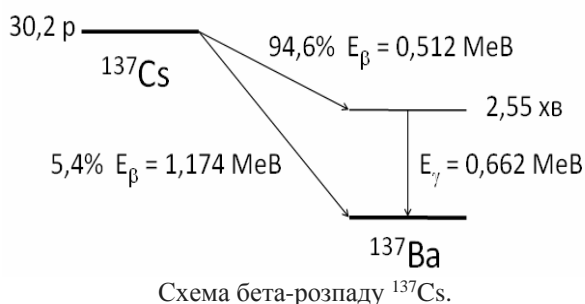
Все вище викладене спонукає до вивчення радіотоксичності і зокрема генотоксичності радіоізоотопів цезію, оскільки пошкодження генетичного матеріалу клітин може бути причиною виникнення низки післярадіаційних патологічних проявів на рівні організму (злоякісних пухлин, захворювань серцево-судинної і кровотворної систем тощо). Крім того, показники радіаційного пошкодження хромосом лежать в основі цитогенетичної дозиметрії.

Слід зазначити, що стабільний ізоотоп ^{133}Cs має відносно низьку токсичність [14, 15]. Це встановлено на підставі спостереження за пацієнтами, які приймали стабільний цезій, як компонент гомеопатичних ліків [15 - 17] або зазнали гострих чи хронічних інгаляцій, чи дії на шкіру [2], а також в результаті експериментальних досліджень на тваринах [15, 18] та *in vitro* на лімфоцитах крові людини [15], штамах *Esherichia coli* [19].

2. Ядерно-фізична характеристика радіоізоотопів цезію

Негативний вплив радіоізоотопів цезію на живі організми зумовлюється енергією, яку вони виділяють. Серед відомих 23 радіоізоотопів цезію найбільш поширеними і практично значимими та відповідно і найбільш дослідженими є ^{137}Cs та ^{134}Cs .

Радіоізоотопи цезію є бета випромінювачами. У результаті бета-розпаду ^{137}Cs ($\tau_{1/2} = 30,17$ р.) утворюється стабільний ізоотоп барію ^{137}Ba та виділяються бета-частинки з граничним спектром енергій 0,512 та 1,174 MeV і частотою розпадів 0,946 та 0,054 відповідно. Розпад відбувається з утворенням проміжного радіонукліда ^{137m}Ba з періодом напіврозпаду 2,55 хв, який переходить в основний стан з випромінюванням гамма-квантів з енергією 0,6617 MeV або конверсійного електрона з енергією 0,6617 MeV, зменшеною на величину енергії зв'язку електрона [20] (див. рисунок).



^{134}Cs – відносно короткоживучий ізоотоп ($\tau_{1/2} = 2,06$ р.) з двома каналами розпаду – β -розпад (99,997 %) та електронне захоплення (0,003 %), у результаті яких утворюється стабільний ^{134}Ba або ^{134}Xe відповідно. Дочірнім продуктом β -розпаду є один із збуджених станів ^{134}Ba , який послідовно каскадно випускає гамма-кванти з різними енергіями (0,563 MeV 8,3 %, 0,569 MeV 15,4 %, 0,605 MeV 97,6 %, 0,796 MeV 85,5 %, 0,802 MeV 8,7 % та ін.) і переходить у основний стан ^{134}Ba [21].

Більшість потерпілих внаслідок випробувань ядерної зброї та аварійних викидів радіоцезію зазнають його тривалого впливу (зовнішнього і внутрішнього).

За умов зовнішнього впливу ^{137}Cs доза опромінення зумовлюється, головним чином, високою проникаючою здатністю гамма-квантів дочірнього нукліда ^{137m}Ba , що поширюються у повітрі на великі відстані. У разі безпосереднього контакту ^{137}Cs з біологічною тканиною (при надходженні до організму чи забрудненні поверхні шкіри або в дослідях *in vitro*) поглинена доза формується поєднаною дією гамма-квантів і бета-частинок, причому основна її частина (до 90 %) обумовлюється бета-частинками. Пробіг гамма-квантів ^{137m}Ba в біологічній тканині дорівнює приблизно 12 см. Пробіг електронів з енергією 0,512 та 1,174 MeV становить 1,3 та 4,4 мм відповідно [22].

3. Шляхи надходження і поведінка радіоізоотопів цезію в організмі

Внутрішнє опромінення є результатом потрапляння радіоізоотопів до організму людини інгаляційним, пероральним шляхом або при абсорбції пошкодженими ділянками шкіри. При глобальних радіоактивних випадіннях цезій надходить до організму переважно з харчовими продуктами і практично повністю всмоктується в шлунково-кишковому тракті. За хімічними властивостями цезій є аналогом калію і дотримується в організмі тієї ж поведінки, що ^{39}K [23 - 25]. Хоча іони калію потрапляють до клітин через мембрани швидше, проте ^{137}Cs утримується в клітинах довше і його внутрішньоклітинні концентрації можуть бути досить високими [25].

Потрапивши в кров, ^{137}Cs швидко покидає кров'яне русло і порівняно рівномірно розподіляється по органах і тканинах. У ранні терміни після надходження максимальна концентрація радіонукліда реєструється у нирках, а після його перерозподілу 80 - 90 % накопичується в тканинах скелетних м'язів, що досить рівномірно розміщені по тілу [26 - 28]. Саме характер розподілу радіоізоотопу в тілі забезпечує відносно рівномірне опромінення всього організму [29 - 31]. За умов хронічного надходження ^{137}Cs депонується

в організмі до певної величини і надалі спостерігається динамічна рівновага. Виведення ізотопів цезію з організму відбувається переважно через нирки. У дорослої людини приблизно 10 % поглиненого радіоізоотопу швидко виводиться з організму з біологічним періодом напіввиведення $T_{6\frac{1}{2}}$ близько однієї доби, а 90 % виводиться з $T_{6\frac{1}{2}}$ від 50 до 200 діб, у середньому 110 діб [11].

Швидкий компонент виведення, як показують дослідження на тваринах, обумовлений екскрецією з сечею ^{137}Cs , накопиченого у нирках впродовж декількох годин після його надходження у кров [11]. Тривалий компонент відображає екскрецію (переважно з сечею) цезію, накопиченого у м'язах та інших тканинах.

За результатами клінічних спостережень за особами, які потерпіли під час аварій [11, 32 - 35], та експериментальних досліджень на тваринах [36], а також внаслідок проведення математичних розрахунків Міжнародною комісією з радіаційного захисту (МКРЗ) рекомендовано для персоналу та населення, які зазнають внутрішнього впливу ^{137}Cs , розраховувати його утримання в організмі сумою двох експоненціальних компонент [30, 23]. Водночас було показано, що у осіб, які при аварії в м. Гоянії отримали згідно з даними фізичної дозиметрії поглинені дози понад 3 Гр, при обрахунку утримання та періодів напіввиведення ^{137}Cs із організму слід враховувати не два, а три компоненти [29]. Описано швидкий, тривалий та довготривалий періоди напіввиведення ^{137}Cs з організму людини. Однак, третій компонент з періодом напіввиведення 400 - 570 діб становив усього 0,1 - 1,0 %. У зв'язку з цим поглинені дози для всього тіла у постраждалих обраховували з використанням двох компонент. Для кожного суб'єкта значення другого компонента було індивідуальним [11, 29].

Обстеження жертв аварії в м. Гоянії показало, що рівень накопичення і період напіввиведення ^{137}Cs із організму залежать від віку і маси тіла. Зі збільшенням віку і маси м'язів спостерігали пропорційне збільшення періоду напіввиведення ^{137}Cs . У дітей 5 - 10 років виявлено залежність тривалості періоду напіввиведення ^{137}Cs лише від маси тіла. При цьому радіоцезій виводився у два рази швидше, ніж у дорослих [26]. У жінок період напіввиведення радіоцезію становить у середньому 65 діб, проти 100 у чоловіків [37, 38].

4. Цитогенетичні показники для визначення впливу іонізуючого випромінювання на організм людини

Під час радіаційних інцидентів, що супроводжуються опроміненням людей, виникає необхідність оцінки радіаційного ризику соматичних

та генетичних наслідків. У такій ситуації об'єктивну інформацію можна отримати при дослідженні цитогенетичних показників у соматичних і спадкових клітинах, оскільки причиною ряду післярадіаційних патологічних проявів є саме мутагенний ефект.

Дані літератури щодо генотоксичності радіоцезію стосуються, в основному, ізотопу ^{137}Cs , вочевидь як більш довгоживучого і більш значимого для дозоутворення за радіаційних аварій. Публікацій, з яких можна зробити висновки щодо генотоксичності ^{134}Cs , в доступній літературі не виявлено. На хромосомному рівні ефекти ^{137}Cs вивчали за частотою хромосомних аберацій [39 - 43], мікроядер (МЯ) [44, 45], сестринських хроматидних обмінів [46] здебільшого на лімфоцитах периферичної крові людини як тест-системи для біодозиметрії, а також в поодиноких роботах на сперматогоніях людини [47 - 49] та клітинах китайського хом'ячка [50].

Відомо, що за зовнішнього гамма-опромінення крові людини ізотопом ^{137}Cs розподіл обмінних аберацій (дицентриків і центричних кілець) серед проаналізованих лімфоцитів відповідає розподілу Пуассона, а розподіл МЯ – наддисперсний. Характер залежності збільшення пошкоджень у лімфоцитах крові від дози впливу ^{137}Cs є лінійно-квадратичним, як і у разі опромінення гамма-квантами ізотопу ^{60}Co або рентгєнівськими променями [51 - 53].

Дозова залежність виходу радіаційно-індукованих цитогенетичних пошкоджень у лімфоцитах крові *in vitro* використовується для оцінки поглинених доз опромінення за радіаційних інцидентів та за планової професійної діяльності на ядерно-фізичних установках. Біологічна оцінка дози має вирішальне значення при підозрі на опромінення, коли фізична дозиметрія є недоступною, або застосовується для підтвердження результатів фізичної дозиметрії. Біологічна дозиметрія є дуже важливою, оскільки враховує індивідуальну радіочутливість організму.

На даний час для біологічної дозиметрії використовуються чотири цитогенетичні показники радіаційного впливу на людину [54]. Серед них, найбільш специфічними до радіаційного чинника є дицентричні хромосоми в лімфоцитах периферичної крові людини, що є незалежними від інших факторів довкілля. Класичний аналіз нестабільних хромосомних перебудов (дицентриків + центричних кілець із супровідним парним фрагментом) у метафазних пластинках лімфоцитів крові вважають «золотим» стандартом для визначення доз недавнього опромінення. Метод є стандартизованим та валідованим [55] і введений у міжнародні програми з радіаційного захисту

[54, 56]. Чутливість методу залежить від кількості проаналізованих клітин і становить близько 0,14 Гр за гострої дії та 0,20 Гр за хронічної дії гамма- та рентгенівського випромінювання і близько 0,05 Гр для швидких нейтронів [51, 54, 57, 58]. Розроблено алгоритми визначення доз тотального і локального опромінення тіла людини за цитогенетичними показниками [54, 56].

Як скринінговий тест при великих радіаційних аваріях пропонується мікроядерний тест з блокуванням цитокінезу. МЯ утворюються з ацентричних фрагментів або цілих хромосом під час інтерфази. На відміну від дицентричного, аналіз МЯ є простішим та швидшим, але МЯ не є чітко радіоспецифічними адже можуть бути індуковані дією різних кластогенних агентів і кількість їх збільшується з віком. Нижня стандартна межа виявлення МЯ – 0,2 - 0,3 Гр [54]. Метод є стандартизованим та валідованим [59 - 61].

Метод флуоресцентної гібридизації *in situ* (FISH) базується на використанні ДНК-проб, мічених флуоресцентною міткою. Метод дає змогу визначати різноманітні стабільні хромосомні аберації: делеції, транслокації, ампліфікації. Використовується для оцінки доз довготривалого (наприклад, професійного) та віддаленого у часі опромінення після радіаційної аварії (ретроспективна дозиметрія) [54]. Чутливість методу залежить від фонового рівня стабільних хромосомних пошкоджень, зумовлених віком обстеженої особи і її шкідливими звичками (наприклад, паління) і варіює від 0,50 до 0,85 Гр хронічного опромінення [58, 62]. Обмежуючим фактором також є елімінація з часом абераційних клітин, що містять одночасно зі стабільними абераціями і нестабільні [62 - 65]. Тому було запропоновано оцінку дози проводити за аналізом клітин лише зі стабільними абераціями [66, 67].

Альтернативою традиційному цитогенетичному аналізу вважають аналіз передчасно конденсованих хромосом (ПКХ) [54]. ПКХ – це процес конденсації інтерфазних хромосом, що раптово вступають у фазу мітозу в результаті злиття інтерфазної і мітотичної клітин. Запропоновано використовувати ПКХ, як біологічний дозиметр поглиненої дози випромінювання. Хромосомні пошкодження можна візуалізувати приблизно через 2 год з моменту отримання зразка крові, отже, ймовірність інтерфазної загибелі клітин або репарації хромосом знижується. Для висновків щодо ступеня ураження організму достатньо проаналізувати 100 мононуклеарних лімфоцитів периферичної крові [54, 68]. Аналіз ПКХ дає можливість розрізнити опромінення тіла як тотальне, так і часткове [69, 70].

Після проведення низки досліджень різними авторами було визнано, що тоді як аналіз дицентричних хромосом є методом для оцінки індивідуальної поглиненої дози в діапазоні опромінення < 6 Гр, аналіз ПКХ підходить для більш високих доз – > 6 Гр [58, 71, 72]. Нещодавно метод було впроваджено для сортування пацієнтів після отримання ними високих доз опромінення [58, 72].

Із представлених вище чотирьох методів для цитогенетичної індикації та дозиметрії радіаційного впливу на людину на сьогодні найбільш поширеним лишається класичний аналіз нестабільних хромосомних аберацій у лімфоцитах крові. Для проведення оперативного, якісного дицентричного аналізу лімфоцитів великої кількості потенційно опромінених людей у разі надзвичайної ситуації створено Європейську мережу біодозиметрії. До цієї мережі залучено фахівців з 31 країни [73].

5. Досвід використання цитогенетичної дозиметрії за різних радіаційних інцидентів з радіоцезієм

Можливості цитогенетичної дозиметрії за опромінення радіоізотопами цезію розглянемо на прикладі трьох аварій.

5.1. Аварія в м. Гоянії (Бразилія, 1987 р.)

Наймасштабніша аварія з потужним джерелом ^{137}Cs сталася в м. Гоянії.

На Олімпійському стадіоні в м. Гоянії було проведено контрольне радіометричне обстеження приблизно 112000 осіб (вимірювання радіоактивності всього тіла, уражених ділянок шкіри та екскрементів), з яких у 249 було виявлено як зовнішнє, так і внутрішнє забруднення ізотопом ^{137}Cs [11]. Щонайменше 50 осіб виявили симптоми гострого тотального та локального опромінення [11, 74 - 76]. Найбільша індивідуальна доза від інкорпорованого ^{137}Cs накопичувалася з потужністю дози 0,25 Гр за добу [11, 34, 74 - 77].

Через два тижні після аварії було проведено цитогенетичне дослідження лімфоцитів зразків периферичної крові, узятих у 129 потерпілих, з метою оцінки поглинених доз опромінення на основі початкових частот дицентриків та центричних кілець [78]. Через відсутність калібрувальної дозової кривої *in vitro* для джерела ^{137}Cs було використано калібрувальні криві для ізотопу ^{60}Co .

У 21 особи оціночні дози перевищували 1,0 Гр, а у 8 з них – 4,0 Гр, при найбільшій дозі 7,0 Гр [79].

З метою дослідження можливості оцінки доз опромінення постраждалих у разі суттєвої за-

тримки проведення цитогенетичного обстеження після аварії, 15 постраждалих осіб були неодноразово повторно обстежені впродовж наступних шести років. Дослідження було націлене на визначення середнього часу напіввиведення з крові первинно індукованих нестабільних обмінів та вирахування поправочного коефіцієнта для оцінки їх початкового рівня через певний час після аварії.

Було виявлено, що кінетика зменшення з часом нестабільних обмінів відповідає подвійній експоненціальній функції. До 470 діб після опромінення спостерігали швидке зниження частоти аберацій, а після – дуже повільне. Розрахунковий середній час їх напіввиведення для початкового періоду після аварії (до 470 діб) у групи осіб, які отримали поглинені дози $> 1,0$ Гр, становив 110 діб, а у групи осіб з поглиненими дозами 0,2 - 1,0 Гр – 160 діб.

Суб'єкти з дозою опромінення більше 1 Гр були різного віку, відрізнялися за рівнем лейкопенії під час критичної фази аварії, з різною первинною частотою аберацій і мали різний рівень внутрішнього вмісту ізотопу ^{137}Cs . Кореляцій між індивідуальними періодами напіввиведення обмінів і величинами цих параметрів не було виявлено. Тому було запропоновано для корекції виявленої частоти аберацій застосовувати значення середнього часу напіввиведення нестабільних обмінів та простої експоненціальної функції, якщо відомі час після аварії та приблизна оцінка отриманої дози (вище чи нижче 1,0 Гр).

Впродовж віддаленого терміну після аварії (від 1,3 до 6 років) частота нестабільних обмінів у кожного суб'єкта з дозами опромінення $> 0,2$ Гр була приблизно на постійному рівні. Оскільки була показана лінійна кореляція між початковою (y) і кінцевою (x) частотами аберацій, запропоновано використовувати як поправочний коефіцієнт лінійну функцію $y = ax$, де $a = 10$. Тобто, щоб отримати приблизну частоту нестабільних обмінів слід помножити на 10 значення частоти, що виявляється на час обстеження у віддалений період [80]. Додаткове цитогенетичне обстеження 12 постраждалих з поглиненими дозами від 0,2 до 4,6 Гр було проведено через 7,5 років після аварії [66]. Показано, що рівень зниження нестабільних аберацій, ймовірно, залежить від поглиненої дози. У суб'єктів з помірними або високими дозами (0,3 - 4,69 Гр) частоти нестабільних обмінів падали приблизно до 5 % від висхідних і були вищими, ніж очікувалося за результатами попередніх досліджень та принаймні у 10 разів перевищували контрольні значення. Це означає, що у деяких осіб нестабільні обміни можуть зберігатися

в субпопуляції лімфоцитів тривалий час. Також це могло бути наслідком внутрішнього забруднення, не виявленого під час аварії, або стану здоров'я, способу життя, збільшення віку тощо. У суб'єктів з низькими дозами опромінення ($< 0,2$ Гр) частоти нестабільних обмінів залишалися близькими до початкових, тобто знижувалися дуже повільно.

Можливість визначення поглинених доз у опромінених суб'єктів у віддалений термін після радіаційних аварій пов'язують із застосуванням методу FISH, особливо для аналізу реципрокних транслокацій, що вважалися стійкими протягом тривалого часу після опромінення.

З експериментів на лабораторних мишах відомо, що зразу після опромінення частоти індукованих дицентриків і транслокацій у клітинах однакові. Проте, їхні частоти не залишаються постійними в часі і кінетика їхньої елімінації відрізняється [11, 80, 81]. У постраждалих у м. Гоянії частоти транслокацій через 8 років після опромінення були в 2 - 3 рази нижчі, ніж початкові дицентричні частоти і більші відмінності було виявлено у суб'єктів з опроміненням у дозах понад 1 Гр. Проте, за менших доз опромінення (0,1 - 0,4 Гр) частоти транслокацій були вищими, ніж дицентриків. Це обумовлено тим, що за доз вище 0,5 Гр в крові потерпілих виявляються лімфоцити з множинними аберациями, серед яких присутні як стабільні (транслокації), так і нестабільні (дицентрики). Клітини, що містять нестабільні аберації під час мітотичного поділу частково елімуються, що призводить до одночасного зменшення і стабільних транслокацій. У той же час, за менших доз (до 0,5 Гр) елімуються клітини, що містять лише дицентрики, а клітини з транслокаціями залишаються, тобто загальна кількість транслокацій зберігається. Отже, тривале збереження транслокацій залежить від часу та дози опромінення. Ці фактори потенційно впливають на зміщення у ретроспективних оцінках дози і їх слід враховувати. У цілому, результати обстеження потерпілих від опромінення ізотопом ^{137}Cs у м. Гоянії показали, що коректне застосування ретроспективної дозиметрії можливе лише за доз опромінення нижче 0,5 Гр. При підвищенні рівня радіаційного впливу визначені дози можуть бути недооцінені через зниження частоти транслокацій за рахунок елімінації лімфоцитів, що одночасно з транслокаціями містять і нестабільні аберації. Слід зазначити, що у даний час вивчається можливість застосування для ретроспективної дозиметрії аналізу лімфоцитів, що містять лише транслокації, про що зазначено у розділі 4 цього огляду.

5.2. Аварія в м. Тамміку (Естонія, 1994 р.)

Для оцінки доз опромінення осіб, які мали відношення до радіаційного інциденту в Естонії було проведено цитогенетичне обстеження 18 осіб [32, 82].

Стандартна оцінка дози базувалася на аналізі частоти дицентричних хромосом у лімфоцитах периферичної крові традиційним методом. За даними анамнезу потерпілих осіб їхнє опромінення було тривалим (протягом, як мінімум, 7 год, а у більшості випадків, декількох діб або тижнів). Тому, для оцінки доз використовували залежну від часу функцію G , що давала змогу модифікувати квадратичний коефіцієнт калібрувальної дозової залежності виходу нестабільних обмінів за гострого опромінення і враховувати таким чином ефект зменшення дози за рахунок репарації розривів ДНК [54, 56]. Зі збільшенням часу опромінення квадратичний коефіцієнт наближається до нуля, а лінійно-квадратична залежність до лінійної. Функцію G використовували коли опромінення тривало протягом 7 год та декількох діб. У разі тривалості опромінення протягом чотирьох тижнів застосовували лінійну дозову залежність. Для визначення того, чи було опромінення рівномірним, чи локальним, перевіряли відповідність розподілу дицентриків по клітинах Пуассонівському розподілу розрахунком індексу дисперсії і U тесту. У разі наддисперсного розподілу дицентриків $U > 1,96$ [54]. У випадках симптомів часткового опромінення тіла (опіки шкіри рук, внаслідок тісного локального контакту із джерелом, виявлення наддисперсного розподілу дицентриків по клітинах) для оцінки доз локального опромінення застосовували метод Q_{dr} [81]. Цей метод базується на присутності аберантних клітин та ігнорує неушкоджені клітини з неопроміненої частини тіла. Q_{dr} – це частота дицентричних та кільцевих хромосом у нестабільних клітинах. Докладно метод представлено в [7]. Використовуючи зазначені вище методи, було оцінено поглинені дози опромінення восьми потерпілих і десяти осіб з медичного і рятувального персоналу.

Так, оціночні значення отриманих доз гострого опромінення двох суб'єктів, які були у сховищі радіоактивних відходів разом з померлою особою, становили 0,9 (0,6 - 1,1) Гр і 0,8 (0,5 - 1,0) Гр. Враховуючи, що опромінення тривало приблизно 7 год, фактично отримані ними дози становили 1,2 (0,7 - 1,6) Гр і 1,0 (0,5 - 1,4) Гр відповідно. У обох були опіки на руках, що вказувало на тісний контакт із джерелом високої активності. Оцінка локальних доз за методом Q_{dr} показала 2,2 і 1,7 Гр відповідно. Це вище за оцінку доз гострого або тривалого опромінення.

Троє мешканців будинку, де перебувало джерело, зазнавали опромінення всього тіла впродовж чотирьох тижнів. Більшу частину часу вони зазнавали опромінення з відносно низькою потужністю дози – від декількох до десятків мГр/год. У одного з них (13-річного хлопчика) були виявлені сильні опіки на руках від контакту з радіоактивним джерелом. Його оціночні дози опромінення були: гострого – 1,1 (0,7 - 1,3) Гр, тривалого – 2,7 (1,0 - 4,5) Гр, локального – 1,9 (1,2 - 2,4) Гр. Тобто дози локального опромінення були між дозами гострого і хронічного. Це може означати, що більша частина загальної дози опромінення всього тіла пов'язана з тривалим перебуванням у будинку, а менша частина – отримана від короткочасної дії високої потужності дози при контакті із джерелом.

Біологічні дози другого суб'єкта були схожі на дози згаданого хлопчика, але він зазнав рівномірного опромінення. Його оціночні дози становили: 1,0 Гр, 2,7 Гр, 2,9 Гр відповідно.

Опромінення третього мешканця було також рівномірним. Оцінка гострої дози визначена як 0,3 Гр, а пролонгованої – 0,5 Гр, що узгоджується з суттєво меншим часом його перебування в будинку.

Оціночні дози для інших обстежених суб'єктів (сусідів, медичного та рятувального персоналу) були набагато нижчими ($< 0,1$ Гр) або взагалі не було виявлено жодних ознак радіаційного впливу (0,1 - 0,0 Гр).

Порівняння розрахованих для кожного суб'єкта доз всіх трьох варіантів опромінення (гострого, пролонгованого, локального) дало змогу оцінити внесок кожного з них у загальну дозу опромінення всього тіла.

Крім викладених вище біодозиметричних обстежень осіб, постраждалих від інциденту з ізотопом ^{137}Cs , в Естонії вперше було проведено паралельно з аналізом дицентриків (класичним методом) аналіз транслокацій (методом FISH) у лімфоцитах крові як безпосередньо, так і в різні проміжки часу (протягом двох і через 7 років) після аварії [66, 82 - 84]. Показано, що зразу після опромінення частоти повних транслокацій і дицентриків з парним супровідним фрагментом повністю збігалися і оцінки поглинених доз за їх виходом добре узгоджувалися. Для оцінки доз за виходом повних транслокацій використовували калібрувальну криву для джерела ^{60}Co [85, 86]. Частоту транслокацій визначали в «стабільних» клітинах (що не містили нестабільних аберацій) і в загальній масі лімфоцитів. Вихід транслокацій у стабільних клітинах не залежав від часу після опромінення. Вихід транслокацій у фракції всіх клітин показував їхнє зниження приблизно до

двох років з наступною постійною частотою. Виходячи з цього, для ретроспективної оцінки дози, запропоновано оцінювати транслокації лише в стабільних клітинах, відповідно і калібрувальні дозові залежності частоти транслокацій повинні бути виконані з використанням лише стабільних клітин [66].

5.3. Аварія у військовому навчальному центрі ім. Лїлло (Грузія 1996 - 1997 рр.)

Після радіаційного інциденту з ізотопом ^{137}Cs у військовому навчальному центрі, четверо найбільш постраждалих прикордонників (з 11 опромінених) пройшли цитогенетичне обстеження [12, 33]. Потерпілі в цій аварії, як і в аварії в Естонії, зазнали лише зовнішнього опромінення.

У двох осіб з найбільшим рівнем пошкоджень у лімфоцитах була виявлена значна частка (14 %) дицентриків без супровідного фрагменту. Такий факт можна пояснити тим, що під час клітинного поділу дицентрики з 50 % вірогідністю проходять від материнської клітини до однієї з двох дочірніх і можуть бути втрачені супровідні фрагменти. Це є характерним для тривалого опромінення, безперервного або з повторюваннями через інтервали, під час якого відбувається часткове поповнення крові клітинами з кісткового мозку у відповідь на елімінацію з крові пошкоджених клітин. Поглинені дози визначали за допомогою калібрувальної кривої, отриманої *in vitro* при опроміненні крові джерелом ^{60}Co з потужністю дози 0,5 Гр/хв. Хоча фізична реконструкція дози передбачала дуже локалізоване опромінення, перша цитогенетична оцінка базувалася на припущенні рівномірного тотального опромінення тіла. У такому разі розподіл аберацій повинен відповідати Пуассонівському [58]. Однак, у двох обстежених осіб було виявлено дуже виразний наддисперсний розподіл аберацій, що свідчило про часткове опромінення тіла з високою потужністю дози, а у двох інших не спостерігали відхилення від Пуассонівського розподілу. Для останніх було зроблено припущення про загибель сильно навантажених абераціями клітин і, як наслідок, присутність у крові лімфоцитів лише з однією аберацією. Крім того, ці дві особи могли зазнавати опромінення з малою потужністю дози, що через циркуляцію лімфоцитів імітувало однорідний вплив на все тіло. Тому їхні розраховані дози з урахуванням гострого рівномірного опромінення виявилися суттєво нижчими за дози перших двох обстежених.

Для оцінки дози локального опромінення тіла використовували крім методу Q_{dr} [81] також і метод, запропонований Долфін [87]. Останній дає змогу розрахувати крім дози і опромінену

фракцію тіла. Ці методи можна застосовувати за наявності в крові клітин з більш ніж однією аберацією, тому розрахунки було зроблено лише для перших двох пацієнтів. Було оцінено за методом Долфін, що у однієї особи 40 % тіла опромінено в дозі 2,3 Гр, у другої – в дозі 2,5 Гр, а за методом Сасаки (Q_{dr}) – 2,8 та 3,4 Гр відповідно. Оцінки доз з використанням цих математичних методів відображали дози опромінення лімфоцитів крові пацієнтів і узгоджувалися з медичними симптомами останніх. Враховуючи, що опромінення тривало майже 1 рік, оціночні дози були скореговані функцією G і становили 3,1 і 4,3 Гр відповідно. У цій аварії біологічна дозиметрія була визначальною через брак інформації для точної оцінки доз опромінення постраждалих фізичними методами.

При визначенні доз зовнішнього опромінення постраждалих осіб у всіх зазначених вище аваріях із джерелом ^{137}Cs застосовували калібрувальні дозові залежності індукції хромосомних аберацій *in vitro*, отримані при опроміненні крові джерелом ^{60}Co [12, 78, 84, 88]. По-перше, на той час були відсутні калібрувальні криві для ^{137}Cs ; по-друге, вважали, що немає переконливих доказів різної цитогенетичної ефективності ^{137}Cs і ^{60}Co . При обстеженні ліквідаторів аварії на ЧАЕС (де ^{137}Cs був одним із основних дозоутворювачів), персоналу підрядних підприємств ЧАЕС і населення, яке проживає на забруднених внаслідок аварії територіях, також використовували калібрувальні криві для ^{60}Co [89 - 95].

Проте, в роботах з порівняльного вивчення цитогенетичної ефективності ^{137}Cs та ^{60}Co представлені неоднозначні дані. Порівняння методом FISH ефективності ^{137}Cs і ^{60}Co за частотою індукованих дицентриків та транслокацій у лімфоцитах крові людини *in vitro* при опроміненні в дозах 0,8 - 3,2 Гр виявлено тенденцію до більшої ефективності ^{137}Cs ніж ^{60}Co , але різниця не була статистично значимою [96]. У роботі [97] було показано однакову частоту дицентриків у лімфоцитах крові людини індукованих ^{137}Cs і ^{60}Co у діапазоні доз 0,1 - 1,0 Гр, на підставі чого автори об'єднали їх разом для побудови калібрувальної дозової залежності для ^{137}Cs . Водночас показано, що кількість індукованих на клітину дицентриків більша у разі опромінення крові ^{137}Cs порівняно з ^{60}Co (0,2 - 4,0 Гр) [52]. При порівнянні радіочутливості хромосом лімфоцитів у культурі крові людини за загальною кількістю хромосомних аберацій при опроміненні ^{137}Cs і ^{60}Co стверджується, що відносна біологічна ефективність (ВБЕ) ^{137}Cs зменшується від 3,5 до 1,3 у діапазоні доз 0,3 - 5,0 Гр [98, 99]. Однак, у даному дослідженні ефективність ^{137}Cs і ^{60}Co порівнювалася за

умов модифікації їхньої дії післяпроменевою гіпертермією (42 °C, 1 год). Гіпертермія є потужним підсилювачем уражуваності хромосом. Коефіцієнт теплового посилення ефекту ^{137}Cs за дози 1 Гр дорівнює 2,4. Аналогічних даних для ^{60}Co авторами не наведено. Тому вважаємо, що визначення ВБЕ ^{137}Cs за таких умов є некоректним. На нашу думку, питання рівнозначності цитогенетичної ефективності ^{137}Cs і ^{60}Co потребує подальшого вивчення, оскільки енергія гамма-квантів ^{137}Cs (0,66 МеВ) менша, ніж у ^{60}Co (в середньому 1,25 МеВ). Як відомо, гамма-кванти з меншою енергією при взаємодії з речовиною віддають більшу поглинену енергію, а значить, мають більшу ефективність [100, 101]. Тому подальше дослідження цього питання є важливим для уточнення правомірності застосування калібрувальних кривих для ^{60}Co при біодозиметрії впливу ^{137}Cs .

Публікації про створення калібрувальних кривих залежностей «доза - ефект» за виходом нестабільних хромосомних обмінів із супровідним парним фрагментом у лімфоцитах людини за гострого опромінення крові ^{137}Cs з'являються починаючи з 2007 р. Діапазон доз опромінення становив 0,25 - 5,0 Гр [42, 43, 72]. Водночас, більшість аварійних ситуацій з ^{137}Cs пов'язані з дозами до 1 Гр. Крім того, впливу малих доз ^{137}Cs зазнають і працівники АЕС та інших радіаційно-небезпечних об'єктів, пов'язаних з виробництвом і переробкою радіонуклідів цезію. Тому, для більш точної оцінки доз випадкового опромінення ^{137}Cs у відносно малих дозах, нами була досліджена залежність виходу маркерних аберацій у лімфоцитах за доз 0,09 - 1,0 Гр гострого гамма-впливу [102]. Калібрувальну криву побудовано згідно з останніми методичними рекомендаціями МАГАТЕ (2011 р.) для біодозиметрії. Зразки крові після опромінення витримували 2 год за температури 37 °C для наближення умов *in vitro* до умов *in vivo*. Отримана калібрувальна залежність «доза - ефект» була використана під час цитогенетичного обстеження осіб із підрядного персоналу ДСП ЧАЕС, дози опромінення яких зумовлені, в основному, зовнішнім впливом радіоізоотопу ^{137}Cs [102].

6. Проблема цитогенетичної дозиметрії внутрішнього опромінення радіоцезієм

Радіоцезій є одним з небагатьох радіоізоотопів (крім тритію та радіоїоду у пацієнтів без щитоподібної залози), який у разі інкорпорації майже рівномірно розподіляється по тканинах організму [24, 103 - 106]. Це надає можливість розробки цитогенетичних методів оцінки дози, обумовленого ним внутрішнього опромінення (на відміну

від альфа-випромінюючих ізоотопів та радіоізоотопу ^{90}Sr).

Проблема дозиметрії внутрішнього опромінення в цілому є набагато складнішою порівняно з біодозиметрією зовнішнього опромінення. По-перше, майже в усіх відомих аварійних ситуаціях внутрішнє забруднення радіоізоотопами супроводжується їхнім зовнішнім впливом і останній зумовлює більшу частину отриманої дози. Специфічних пошкоджень для виокремлення ефектів зовнішнього і внутрішнього опромінення немає.

Випадки поєданого (зовнішнє + внутрішнє) опромінення ізоотопом ^{137}Cs спостерігали за інциденту у м. Гоянії (Бразилія, 1987 р.) [11], а також у Володимирській обл. (РФ, 1973 р.) [13]. Так, дослідники наслідків аварії в м. Гоянії представили дані, отримані за допомогою методів фізичної та цитогенетичної дозиметрії для 29 суб'єктів з поглиненими дозами на все тіло не менше 0,5 Гр. Дані цитогенетичної дозиметрії (отримані методом класичного аналізу нестабільних аберацій та оцінкою транслокацій за методом FISH) порівнювали з результатами, отриманими математичним моделюванням фізичних показників (співвідношення між потужністю дози на поверхні тіла, вимірюваною переносними детекторами випромінювання, та вмістом ^{137}Cs , вимірюваного в тілі в цілому [107, 108]). Порівняння показало, що між оцінками дози цими методами немає узгодженості. Узгодження були виявлені тільки у чотирьох суб'єктів, а для інших – біологічна дозиметрія надала значення поглинених доз, що у 2 - 430 разів перевищували відповідні фізичні значення [39]. Можливим поясненням такої різниці є те, що на індукцію цитогенетичних маркерів значною мірою впливало зовнішнє опромінення, яке домінувало для цієї аварії.

У доступних джерелах літератури ми виявили лише один випадок (м. Москва, РФ, 1995 р.), коли опромінення людини було зумовлено виключно внутрішнім забрудненням ^{137}Cs [13].

По-друге, за багатьох масштабних радіаційних аварій внутрішнє опромінення відбувається за рахунок інкорпорації декількох радіоізоотопів одночасно [8 - 11, 95, 108 - 112].

Крім того, внутрішнє опромінення радіоцезієм, як і іншими ізоотопами, є довготривалим і потужним дозу з часом змінюється відповідно до швидкості виведення радіоізоотопу з організму.

Деякі дослідники, для вивчення цитогенетичних пошкоджень індукованих у лімфоцитах крові внутрішнім забрудненням ізоотопом ^{137}Cs , використовували суспензію лімфоцитів крові мишей *in vitro* [113]. Показано, що тривале 24-годинне забруднення лімфоцитів розчином $^{137}\text{CsCl}$ викликає у 5 разів нижчий вихід хромо-

сомних розривів на одиницю дози, ніж гостре зовнішнє опромінення ^{137}Cs . Це пов'язували з проходженням процесів репарації пошкоджень під час тривалого внутрішнього опромінення [113, 114]. В огляді публікацій, присвячених біологічній дозиметрії внутрішнього опромінення, наголошується, що при оцінці дози, зумовленої внутрішнім опроміненням, використання калібрувальних кривих, отриманих *in vitro* від зовнішнього джерела опромінення, може призводити до значного заниження поглиненої дози від інкорпорованих радіонуклідів саме через проходження репараційних процесів і тому є неприпустимим [39].

На даний час калібрувальні криві для оцінки поглинених доз побудовано з використанням лише гострого зовнішнього фотонного опромінення. Проте, дози від інкорпорованого радіоцезію забезпечуються в основному бета-частинками, (інколи до 90 % загальної дози), хоча гамма і рентгенівські фотонні компоненти завжди присутні.

Ефективність бета-частинок досліджена дуже мало і стосується в основному ^3H та ^{90}Sr [115 - 123]. Так дослідження з використанням ^{90}Sr (за безпосереднього контакту клітин з радіоізотопом) показали, що можуть бути відмінності між бета-частинками та гамма-квантами в ефективності індукції пошкоджень ДНК [124] або хромосомних аберацій [118]. ВБЕ бета-частинок ^{90}Sr по відношенню до гамма-квантів ^{60}Co становила 2,8 при опроміненні крові людини в дозі 0,14 Гр [118], а ВБЕ бета-частинок тритію становила 2,2 при рівні забруднення крові, який забезпечував дозу опромінення 0,06 Гр і 1,25 за дози опромінення 1 Гр [115].

За 24-годинного забруднення суспензії лімфоцитів крові мишей розчином $^{137}\text{CsCl}$ індукція хромосомних розривів на одиницю дози була майже у три рази більшою порівняно із зовнішнім гамма-впливом ізотопу ^{60}Co за еквівалентних потужностей доз [113]. Це пояснювали більшою біологічною ефективністю бета-випромінювання ^{137}Cs , хоча згідно з даними МКРЗ його ваговий коефіцієнт становить 1 [39, 24, 125]. Дані стосовно визначення цитогенетичної ефективності бета-частинок ^{137}Cs в лімфоцитах периферичної крові людини також вкрай обмежені. Зокрема, за контамінації крові людини розчином $^{137}\text{CsCl}$ *in vitro* показано лінійну залежність виходу дицентричних хромосом і МЯ від дози опромінення у діапазоні малих (0,002 - 0,37 Гр) доз і наддисперсний розподіл індукованих пошкоджень по клітинах за дози 0,19 Гр і більше [44, 119].

З метою порівняльного визначення ефективності бета-частинок і гамма-квантів ^{137}Cs та роз-

робки цитогенетичної дозиметрії внутрішнього опромінення людини радіоцезієм нами було досліджено внутрішній і зовнішній вплив радіоізотопу на лімфоцити крові в однаковому діапазоні доз (0,09 - 0,54 Гр) з еквівалентною потужністю дози для кожної із доз *in vitro* за умов наближених до *in vivo*. Було розроблено спеціальну експериментальну базу для здійснення пролонгованого (впродовж 1,75 год) внутрішнього та зовнішнього опромінення крові, а для розрахунку поглинених кров'ю доз – програму моделювання опроміненень зразків *in vitro* методом Монте-Карло на базі пакета GEANT-4. Програма враховує всі необхідні параметри матеріалів і геометрію установок і зразка та генерує події, що супроводжують проходження вихідної частинки (бета або гамма) і всіх частинок, що утворюються при їхній взаємодії з речовиною. Було забезпечено високу точність визначення фактично отриманих доз опромінення [126]. За обох варіантів впливу спостерігали в лімфоцитах дозозалежне лінійне зростання нестабільних хромосомних обмінів із супровідним парним фрагментом. За умов внутрішнього опромінення (обумовленого в основному бета-частинками), на відміну від зовнішнього (гамма-квантами), розподіл аберацій по клітинах був наддисперсним, починаючи з дози 0,18 Гр, а ефективність за виходом маркерних пошкоджень була у 2,9 рази більшою. Проте, за результатами ґрунтовного мікродозиметричного аналізу змодельованих методом Монте-Карло внутрішнього і зовнішнього опроміненень ^{137}Cs ідеальних клітинних систем, ВБЕ внутрішнього опромінення радіоізотопом по відношенню до його зовнішнього впливу не перебільшує 1,04 [127]. У ході виконання нашого дослідження було виявлено, що після припинення забруднення крові $^{137}\text{CsCl}$ в суспензії відмитих від радіоізотопу клітин залишається до 6% радіоактивності від первинно введеної у зразок (при 0,01 % в промивному середовищі). Тобто, під час наступного культивування клітин для отримання метафазних пластинок лімфоцитів вони продовжували опромінюватися. За нашими розрахунками лімфоцити отримали додатково дози опромінення, що становили 20 - 25 % від доз отриманих G_0 лімфоцитами під час контамінації зразків крові [128]. Підтвердженням опромінення проліферуючих лімфоцитів є виявлене в них залежне від дози зростання хроматидних аберацій за відсутності такого в опроміненних зовні клітинах. Отже, цитогенетична ефективність внутрішнього опромінення лімфоцитів крові людини ^{137}Cs *in vitro* зумовлюється сумарною дією радіоізотопу на клітини під час забруднення крові (в стані мітичного спокою) та під час їхнього культиву-

вання (в стані проліферації). У зв'язку з цим вважаємо, що для коректного порівняльного визначення цитогенетичної ефективності внутрішнього (бета-частинками) і зовнішнього (гамма-квантами) опромінення, необхідно внести поправку на вихід аберацій у лімфоцитах під час їхнього культивування згідно з протоколом цитогенетичного дослідження. Останнє повинно бути предметом окремого вивчення, оскільки радіочутливість лімфоцитів у стані проліферації і в стані мітотичного спокою в периферичній крові відрізняється.

Отримана нами залежність «доза - ефект» за виходом нестабільних хромосомних обмінів із супровідним парним фрагментом у лімфоцитах людини *in vitro* може бути використана для оцінки поглинутих доз під час аварійних ситуацій, пов'язаних із надходженням радіоізоотопу ^{137}Cs до організму, як доповнення до результатів вимірювання методами фізичної дозиметрії або у разі відсутності останніх.

Підсумовуючи вищевикладене в представленому огляді даних літератури, можна констатувати, що:

радіоізотопи цезію є антропогенними ізотопами, надходження яких у довкілля зумовлено випробуваннями ядерної зброї та радіаційними аваріями на об'єктах ядерно-промислового комплексу;

у процесі обстеження осіб, потерпілих за радіаційних аварій, пов'язаних з ^{137}Cs , були значною мірою розроблені, апробовані і оптимізовані цитогенетичні методи оцінки доз зовнішнього опромінення, зумовленого гамма-квантами. Для визначення отриманих доз опромінення застосовували калібрувальні криві залежності виходу

маркерів опромінення в лімфоцитах крові людини *in vitro*, побудовані з використанням джерела ^{60}Co . Оскільки енергія гамма-квантів ^{137}Cs і ^{60}Co суттєво відрізняється і наявні на сьогодні порівняльні дані з цитогенетичної ефективності цих двох радіоізоотопів неоднозначні, вважаємо, що при проведенні біодозиметрії осіб опромінених джерелом ^{137}Cs , необхідно використовувати калібрувальні залежності «доза - ефект» для даного радіоізоотопу;

цитогенетична дозиметрія внутрішнього опромінення від інкорпорованого ^{137}Cs , що зумовлене переважно бета-частинками і є завжди пролонгованим, набагато складніша і знаходиться на початковому етапі розробки. Вважаємо, що калібрувальна залежність «доза - ефект» за виходом маркерів опромінення у лімфоцитах людини за пролонгованого забруднення крові $^{137}\text{CsCl}$ *in vitro* може використовуватися для цитогенетичної дозиметрії внутрішнього опромінення осіб, потерпілих від надходження ^{137}Cs до організму;

виявлена більша цитогенетична ефективність внутрішнього опромінення ^{137}Cs лімфоцитів крові людини *in vitro*, порівняно із його зовнішнім впливом, обумовлена сумарною дією радіонукліда на клітини (в стадії мітотичного спокою) під час контамінації крові і дією під час наступного культивування згідно з протоколом цитогенетичного дослідження (в стані проліферації) через утримання радіоізоотопу в клітинах;

для коректного порівняльного визначення цитогенетичної ефективності бета-частинок і гамма-квантів ^{137}Cs на лімфоцити людини *in vitro* необхідно внести поправку на вихід аберацій під час культивування клітин.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2000. Report to the General Assembly. Vol. 1 (New York, UN, 2000) 654 p.
2. Toxicological profile for cesium. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (U.S., Department of Health and Human Services. Public Health Service, 2004) 306 p.
3. Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident. Report by the International Nuclear Safety Advisory Group. Safety Series No. 75-INSAG-1 (Vienna, IAEA, 1986) 106 p.
4. Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine. The Chernobyl Forum: 2003 - 2005. Second revised version (Vienna, IAEA, 2006) 55 p.
5. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and their Remediation: Twenty Years of Experience. Report of the Chernobyl Forum Expert Group 'Environment' (Vienna, IAEA, 2006) 180 p.
6. *Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред*. Под ред. Ю. А. Израэля (Ленинград: Гидрометеоздат, 1990) 296 с. / Y.A. Izrael (Ed.) *Chernobyl: Radioactive Contamination of the Environment* (Leningrad: Gidrometeoizdat, 1990) 296 p. (Rus)
7. The Fukushima Daiichi Accident. Technical volume 1/5. Description and Context of the Accident (Vienna, IAEA, 2015) 238 p.
8. G. Nordberg, B. Fowler, M. Nordberg (Eds.). *Handbook on the Toxicology of Metals*. 4th ed. (Elsevier/Academic Press, 2014) 1542 p.
9. W. Penney et al. Report on the accident at Windscale No. 1 Pile on 10 October 1957. *J. Radiol. Prot.* 37(3) (2017) 780.
10. S. Jones. Windscale and Kyshtym: a double anniversary. *J. Environ. Radioactiv.* 99(1) (2008) 1.
11. *The Radiobiological Accident in Goiânia* (Vienna, IAEA, 1988).

12. A. Wojcik et al. Cytogenetic damage in lymphocytes for the purpose of dose reconstruction: a review of three recent radiation accidents. *Cytogenet. Genome Res.* 104(1-4) (2004) 200.
13. Л.А. Ильин и др. Ранние медицинские последствия радиационных происшествий на территории бывшей УССР. Медицина труда и промышленная экология 10 (2012) 10. / L.A. Pyin et al. Early medical consequences of radiation incidents on the territory of the former Ukrainian SSR. *Meditsina Truda i Promyshlennaya Ekologiya* 10 (2012) 10. (Rus)
14. A. Ghosh, A. Sharma, G. Talukder. Clastogenic effects of caesium chloride on human peripheral blood lymphocytes in vitro. *Toxicol. in Vitro* 7(2) (1993) 137.
15. R. Santos-Mello, T. Schmidt, E. Neuhauss. Induction of micronuclei by CsCl in vivo and in vitro. *Mutat. Res.* 446(2) (1999) 239.
16. S. Bangh et al. Prolonged QT and polymorphic VT with chronic cesium use. *J. Toxicol.-Clin. Toxic.* 39(5) (2001) 556.
17. N.S. Harik, C.D. Stowe, P.M. Seib. Cesium induced prolonged QT syndrome. *J. Invest. Med.* 50(1) (2002) 141A.
18. R. Santos-Mello, L.I. Deimling, A. Almeida. Induction of micronuclei in mouse polychromatic erythrocytes by the administration of non-radioactive CsCl by the oral and intraperitoneal route. *Mutat. Res.* 497(1-2) (2001) 147.
19. P. Olivier, D. Marzin. Study of the genotoxic potential of 48 inorganic derivatives with the SOS chromotest. *Mutat. Res.* 189 (1987) 263.
20. http://www.lnhb.fr/nuclides/Cs-137_tables.pdf
21. http://www.lnhb.fr/nuclides/Cs-134_tables.pdf
22. В.Ф. Козлов. *Справочник по радиационной безопасности* (Москва: Энергоатомиздат, 1991) 352 с. / V.F. Kozlov. *Handbook of Radiation Safety* (Moskva: Energoatomizdat, 1991) 352 p. (Rus)
23. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. Part 1. ICRP Publication 56. *Ann. ICRP* 20(2) (1989).
24. Age-Dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides. Part 2. Ingestion Dose Coefficients. ICRP Publication 67. *Ann. ICRP* 23(3/4) (1993).
25. L.A. Beaugé, R.A. Sjodin. Transport of caesium in frog muscle. *J. Physiol.* 194(1) (1968) 105.
26. Y.I. Bandazhevsky. Chronic Cs-137 incorporation in children's organs. *Swiss. Med. Wkly.* 133(35-36) (2003) 488.
27. R.W. Leggett et al. A physiologically based biokinetic model for cesium in the human body. *Sci. Total Environ.* 317(1-3) (2003) 235.
28. *Le Césium: De l'environnement à l'Homme*. D. Robeau, F. Daburon, H. Métivier (Eds.) (EDP Sciences, 2000). 296 p.
29. D.R. Melo et al. A biokinetic model for ¹³⁷Cs. *Health Phys.* 73(2) (1997) 320.
30. Limits for Intakes of Radionuclides by Workers. ICRP Publication 30 (Part 1). *Ann. ICRP* 2(3-4) (1979) 133 p.
31. W. Müller, U. Scheffer. The metabolism and toxicity of caesium. In: *Radionuclide Metabolism and Toxicity*. P. Galle, R. Masse (Eds.) (Paris, Masson, 1982) p. 82.
32. *The Radiological Accident in Tammiku* (Vienna, IAEA, 1998) 70 p.
33. *The Radiological Accident in Lilo* (Vienna, IAEA, 2000) 120 p.
34. J.L. Lipsztein et al. Application of in vitro bioassay for ¹³⁷Cs during the emergency phase of the Goiânia accident. *Health Phys.* 60(1) (1991) 43.
35. J.L. Lipsztein et al. Studies of Cs retention in the human body related to body parameters and Prussian Blue administration. *Health Phys.* 60(1) (1991) 57.
36. R. Leggett. Biokinetic models for radiocaesium and its progeny. *J. Radiol. Prot.* 33(1) (2013) 123.
37. G. Schwartz, D.E. Dunning, Jr. Imprecision in estimates of dose from ingested ¹³⁷Cs due to variability in human biological characteristics. *Health Phys.* 43(5) (1982) 631.
38. J. Rundo, F.M. Turner. On the biological half-life of caesium in pregnant women and in infants. *Radiat. Prot. Dosim.* 41 (1992) 211.
39. A. Giussani et al. Eurados review of retrospective dosimetry techniques for internal exposures to ionising radiation and their applications. *Radiat. Environ. Bioph.* (59) (2020) 357.
40. N.A. Doggett, W.H. McKenzie. An analysis of the distribution and dose response of chromosome aberrations in human lymphocytes after in vitro exposure to ¹³⁷Cesium gamma radiation. *Radiat. Environ. Bioph.* 22(1) (1983) 33.
41. L. Padovani et al. Cytogenetic study in lymphocytes from children exposed to ionizing radiation after the Chernobyl accident. *Mutat. Res.* 319(1) (1993) 55.
42. S.M. Miller et al. Canadian Cytogenetic Emergency Network (CEN) for biological dosimetry following radiological/nuclear accidents. *Int. J. Radiat. Biol.* 83(7) (2007) 471.
43. V. Hadjidekova et al. The use of the dicentric assay for biological dosimetry for radiation accident in Bulgaria. *Health Phys.* 98(2) (2010) 252.
44. A.N. Balasem, A.S.K. Ali, J.J. Abdul-Khaliq. The Yield of Micronuclei in Human Blood Lymphocytes Treated with Radioactive Caesium. *Radiat. Prot. Dosim.* 46(4) (1993) 295.
45. A.N. Balasem, A.S.K. Ali. Establishment of dose-response relationships between doses of Cs-137 γ -rays and frequencies of micronuclei in human peripheral blood lymphocytes. *Mutat. Res.* 259 (1991) 133.
46. K. Lijima K. Morimoto. Quantitative analyses of the induction of chromosome aberrations and sister-chromatid exchanges in human lymphocytes exposed to gamma-rays and mitomycin-C in combination. *Mutat. Res.* 263(4) (1991) 263.
47. K. Mikamo, Y. Kamiguchi, H. Tateno. Spontaneous and in vitro radiation-induced chromosome aberrations in human spermatozoa: application of a new method. *Prog. Clin. Biol. Res.* 340B (1990) 447.
48. K. Mikamo, Y. Kamiguchi, H. Tateno. The interspecific *in vitro* fertilization system to measure human

- sperm chromosomal damage. In: B.L. Gledhill, F. Mauro (Eds.) *New Horizons in Biological Dosimetry* (New York, Wiley-Liss, 1991) p. 531.
49. Y. Kamiguchi, H. Tateno, K. Mikamo. Micronucleus test in 2-cell embryos as a simple assay system for human sperm chromosome aberrations. *Mutat. Res.* 252(3) (1991) 297.
 50. N.C. Arslan, C.R. Geard, E.J. Hall. Low dose-rate effects of cesium-137 and iodine-125 on cell survival, cell progression, and chromosomal alterations. *Am. J. Clin. Oncol.* 9(6) (1986) 521.
 51. M. Bauchinger. Chromosome painting and biological dosimetry of absorbed radiation. In: *Radiation Research, 1895 - 1995: Proceedings of the Tenth International Congress of Radiation Research*. Würzburg, Germany, August 27 - September 1, 1995 (Germany, ICR Society, 1995).
 52. M.A Silva, M. Lemes, O.R. Santos. Study of chromosome aberrations induced in human lymphocytes following irradiation with ^{60}Co and ^{137}Cs in vitro. In: *4th Meeting on Nuclear Applications, Encontro Nacional de Aplicacoes Nucleares*, August 18 - 22, 1997, Pocos de Caldas, p. 129.
 53. N.A. Maznyk, V.A. Vinnikov. Calibration dose-response relationships for cytogenetic biodosimetry of recent and past exposure to low dose gamma-radiation. *Ukrayins'kyy Radiolohichnyy Zhurnal* 12(4) (2004) 415.
 54. *Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies* (Vienna, IAEA, 2011) 229 p.
 55. *Radiation protection. Performance criteria for service laboratories performing biological dosimetry by cytogenetics*. ISO 19238:2023(en). 36 p.
 56. *Cytogenetic Analysis for Radiation Dose Assessment*. Technical Reports Series No. 405 (Vienna, IAEA, 2001) 138 p.
 57. G. Obe, Vijayalaxmi (Eds.). *Chromosomal Alterations. Methods, Results and Importance in Human Health*. (Springer, 2007) 515 p.
 58. K.H. Harada et al. Radiation dose rates now and in the future for residents neighboring restricted areas of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 111(10) (2014) E914.
 59. J. Depuydt et al. RENEB intercomparison exercises analyzing micronuclei (Cytokinesis-block Micronucleus Assay). *Int. J. Radiat. Biol.* 93 (2016) 36.
 60. C. Beinke et al. Adaption of the Cytokinesis-Block Micronucleus Cytome Assay for Improved Triage Biodosimetry. *Radiat. Res.* 185(5) (2016) 461.
 61. *Radiological protection. Performance criteria for laboratories using the cytokinesis block micronucleus (CBMN) assay in peripheral blood lymphocytes for biological dosimetry*. ISO 17099:2014.
 62. A.J. Sigurdson et al. International study of factors affecting human chromosome translocations. *Mutat. Res.* 652(2) (2008) 112.
 63. E.A. Ainsbury et al. What radiation dose does the FISH translocation assay measure in cases of incorporated radionuclides for the Southern Urals populations? *Radiat. Prot. Dosim.* 159(1-4) (2014) 26.
 64. E.A. Ainsbury et al. Uncertainty on radiation doses estimated by biological and retrospective physical methods. *Radiat. Prot. Dosim.* 178(4) (2018) 382.
 65. E.J. Tawn, C.A. Whitehouse. Persistence of translocation frequencies in blood lymphocytes following radiotherapy: implications for retrospective radiation biodosimetry. *J. Radiol. Prot.* 23 (2003) 423.
 66. C. Lindholm, A. Edwards. Long-term persistence of translocations in stable lymphocytes from victims of a radiological accident. *Int. J. Radiat. Biol.* 80(8) (2004) 559.
 67. A.A. Edwards et al. Review of translocations detected by FISH for retrospective biological dosimetry applications. *Radiat. Prot. Dosim.* 113(4) (2005) 396.
 68. U. Yadav et al. Multifaceted applications of premature chromosome condensation in radiation biodosimetry. *Int. J. Radiat. Biol.* 96(10) (2020) 1274.
 69. F. Darroudi et al. Detection of total- and partial-body irradiation in a monkey model: a comparative study of chromosomal aberration, micronucleus and premature chromosome condensation assays. *Int. J. Radiat. Biol.* 74(2) (1998) 207.
 70. U. Yadav et al. Refined premature chromosome condensation (GO-PCC) with cryo-preserved mitotic cells for rapid radiation biodosimetry. *Sci. Rep.* 11(1) (2021) 1.
 71. C. Lindholm et al. Premature chromosome condensation (PCC) assay for dose assessment in mass casualty accidents. *Radiat. Res.* 173(1) (2010) 71.
 72. B. Rungsimaphorn, B. Rerkamnuaychoke, W. Sudprasert. Establishment of dose-response curves for dicentric and premature chromosome condensation for radiological emergency preparedness in Thailand. *Genome Integr.* 7(8) (2016) 1.
 73. U. Oestreicher et al. RENEB intercomparisons applying the conventional Dicentric Chromosome Assay (DCA). *Int. J. Radiat. Biol.* 93(1) (2017) 20.
 74. C.A. Oliveira et al. Design and operation of a whole-body monitoring system for the Goiânia radiation accident. *Health Phys.* 60(1) (1991) 51.
 75. C.E. Brandão-Mello et al. Clinical and hematological aspects of ^{137}Cs : the Goiânia radiation accident. *Health Phys.* 60(1) (1991) 31.
 76. E.T. Sakamoto-Hojo, A.T. Natarajan, M.P. Curado. Chromosome translocations in lymphocytes from individuals exposed to ^{137}Cs 7.5 years after the accident in Goiânia (Brazil). *Radiat. Prot. Dosim.* 86(1) (1999) 25.
 77. J.G. Hunt, C.A.N. Oliveira. A method for estimating ^{137}Cs body burden under emergency conditions. *Radiat. Prot. Dosim.* 30(4) (1990) 275.
 78. A.T. Ramalho et al. *Subsidies to Cytogenetic Dosimetry Technique Generated from Analysis of Results of Goiânia Radiological Accident*. Thesis (Brazil, 1993) 136 p. (Portuguese)
 79. A.T. Ramalho, A.C. Nascimento. The fate of chromosomal aberrations in ^{137}Cs exposed individuals in the Goiânia radiation accident. *Health Phys.* 60(1) (1991) 67.
 80. A.T. Ramalho, M.P. Curado, A.T. Natarajan. Life-span of human lymphocytes estimated during a six year cytogenetic follow-up of individuals acciden-

- tally exposed in the 1987 radiological accident in Brazil. *Mutat. Res.* 331(1) (1995) 47.
81. M. Sasaki, H. Miyata. Biological dosimetry in atomic bomb survivors. *Nature* 220 (1968) 1189.
 82. C. Lindholm et al. Biodosimetry after accidental radiation exposure by conventional chromosome analysis and FISH. *Int. J. Radiat. Biol.* 70(6) (1996) 647.
 83. C. Lindholm et al. Persistence of translocations after accidental exposure to ionizing radiation. *Int. J. Radiat. Biol.* 74(5) (1998) 565.
 84. C. Lindholm et al. Intercomparison of translocation and dicentric frequencies between laboratories in a follow-up of the radiological accident in Estonia. *Int. J. Radiat. Biol.* 78(10) (2002) 883.
 85. J.N. Lucas et al. Rapid translocation frequency analysis in humans decades after exposure to ionizing radiation. *Int. J. Radiat. Biol.* 62(1) (1992) 53.
 86. J.N. Lucas et al. Stability of the translocation frequency following whole-body irradiation measured in rhesus monkeys. *Int. J. Radiat. Biol.* 70(3) (1996) 309.
 87. G. Dolphin. Biological dosimetry with particular reference to chromosome aberrations analysis. A review of methods. In: *Handling of Radiation Accidents. Proc. Int. Symp., Vienna, May 19 - 23, 1969. Proceedings Series (Vienna, IAEA, 1969) p. 215.*
 88. A.T. Natarajan et al. Goiânia radiation accident: results of initial dose estimation and follow up studies. *Prog. Clin. Biol. Res.* 372 (1991) 145.
 89. Л.К. Бездробная и др. Использование цитогенетической дозиметрии для контроля потенциального переоблучения персонала подрядных предприятий ГСП ЧАЭС. *Ядерная физика та енергетика* 17(2) (2016) 166. / L.K. Bezdrobna et al. Using the cytogenetic dosimetry for the control of potential over exposure of contractors enterprises staff of SSE ChNPP. *Nucl. Phys. At. Energy* 17(2) (2016) 166. (Rus)
 90. M.A. Pilinskaya. The results of selective cytogenetic monitoring of Chernobyl accident victims in the Ukraine. *Health Phys.* 71(1) (1996) 29.
 91. Н. Мазник, В. Винников. Зависимость «время - эффект» для уровня нестабильных хромосомных обменов у ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС. *Цитология і генетика* 38(4) (2004) 14. / N. Maznyk, V. Vinnikov. Time-effect relationship for unstable chromosome exchange levels in Chernobyl clean-up workers. *Tsitologiya i Genetika* 38(4) (2004) 14. (Rus)
 92. S. Alexanin et al. Chromosomal aberrations and sickness rates in Chernobyl clean-up workers in the years following the accident. *Health Phys.* 98(2) 2010 258.
 93. F. Granath et al. Retrospective dose estimates in Estonian Chernobyl clean-up workers by means of FISH. *Mutat. Res.* 369(1-2) (1996) 7.
 94. A.V. Sevan'kaev et al. Chromosomal aberrations in lymphocytes of residents of areas contaminated by radioactive discharges from the Chernobyl accident. *Radiat. Prot. Dosim.* 58(4) (1995) 247.
 95. Н.О. Мазник. Цитогенетичні ефекти як біологічний індикатор дії іонізуючої радіації в низьких дозах у ранні та віддалені строки після опромінення у осіб чорнобильського контингенту. Автореф. дис. ... д-ра біол. наук (К., Науковий центр радіаційної медицини АМН України, 2005) 46 с. / N.O. Maznyk. Cytogenetic effects as a biological indicator of the action of ionizing radiation in low doses in the early and long term after exposure in the Chernobyl contingent. Thesis Abstract for the degree of Doctor of Sciences in Biology (Kyiv, Scientific Center of Radiation Medicine, Academy of Medical Sciences of Ukraine, 2005) 46 p. (Ukr)
 96. J.N. Lucas et al. Rapid human chromosome aberration analysis using fluorescence *in situ* hybridization. *Int. J. Radiat. Biol.* 56(1) (1989) 35.
 97. И.Е. Воробцова и др. Зависимость частоты стабильных и нестабильных aberrаций хромосом от дозы облучения лимфоцитов человека *in vitro*. Радиационная биология. Радиоэкология 37(2) (1997) 233. / I.E. Vorobtsova et al. Dependence of the frequency of stable and unstable chromosome aberrations on the irradiation dose of human lymphocytes *in vitro*. *Radiation Biology. Radioecology* 37(2) (1997) 233. (Rus)
 98. Е.А. Дьоміна та ін. Біологічна ефективність гамма-квантів ^{137}Cs на хромосомному рівні периферичних лімфоцитів людини. Доповіді АН України 2 (1992) 150. / E.A. Dyomina et al. Biological effectiveness of ^{137}Cs gamma quanta at the chromosomal level of human peripheral lymphocytes. *Dopovidi Akademiyi Nauk Ukrainy (Reports of the Academy of Sciences of Ukraine)* 2 (1992) 150. (Ukr)
 99. Е.А. Дьоміна. Біологічна ефективність гамма-випромінювання ^{137}Cs за виходом хромосомних aberrаций в культурі лімфоцитів периферичної крові людини. Укр. радіологіч. журн. 2 (1993) 107. / E.A. Demina. Biological effectiveness of ^{137}Cs gamma radiation on the outcome of chromosomal aberrations in human peripheral blood lymphocyte culture. *Ukrayins'kyu Radiolohichnyy Zhurnal* 2 (1993) 107. (Ukr)
 100. Ю.Б. Кудряшов, Ю.Ф. Перов, А.Б. Рубин. *Радиационная биофизика: радиочастотные и микроволновые электромагнитные излучения.* Учебник для вузов (Москва: Физматлит; 2008). 184 с. / Yu.B. Kudryashov, Yu.F. Perov, A.B. Rubin. *Radiation Biophysics: Radio Frequency and Microwave Electromagnetic Radiation.* Textbook (Moskva: Fizmatlit; 2008). 184 p. (Rus)
 101. О.М. Міхеєв, Ю.В. Шиліна. *Електромагнітне випромінювання.* У кн.: *Енциклопедія сучасної України.* І.М. Дзюба, А.І. Жуковський, М.Г. Железняк та ін. (ред.) Т. 9 (К.: Ін-т енциклопед. дослід. НАН України, 2009). / O.M. Mikheev, Yu.V. Shilina. *Electromagnetic Radiation.* In: *Encyclopedia of Modern Ukraine.* I.M. Dzyuba, A.I. Zhukovskiy, M.H. Zheleznyak et al. (Eds.) Vol. 9 (Kyiv: Institute of Encyclopedic Research, National Academy of Sciences of Ukraine, 2009). (Ukr)

102. В.А. Курочкіна та ін. Калібрувальна залежність «доза-ефект» за частотою нестабільних хромосомних обмінів у лімфоцитах людини за гострого гамма-опромінення ^{137}Cs в низьких дозах для біологічної дозиметрії. *Ядерна фізика та енергетика* 22 (2021) 167. / V.A. Kurochkina et al. "Dose – effect" calibration dependence by frequency of unstable chromosomal exchanges in human lymphocytes in acute gamma irradiation by ^{137}Cs in low doses for biological dosimetry. *Nucl. Phys. At. Energy* 22(2) (2021) 167. (Ukr)
103. Radiation dose to patients from radiopharmaceuticals: A compendium of current information related to frequently used substances. ICRP Publication 128. *Ann. ICRP* 44(2S) (2015) 325 p.
104. Occupational intakes of radionuclides: Part 1. ICRP Publication 130. *Ann. ICRP* 44(2) (2015) 192 p.
105. The ICRP computational framework for internal dose assessment for reference adults: Specific absorbed fractions. ICRP Publication 133. *Ann. ICRP* 45(2) (2016) 77 p.
106. Occupational intakes of radionuclides: Part 3. ICRP Publication 137. *Ann. ICRP* 46(3/4) (2017) 491 p.
107. D.R. Melo et al. ^{137}Cs internal contamination involving a Brazilian accident, and the efficacy of Prussian Blue treatment. *Health Phys.* 66(3) (1994) 245.
108. A.T. Ramalho, A.C.H. Nascimento, A.T. Natarajan. Dose assessments by cytogenetic analysis in the Goiânia (Brazil) radiation accident. *Radiat. Prot. Dosim.* 25(2) (1988) 97.
109. One Decade After Chernobyl. Summing up the Consequences of the Accident. Proc. of an Int. Conf., Vienna, 8 - 12 April 1996 (Vienna, IAEA, 1996) 571 p.
110. V. Berkovski, G. Ratia, O. Nasvit. Internal doses to Ukrainian population using Dnieper river water. *Health Phys.* 71 (1996) 37.
111. S.L. Simon et al. A summary of evidence on radiation exposures received near to the Semipalatinsk nuclear weapons test site in Kazakhstan. *Health Phys.* 84(6) (2003) 718.
112. Е. Шишкіна и др. Снижение погрешности измерения содержания ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{40}K в организме человека с помощью счетчика всего тела СИЧ91М. Инструменты и методы измерения радиации 90 (2017) 25. / E. Shishkina et al. Reduction of measurement error of ^{90}Sr , ^{137}Cs and ^{40}K content in human body using the СИЧ91М whole body counter. *Instrumenty i Metody Izmereniya Radiatsii* 90 (2017) 25. (Rus)
113. S. Roch-Lefèvre et al. A mouse model of cytogenetic analysis to evaluate caesium 137 radiation dose exposure and contamination level in lymphocytes. *Radiat. Environ. Bioph.* 55 (2016) 61.
114. M.P. Little, B.E. Lambert. Systematic review of experimental studies on the relative biological effectiveness of tritium. *Radiat. Environ. Bioph.* 47 (2008) 71.
115. S. Roch-Lefèvre et al. Cytogenetic damage analysis in mice chronically exposed to low-dose internal tritium beta-particle radiation. *Oncotarget* 9 (2018) 27397.
116. Г.П. Снегирева, Т.И. Хаймович, В.И. Нагиба. Оценка относительной биологической эффективности трития по частоте хромосомных аберраций в лимфоцитах Радиационная биология. Радиоэкология 50(6) (2010) 664. / G.P. Snegireva, T.I. Khaimovich, V.I. Nagiba. Estimation of the relative biological effectiveness of tritium based on the frequency of chromosomal aberrations in lymphocytes. *Radiation Biology. Radioecology* 50(6) (2010) 664. (Rus)
117. N. Vulpis. The induction of chromosome aberrations in human lymphocytes by *in vitro* irradiation with beta-particles from tritiated water. *Radiat. Res.* 97(3) (1984) 511.
118. N. Vulpis, G. Scarpa. Induction of chromosome aberrations by ^{90}Sr β -particles in cultured human lymphocytes. *Mutat. Res.* 63 (1986) 277.
119. E.J. Broome, D.L. Brown, R.E.J. Mitchel. Dose responses for adaption to low doses of ^{60}Co gamma rays and ^3H beta particles in normal human fibroblasts. *Radiat Res.* 158(2) (2002) 181.
120. W. Deng et al. Biological dosimetry of beta-ray exposure from tritium using chromosome translocations in human lymphocytes analyzed by fluorescence *in situ* hybridization. *Radiat. Res.* 150(4) (1998) 400.
121. G. Ribas et al. Genotoxicity of tritiated water in human lymphocytes. *Toxicol. Lett.* 70(1) (1994) 63.
122. J.S. Prosser et al. The induction of chromosome aberrations in human lymphocytes by exposure to tritiated water *in vitro*. *Radiat. Prot. Dosim.* 4(1) (1983) 21.
123. G. Joksić, V. Spasojević-Tisma. Chromosome analysis of lymphocytes from radiation workers in tritium-applying industry. *Int. Arch. Occup. Environ. Health* 71(3) (1998) 213.
124. E.M. de Oliveira et al. Evaluation of the effect of ^{90}Sr beta-radiation on human blood cells by chromosome aberration and single cell gel electrophoresis (comet assay) analysis. *Mutat. Res.* 476(1-2) (2001) 109.
125. Relative biological effectiveness (RBE), quality factor (Q), and radiation weighting factor (W_R). ICRP Publication 92. *Ann. ICRP* 33(4) (2003) 121 p.
126. L.K. Bezdrobna et al. Simulation of conditions for external and internal exposure of human blood to low doses of ^{137}Cs radionuclide *in vitro* to study its genotoxicity. *Nucl. Phys. At. Energy* 21(2) (2020) 166.
127. T. Sato, K. Manabe, N. Hamada. Microdosimetric analysis confirms similar biological effectiveness of external exposure to gamma-rays and internal exposure to ^{137}Cs , ^{134}Cs , and ^{131}I . *Plos One* 9(6) (2014) e99831.
128. В.А. Курочкіна та ін. Хромосомні аберації у лімфоцитах людини за зовнішнього та/або внутрішнього опромінення зразків крові ^{137}Cs у модельних експериментах *in vitro*. *Ядерна фізика та енергетика* 22(3) (2021) 300. / V.A. Kurochkina et al. Chromosome aberrations in human lymphocytes due to external and/or internal irradiation of blood samples by ^{137}Cs in model experiments *in vitro*. *Nucl. Phys. At. Energy* 22(3) (2021) 300. (Ukr)

V. A. Kurochkina*

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

*Corresponding author: knitel@ukr.net

**RADIOISOTOPES OF CESIUM AND EXPERIENCE OF CYTOGENETIC DOSIMETRY
IN EMERGENCY SITUATIONS**

An analysis of data from the literature and own experimental studies related to radiation accidents with ^{137}Cs , the ways of its entry and behavior in the human body, cytogenetic indicators for exposure dosimetry, experience in assessing the dose of victims under conditions of external exposure, and the problem of cytogenetic dosimetry of internal exposure are presented.

Keywords: cesium radioisotopes, ^{137}Cs , radiation accidents, external exposure, internal exposure, cytogenetic dosimetry.

Надійшла/Received 17.06.2023