

<https://doi.org/10.15407/frg2024.03.213>

УДК 575.224.4:633.111

## ЦИТОГЕНЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ІНДУКОВАНИХ МУТАЦІЙ У ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АЕС ЧЕРЕЗ 35 РОКІВ ПІСЛЯ АВАРІЇ

Р.А. ЯКИМЧУК, В.В. МОРГУН, В.О. СКРИПЛЬОВ

*Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України  
03022 Київ, вул. Васильківська, 31/17  
e-mail: peoplenature16@gmail.com*

Вивчено мутагенну активність радіонуклідного забруднення ґрунту території зони відчуження Чорнобильської АЕС через 35 років після аварії. За допомогою ана-телофазного методу проведено цитогенетичний аналіз клітин кореневої меристеми проростків *Triticum aestivum* L. сортів Смуглянка і Богдана, що зазнали пролонгованого впливу радіонуклідних забруднень ґрунту в межах 10-км зони Чорнобильської АЕС (села Копачі, Чистогалівка та Янів). Питома активність  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  становила 4,5–28,2 кБк/кг. За контроль взято ґрунт території с-ща Глеваха Фастівського р-ну Київської обл., питома радіоактивність якого становить 0,29 кБк/кг. Частота аберантних клітин, індукованих радіонуклідним забрудненням ґрунту, перевищує контрольний рівень у 3,5–7,5 разів. Прямої залежності між частотою аберантних клітин і питомою радіоактивністю ґрунту не виявлено. Спектр хромосомних порушень включає типові для умов впливу іонізуючого випромінювання парні фрагменти і мости, співвідношення яких варіює в межах 1,0–7,2. Мутагенна дія радіонуклідного забруднення ґрунту спричинює розширення спектра хромосомних аберацій та аномалій мітозу, які включають хромосомні ацентричні кільця, мікроядра, хромосоми, що відстають. Індукування в результаті пролонгованого впливу радіонуклідних забруднень ґрунту хромосом, що відстають, свідчить про анеугенну дію мутагенного чинника. Мутагенна дія радіонуклідів ґрунту зони відчуження Чорнобильської АЕС супроводжується появою клітин з множинними абераціями, частка яких виявляє обернену залежність від щільності радіонуклідного забруднення, що може ураховуватись під час проведення радіоекологічного моніторингу навколишнього природного середовища. Результати багаторічних досліджень генетичних наслідків Чорнобильської катастрофи та аварій на ядерних об'єктах інших країн свідчать про довготривалу радіаційну загрозу стабільності генома живих організмів і слугують підставою для включення до державної екологічної програми проведення систематичного генетичного моніторингу на територіях, що постраждали від радіонуклідного забруднення та поблизу радіаційно небезпечних об'єктів.

**Ключові слова:** *Triticum aestivum* L., радіонуклідне забруднення, питома радіоактивність, хромосомні аберації.

Цитування: Якимчук Р.А., Моргун В.В., Скрипльов В.О. Цитогенетичний аналіз індукованих мутацій у зоні відчуження Чорнобильської АЕС через 35 років після аварії. *Фізіологія рослин і генетика*. 2024. 56, № 3. С. 213–229. <https://doi.org/10.15407/frg2024.03.213>

Одним з найнебезпечніших чинників, здатних руйнувати органічні молекули та діяти як фактор стресу для цілих екосистем, є іонізувальне випромінювання. Особливий ризик для організмів становлять неконтрольовані радіоактивні викиди, які можуть спричинювати гостре опромінення високими дозами та зберігати тривалий час свою активність на забруднених територіях [1]. Починаючи з другої половини ХХ ст. внаслідок антропогенної діяльності площі радіоактивно забруднених територій почали істотно зростати, що змусило шукати шляхи розв'язання проблеми радіозахисту людини та біоти. Констатують, що з техногенним забрудненням навколишнього середовища розпочалась нова епоха розвитку Землі — антропоцен, початок якої пов'язаний з вибухами перших атомних бомб у 1945 р. на полігоні Аламогордо в Нью-Мексико та скинутих на Хіросиму і Нагасакі [2]. На заводах з виготовлення бомб і військових об'єктах сталася незліченна кількість аварій, які призвели до викиду величезної кількості радіоактивних відходів у навколишнє середовище [3].

Іншим вкрай небезпечним джерелом зростання радіоактивності в навколишньому середовищі є ядерні аварії на АЕС, найбільша з яких сталася на Чорнобильській АЕС [4]. Вона призвела до викиду в атмосферу  $1,85 \cdot 10^{18}$  Бк радіоактивних ізотопів і забруднення ними Європи та Євразії на площі понад 200 тис. км<sup>2</sup>. Внаслідок цього для багатьох мільйонів людей річний рівень опромінення в індивідуальному діапазоні доз зріс від допустимої межі у 100 разів. У зв'язку з великою кількістю у світі атомних електростанцій та зростанням імовірності виникнення радіаційних аварій, на сьогодні комплексна оцінка біологічних наслідків аварії на Чорнобильській АЕС стає актуальною проблемою [5]. Результати численних наукових досліджень, що розпочалися одразу після Чорнобильської катастрофи, були покладені в основу математичних моделей для прогнозування впливу на екосистему наслідків найбільшої в нинішньому столітті ядерної аварії на АЕС Фукусіма-Даїчі (Японія) [6, 7], викиди радіоактивності якої становлять лише 10 % від тих, що пов'язані з аварією на Чорнобильській АЕС [8].

Численними дослідженнями було продемонстровано підвищений рівень мутацій у популяціях тварин і рослин, що мешкають на радіонуклідно забруднених територіях, і дано оцінку генетичним наслідкам впливу радіації на людину і дику природу [9—11]. Серед негативних генетичних наслідків, викликаних гострим чи хронічним впливом радіоактивних викидів зруйнованого реактора, виявлено точкові мутації та хромосомні перебудови [12], зміни в експресії генів репарації ДНК [13], експресії теломерази та довжині теломер [14], порушення цілісності мітохондріальної ДНК [15], зниження проліферації клітин [6], пригнічення росту дерев, зростання частоти пухлин і аномалій розвитку [8], зниження інтелекту [16], прискорення старіння [17], порушення фертильності [2, 18], зменшення генетичного різноманіття та чисельності особин популяцій [12, 19], зникнення окремих видів [2, 10] тощо.

Більшість досліджень, які проводились у зоні відчуження ЧАЕС у перші роки після аварії, зводилась до вивчення на різних біологічних об'єктах генетичних наслідків гострих високих доз радіації

[10]. За час, що минув після аварії, радіаційний стан радіонуклідно забруднених територій істотно поліпшився. Цьому сприяли процеси фізичного розпаду більшості радіонуклідів та їх міграція в природному середовищі, захисні заходи, що здійснювалися в сільськогосподарському виробництві, дезактиваційні роботи та запобігання винесенню радіонуклідів за межі зони відчуження [20]. Проте навіть відносно низькі рівні радіації можуть спричинювати значні генетичні пошкодження та підвищену частоту мутацій [6], що підтверджено численними дослідженнями в лабораторних або чітко контрольованих умовах і покладено в основу безпорогової лінійної моделі [21, 22]. Цілком імовірно, що механізми залежності доза—ефект за гострого і пролонгованого опромінення в діапазоні низьких доз істотно відрізняються, а моделювання генетичних наслідків у природних умовах зони відчуження ЧАЕС ускладнюється багатьма іншими мінливими чинниками, які не мають стосунку до радіаційних наслідків аварії [8].

Порівняння та узагальнення результатів досліджень, проведених на територіях, що постраждали внаслідок ядерних аварій, полігонах випробування атомних бомб і природно радіоактивних регіонах світу дають унікальні можливості для аналізу мутагенних ефектів, спричинених окремими радіонуклідами і типами іонізуючого випромінювання [23]. Загально визнано, що найінформативнішими і найчутливішими маркерами мутагенного забруднення, зокрема й хронічного радіаційного впливу в низьких дозах, є цитогенетичні показники, а саме хромосомні аберації в клітинах рослин [24]. Оцінювання мутаційного процесу за допомогою цитогенетичного аналізу дає результати, співставні з результатами, отриманими методом електрофоретичного аналізу ізоферментів [25].

Мета роботи — вивчити частоту і спектр хромосомних аберацій, індукованих пролонгованою дією радіонуклідно забрудненого ґрунту зони відчуження ЧАЕС у віддалені строки після аварії та встановити ступінь генетичних пошкоджень абераційних клітин за кількісним розподілом множинних хромосомних перебудов.

## Методика

Мутагенну активність радіонуклідних забруднень ґрунту зони відчуження Чорнобильської АЕС вивчали на проростках пшениці м'якої озимої (*Triticum aestivum* L.) сортів Смуглянка і Богдана за допомогою цитогенетичного аналізу ана-телофазним методом. Насіння пророщували за температури 25 °С в чашках Петрі у зволожений дистильованою водою зразках ґрунту, відібраних у 2021 р. (через 35 років після аварії на Чорнобильській АЕС) в межах сіл Копачі, Чистогалівка та Янів. Питома активність  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  становила відповідно 4,5 кБк/кг, 9,3 кБк/кг і 28,2 кБк/кг. За контроль взято ґрунт з умовно чистої території с-ща Глеваха Фастівського р-ну Київської обл., в якому питома активність  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  становить 0,29 кБк/кг. Первинні корінці завдовжки 0,8—1,0 см фіксували упродовж 4 год у фіксаторі Кларка. Їх хімічну мацерацію здійснювали протягом 1 хв в 1 н розчині соляної кислоти. Після мацерації з метою аналізу хромосомних

аберацій та порушень мітозу клітин корінці вміщували в розчин ацетоорсеїну на 24 год за температури 23–25 °С.

Для мікроскопічного аналізу готували тимчасові давлені цитологічні препарати за загальноприйнятими методами [26]. У виготовленні давлених препаратів використовувалася лише апікальна частина корінця. Мікроскопічні клітини меристематичної зони вивчали з використанням мікроскопу «JENAVAL» (Carl Zeiss Jena) за збільшення 600х. Під час визначення частоти хромосомних аберацій і порушень мітозу до уваги брали клітини, які перебували в анафазі та ранній телофазі. Аналізували у триразовій повторності, вибірка становила не менше 1000 клітин, які вивчали в 15–24 первинних корінцях. Враховували частоту абераційних клітин та аномалій мітозу як відсоток клітин в анафазі та ранній телофазі, що містили такі порушення: одиничні та парні фрагменти, мости хромосомного і хроматидного типів, мікроядра, хромосомні ацентричні кільця, хромосоми, які відстають. У клітинах з хромосомними порушеннями вивчали поклітинний розподіл аберацій. При обчисленні середньої кількості аберацій на абераційну клітину враховували клітини з 1, 2, 3 і >3 абераціями та порушеннями мітозу. Статистичний аналіз експериментальних даних здійснювали загальноприйнятими методами [27], достовірність різниці оцінювали за критерієм Стюдента. У таблиці дані представлені як  $x \pm SE$  (середнє значення  $\pm$  стандартна похибка).

### Результати та обговорення

Апікальна коренева меристема, як проліферувальна тканина, має високу чутливість до генотоксичної дії фізико-хімічних чинників, що уможливорює широке її використання в ефективних генетичних біотестах з вивчення хромосомних аберацій, а аналіз їх типів є надійним біомаркером радіаційного ефекту [28]. Рівень хромосомних аберацій та аномалій мітозу, зумовлених радіонуклідним забрудненням ґрунту досліджених територій зони відчуження ЧАЕС через 35 років після аварії, значно перевищує контрольні показники. Частота абераційних клітин у 3,5–7,5 рази перевищує контрольний рівень і визначається особливостями генотипу пшениці та щільністю забруднення ґрунту (таблиця). Максимальну кількість цитогенетичних порушень — 6,04 і 4,17 %, відповідно, у сортів Смуглянка і Богдана виявлено за умов пророщування насіння у вологому ґрунті з найвищою сумарною щільністю радіонуклідного забруднення (с. Янів) (рис. 1). Істотне зростання частоти абераційних клітин виявлено і за дії на насіння нижчої щільності радіонуклідів у ґрунті (села Чистоголівка і Копачі). Рівень хромосомних перебудов перевищує контрольні показники сортів Смуглянка і Богдана відповідно у 5,8–6,8 та 3,5–4,0 рази.

Деякі дослідники обґрунтовують високу мутагенну активність радіонуклідних забруднень зони відчуження ЧАЕС у віддалені строки після аварії комбінованою дією іонізуючого опромінення та наявних у ґрунті сумішей хімічних компонентів, які включають важкі метали, органічні гетероциклічні сполуки, пестициди та інші ксенобіотики [12]. Проте беручи до уваги результати цитогенетичних

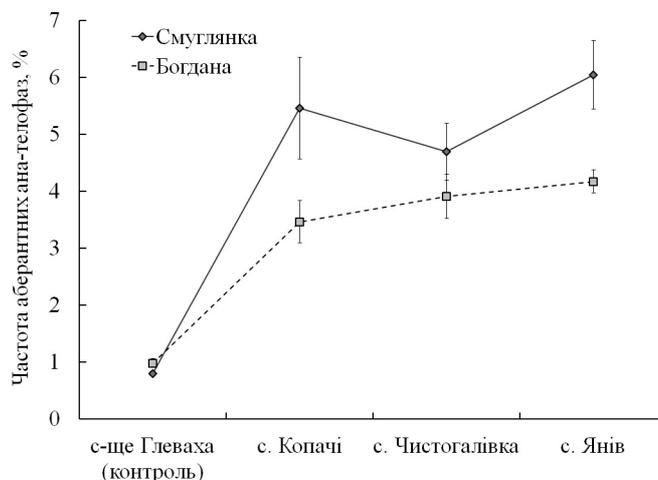
Частота і спектр хромосомних аберацій в ана-телофазних клітинах кореневої меристеми озимої пшениці, індукованих радіонуклідним забрудненням ґрунту зони відчуження ЧАЕС ( $n = 3, x \pm SE$ )

Місце відбору зразків	Частота абераційних клітин, %	Спектр хромосомних аберацій та порушень мітозу, %						хромосоми, що відстають
		фрагменти	мости	мости+фрагменти	мікроядра	хромосомні кільця		
Смуглянка								
с-ще Глеваха (контроль)	0,80±0,02	0,74±0,02	0,06±0,04	0	0	0	0	0
с. Копачі	5,46±0,89**	3,43±1,00	1,46±0,22**	0,04±0,04	0,18±0,12	0	0	0,35±0,12*
с. Чистоголівка	4,69±0,50**	3,74±0,70*	0,52±0,18	0,10±0,06	0	0,07±0,03	0	0,26±0,21
с. Янів	6,04±0,60***	4,12±1,16*	1,73±0,22**	0	0	0	0	0,19±0,05*
Богдана								
с-ще Глеваха (контроль)	0,98±0,08	0,34±0,06	0,34±0,11	0	0	0	0	0,30±0,10
с. Копачі	3,46±0,37**	1,93±0,43*	0,97±0,33	0,11±0,05	0,15±0,15	0,10±0,05	0,10±0,05	0,20±0,19
с. Чистоголівка	3,91±0,39**	2,21±0,32**	1,39±0,22*	0,06±0,04	0	0,09±0,08	0	0,16±0,13
с. Янів	4,17±0,20***	1,72±0,23**	1,75±0,17**	0,16±0,16	0,03±0,02	0,11±0,06	0,11±0,06	0,40±0,15

Примітка. Різниця щодо контролю статистично вірогідна за: \* —  $P < 0,05$ ; \*\* —  $P < 0,01$ ; \*\*\* —  $P < 0,001$ .

досліджень, які демонструють істотне зростання частоти мікроядер — біомаркерів радіаційного впливу в поліхроматидних еритроцитах популяції *Microtus arvalis* Pall., що водилася на радіонуклідно забруднених територіях зони відчуження ЧАЕС [29], припущення можливості виникнення значних мутагенних ефектів у результаті синергічної взаємодії радіонуклідів із забруднювачами хімічної природи є сумнівним.

Незважаючи на високий показник сумарної щільності забруднення ґрунту <sup>137</sup>Cs і <sup>90</sup>Sr у с. Чистоголівка, який становив 9,3 кБк/кг та перевищував питому радіоактивність ґрунту с. Копачі більше, ніж у 2 рази, рівень частоти індукування абераційних клітин за впливу радіонуклідного забруднення ґрунту із цих територій істотно не відрізняється, а в клітинах кореневої меристеми сорту Смуглянка спостерігається тенденція до його зниження. Так, за умов впливу радіонуклідного забруднення ґрунту території с. Копачі індукування хромосомних аберацій у



**Рис. 1.** Частота аберантних ана-телофазних клітин кореневої меристеми озимої пшениці, індукованих радіонуклідним забрудненням ґрунту зони відчуження ЧАЕС

клітинах кореневої меристеми сорту Смуглянка зростає порівняно з контролем у 6,8 рази, а вплив радіонуклідів ґрунту території с. Чистогалівка спричинює зростання аберантних клітин у 5,8 рази.

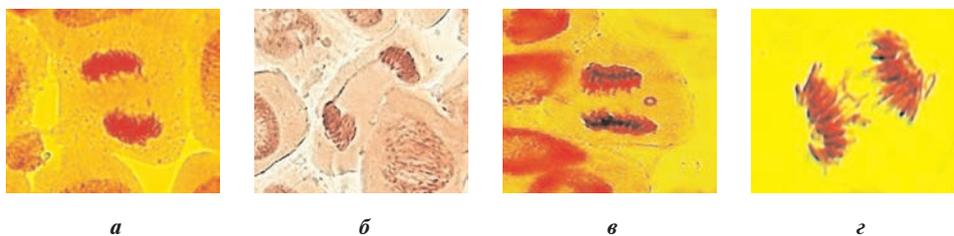
Висока мутагенна активність, яка зберігається в умовах найнижчої щільності радіонуклідних забруднень ґрунту території с. Копачі, та прирівнюється до показників цитогенетичних порушень, індукованих впливом радіонуклідів ґрунту території с. Чистогалівка із значно вищою питомою радіоактивністю, може бути пов'язана з нелінійним характером генетичних ефектів за низькодозового опромінення. Багато експериментальних даних, отриманих на рослинних і тваринних організмах, вказують на нелінійний характер біологічних ефектів, викликаних дією низьких доз опромінення, зокрема і в зоні відчуження ЧАЕС [30—33]. Цими дослідженнями було доведено, що в природних умовах за дії техногенних радіаційних чинників в організмі спостерігається значно вищий рівень генетичних ушкоджень на одиницю дози опромінення, ніж це передбачено класичними лабораторними моделями [2]. Можна припустити, що збереження високого рівня мутаційного процесу за умов зниження питомої радіоактивності ґрунту пов'язано зі специфічними механізмами репарації генетичних ушкоджень за дії на організм низьких доз радіації, які регламентуються не лише рівнем, а й швидкістю утворення пошкоджень ДНК і активних форм кисню.

Виявлені відмінності показників частоти хромосомних аберацій між генотипами різних сортів озимої пшениці за однакових умов мутагенного впливу вказують на вищу радіочутливість сорту Смуглянка порівняно із сортом Богдана. Під час проведення радіоекологічного моніторингу використання генотипів пшениці м'якої озимої з різною радіочутливістю уможливило отримання даних високої вірогідності щодо рівня мутагенної активності радіонуклідного забруднення ґрунту в зоні відчуження ЧАЕС. Збереження високої частоти хромосомних аберацій через 35 років після аварії за умов істотного зниження питомої радіоактивності ґрунту свідчить про існуючу небезпеку для

генома організмів в межах ближньої зони Чорнобильської АЕС. Подальше систематичне проведення генетичного моніторингу на радіонуклідно забруднених територіях з використанням різних рослинних тест-об'єктів допоможе надати виважену оцінку рівня мутагенної активності радіонуклідних забруднень у віддалені строки після ядерної аварії.

Контроль співвідношення хромосомних порушень різного типу дуже важливий під час проведення радіоекологічних досліджень. Адже за порівняно низького стресового впливу спочатку відбувається зміна спектра порушень мітозу, а лише потім — зростання кількості патологій [34]. Спектр хромосомних порушень, виявлених під час цитогенетичного аналізу наслідків дії радіонуклідних забруднень усіх досліджених територій, містить парні фрагменти і мости, що є характерними хромосомними перебудовами за умов впливу іонізуючого випромінювання, тоді як у контролі переважно фіксуються одиничні фрагменти і дицентрики хроматидного типу (рис. 2, *a*, *b*). Співвідношення ацентричних фрагментів до мостів варіює в межах 1,0—7,2 з тенденцією до найвищої частки одиничних і парних фрагментів за умов впливу радіонуклідних забруднень ґрунту с. Чистогалівка на клітини кореневої меристеми сорту Смоглянка. За найвищої щільності радіонуклідного забруднення ґрунту (с. Янів) частка меристематичних клітин з ацентричними фрагментами і мостами є однаковою в сорту Богдана та спостерігається тенденція до зростання частки аберантних клітин із ацентричними фрагментами у сорту Смоглянка. Вважають, що індукування дицентричних хромосом зростає лінійно або лінійно-квадратично внаслідок впливу випромінювання відповідно з високим і низьким лінійним передаванням енергії [35].

Зважаючи на виявлену між сортами пшениці відмінність у частоті фіксації хромосомних мостів і парних фрагментів залежно від інтенсивності радіонуклідного забруднення ґрунту, можна припустити, що зростання різних типів хромосомних аберацій — біомаркерів радіаційного впливу, має генотипну залежність. Подвійні ланцюгові розриви ДНК, які виникають у  $G_1$ -періоді клітинного циклу та спричиняють у подальшому хромосомні обміни різної складності, є важливим класом пошкоджень, індукованих впливом іонізуючого випромінювання [19]. Нестабільні хромосомні перебудови, такі як дицентричні та поліцентричні хромосоми, ацентричні кільця зазви-



**Рис. 2.** Типи хромосомних аберацій і аномалій мітозу в ана-телофазних клітинах кореневої меристеми озимої пшениці, індуковані радіонуклідним забрудненням ґрунту зони відчуження ЧАЕС: *a* — ацентричний фрагмент, *b* — хромосомний міст, *v* — хромосомне кільце, *z* — хромосома, що відстає

чай використовуються як біомаркери для оцінювання впливу іонізувального випромінювання. Проте за умов хронічного чи пролонгованого опромінення низькими дозами частота індукування дицентричних хромосом істотно зменшується і є нестабільною [33]. За таких умов ефективність мутагенного впливу іонізувального опромінення доцільно визначати за рівнем індукування аберацій хромосомного типу [36].

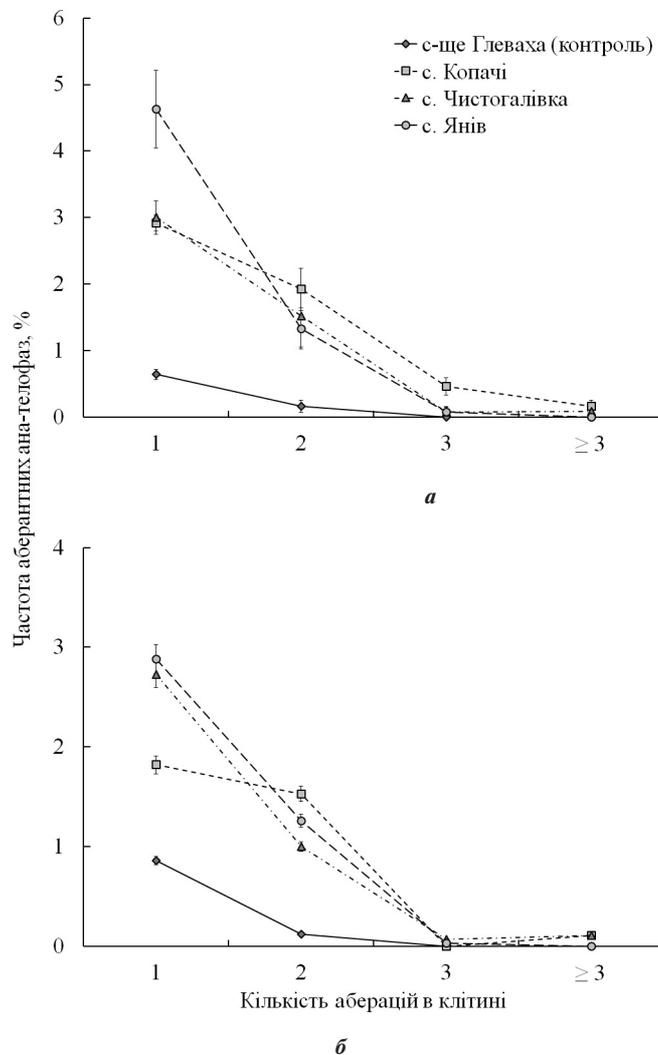
Мутагенна дія радіонуклідних забруднень ґрунту спричинює розширення спектра хромосомних аберацій та порушень мітозу внаслідок індукування хромосомних ацентричних кілець, мікроядер, хромосом, що відстають (рис. 2, в, з). Мікроядра фіксуються в тих варіантах впливу радіонуклідних забруднень, де виявлено найменшу частку ацентричних фрагментів — с. Копачі для сорту Смуглянка (0,18 %) і с. Копачі та с. Янів для сорту Богдана (0,15 і 0,03 %, відповідно), що може бути пов'язано з їх утворенням переважно з ацентричних фрагментів [37]. Частота фіксованих мікроядер істотно не перевищує контрольні показники і варіює в межах статистичної похибки, що співставно з результатами інших досліджень, зокрема з вивчення впливу низьких доз опромінення на апікальну кореневу меристему *Allium cepa* L. [28].

Спектр типів хромосомних аберацій в кореневій меристемі пшениці за дії радіонуклідних забруднень ґрунту зони відчуження Чорнобильської АЕС розширюється через індукування хромосомних ацентричних кілець. Вважається, що утворення хромосомних кілець пов'язане з обміном ділянками двох плечей тієї самої хромосоми зі злиттям її проксимальних кінців [38]. Їх виявлено з частотою 0,07 % в ана-телофазних клітинах кореневої меристеми сорту Смуглянка за пролонгованої дії радіонуклідно забрудненого ґрунту с. Копачі та з частотою 0,09—0,11 % за пророщування насіння сорту Богдана у вологому ґрунті, відібраному з території сіл Копачі, Чистогалівка і Янів.

Серед цитогенетичних порушень спостерігаються аномалії клітинного поділу — хромосоми, що відстають. Вони з'являються за впливу всіх варіантів радіонуклідного забруднення ґрунту. Частота індукування хромосом, що відстають, в клітинах кореневої меристеми сорту Богдана знаходиться на рівні показника наслідків впливу фонових значень питомої радіоактивності ґрунту в контролі та становить 0,16—0,40 %. Внаслідок дії радіонуклідних забруднень ґрунту території зони відчуження Чорнобильської АЕС на клітини кореневої меристеми сорту Смуглянка частка хромосом, що відстають, істотно перевищує спонтанний рівень і становить 0,26—0,35 % загальної частоти індукованих аберацій та аномалій мітозу. Поява хромосом, що відстають, як наслідок пролонгованого впливу радіонуклідних забруднень ґрунту, свідчить про анеугенну дію мутагенних чинників ґрунту, пов'язану з ушкодженням внутрішньоклітинних механізмів контролю сегрегації хромосом і нормального перебігу окремих етапів клітинного циклу [39].

Кількісний цитогенетичний аналіз множинних хромосомних аберацій, що виникають у результаті послідовних з'єднань комплексу незалежних розривів, дає змогу встановити ступінь генетичного

ушкодження аберантних клітин в результаті гострого, пролонгованого чи хронічного впливу забруднень радіонуклідами [35]. Генотоксична дія радіонуклідів ґрунту досліджених територій зони відчуження ЧАЕС супроводжується зростанням кількості клітин з множинними абераціями. Якщо частка анафазних клітин з виявленою однією аберацією чи аномалією мітозу з підвищенням щільності забруднення ґрунту радіонуклідами має тенденцію до зростання, то фіксація в меристематичних клітинах одночасно двох хромосомних порушень характеризується оберненою залежністю від питомої радіоактивності (рис. 3). Так, якщо в кореневій меристемі сортів Смуглянка і Богдана частка аберантних клітин з одним порушенням хромосом варіює в межах 2,84–4,63 % та 1,86–2,99 %, відповідно, і є найвищою за умов впливу радіонуклідно забрудненого ґрунту території с. Янів, то

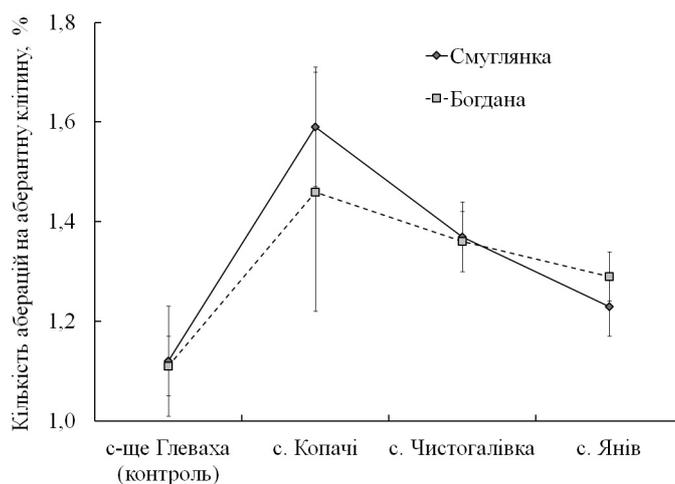


**Рис. 3.** Характер розподілу кількості аберацій і аномалій мітозу в аберантних ана-телофазних клітинах озимої пшениці сортів Смуглянка (а) і Богдана (б), індукованих різною щільністю радіонуклідного забруднення ґрунту зони відчуження ЧАЕС

найвищий рівень клітин, що несуть дві аберації, характерний за умов пророщування насіння, у ґрунті с. Копачі і становить 2,10 і 1,55 %, відповідно, у сортів Смуглянка і Богдана. Частка аберантних клітин з множинними абераціями, кількість яких становить три і більше, варіює в межах 0,05—0,36 %. За умов впливу радіонуклідно забрудненого ґрунту, що має найвищу питому радіоактивність (с. Янів) на кореневу меристему пшениці, клітин з множинними абераціями, кількість яких понад три, не виявлено.

Показник кількості аберацій на аберантну клітину, що характеризує інтенсивність індукування множинних аберацій, не прямо залежить від частоти аберантних клітин і є якісно відмінною кількісною характеристикою цитогенетичної активності радіонуклідного забруднення середовища. За пролонгованого впливу на насіння радіонуклідно забрудненого ґрунту території с. Копачі та с. Чистогалівка кількість аберацій на аберантну клітину вірогідно перевищує рівень контролю і становить 1,37—1,59 % і 1,36—1,46 % у сортів Смуглянка і Богдана, відповідно (рис. 4). Зміна показника кількості аберацій на аберантну клітину за умов різної питомої радіоактивності ґрунту території зони відчуження ЧАЕС не супроводжується аналогічним варіюванням частоти хромосомних аберацій, що може бути пов'язано з відображенням ними дещо різних параметрів взаємодії мутагенного чинника з хромосомами.

За класичною теорією мішені за низької щільності опромінення розподіл аберацій в клітинах підлягає Пуассонівському закону. Проте існують дані, що не завжди розподіл загальної кількості аберацій або розривів хромосом в опроміненіх клітинах відповідає законам випадкових подій [40]. Деякі мутагени чи певні умови їх впливу здатні спричинювати підвищення частоти клітин з абераціями, тоді як за дії інших мутагенів чи умов зростає в аберантних клітинах кількість нових генетичних ушкоджень. Це свідчить про різні механізми і шляхи реалізації порушень спадкового матеріалу на хромосомному



**Рис. 4.** Кількість аберацій на аберантну клітину в ана-телофазних клітинах озимої пшениці, індукованих різною щільністю радіонуклідного забруднення ґрунту зони відчуження ЧАЕС

рівні. Тому при оцінюванні мутагенної активності радіонуклідних забруднень навколишнього природного середовища доцільно одночасно брати до уваги рівень цитогенетичних порушень та ступінь генетичного пошкодження аберантної клітини.

Таким чином, незважаючи на поступове поліпшення радіоекологічної ситуації в ближній зоні відчуження ЧАЕС, радіонуклідне забруднення ґрунту через 35 років після аварії зберігає мутагенну активність, про що свідчить перевищення спонтанного рівня хромосомних аберацій у 3,5–7,5 рази. Прямої залежності між виходом аберантних клітин та щільністю радіонуклідного забруднення територій зони відчуження ЧАЕС не виявлено. Зважаючи на збереження високого рівня цитогенетичних порушень на територіях, які характеризуються істотним зниженням питомої радіоактивності ґрунту, при визначенні меж радіаційно безпечних територій зони відчуження ЧАЕС крім показників щільності радіонуклідного забруднення та потужності експозиційної дози слід брати до уваги їх мутагенну активність. Спектр хромосомних порушень включає типові для умов впливу іонізуючого випромінювання парні фрагменти і мости, співвідношення яких варіює в межах 1,0–7,2. Мутагенна дія радіонуклідного забруднення ґрунту спричинює розширення спектра хромосомних аберацій та аномалій мітозу, який включає хромосомні ацентричні кільця, мікроядра, хромосоми, що відстають. Індукування пролонгованим впливом радіонуклідних забруднень ґрунту хромосом, що відстають, свідчить про анеугенну дію мутагенного чинника. Мутагенна дія радіонуклідів ґрунту зони відчуження ЧАЕС супроводжується появою клітин з множинними абераціями, частка яких виявляє обернену залежність від щільності радіонуклідного забруднення, що може враховуватись під час радіоекологічного моніторингу навколишнього природного середовища. Результати багаторічних досліджень генетичних наслідків Чорнобильської катастрофи та аварій на ядерних об'єктах інших країн свідчать про довготривалу радіаційну загрозу стабільності генома живих організмів і слугують підставою для включення до державної екологічної програми проведення систематичного генетичного моніторингу на територіях, що постраждали від радіонуклідного забруднення та поблизу радіаційно небезпечних об'єктів.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Duarte G.T., Volkova P.Y., Perez F.F., Horemans N. Chronic ionizing radiation of plants: an evolutionary factor from direct damage to non-target effects. *Plants*. 2023. **12**, N 5. P. 1178. <https://doi.org/10.3390/plants12051178>
2. Mousseau T.A. The biology of Chernobyl. *Ann. Rev. Ecol. Evolut. System.* 2021. N 52. P. 87–109. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110218-024827>
3. Amiard J.C. *Military Nuclear Accidents: Environmental, Ecological, Health and Socio-economic Consequences*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2018. 272 p.
4. Beresford N.A., Fesenko S., Konoplev A., Skuterud L., Smith J.T., Voigt G. Thirty years after the Chernobyl accident: What lessons have we learnt? *J. Environ. Radioact.* 2016. N 157. P. 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.02.003>
5. Piguet F.-P., Eckert P., Deriaz B., Knüsli C., Giuliani G. Modeling of a major accident in five nuclear power plants from 365 meteorological situations in Western Europe and

- analysis of the potential impacts on populations, soils and affected countries. Geneva: Biosphere Institute, 2019. 74 p.
6. Cannon G., Kiang J.G. A review of the impact on the ecosystem after ionizing irradiation: wildlife population. *Int. J. Radiat. Biol.* 2022. **98**, N 6. P. 1054–1062. <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1793021>
  7. Ludovici G.M., Chierici A., de Souza S.O., d'Errico F., Iannotti A., Malizia A. Effects of Ionizing Radiation on Flora Ten Years after the Fukushima Dai-ichi Disaster. *Plants*. 2022. **11**, N 2. P. 222. <https://doi.org/10.3390/plants11020222>
  8. Skalozubov V., Kozlov I., Hayo H., Kozlov O., Dudarev I., Yarotskaya G. Issues of predicting the impact of nuclear power facilities accidents' radiation consequences. *Proc. Odessa Polytech. Univ.* 2022. **66**, N 2. P. 64–73. <https://doi.org/10.15276/opu.2.66.2022.08>
  9. Baker R.J., Dickins B., Wickliffe J.K., Khan F.A., Gaschak S., Makova K.D., Phillips C.D. Elevated mitochondrial genome variation after 50 generations of radiation exposure in a wild rodent. *Evol. Appl.* 2017. **10**, N 8. P. 784–791. <https://doi.org/10.1111/eva.12475>
  10. Fuller N., Ford A.T., Lerebours A., Gudkov D.I., Nagorskaya L.L., Smith J.T. Chronic radiation exposure at Chernobyl shows no effect on genetic diversity in the freshwater crustacean, *Asellus aquaticus* thirty years on. *Ecol. Evol.* 2019. N 9. P. 10135–10144. <https://doi.org/10.1002/ece3.5478>
  11. Моргун В.В., Якимчук Р.А. Генетичні наслідки Чорнобильської катастрофи: 35 років досліджень. *Фізіологія рослин і генетика*. 2021. **53**, № 3. С. 216–239. <https://doi.org/10.15407/frg2021.03.216>
  12. Dillon M.N., Thomas R., Mousseau T.A., Betz J.A., Kleiman N.J., Reiskind M.O.B., Breen M. Population dynamics and genome-wide selection scan for dogs in Chernobyl. *Can. Med. Genet.* 2023. **10**, N 1. P. 1–14. <https://doi.org/10.1186/s40575-023-00124-1>
  13. Jernfors T., Kesäniemi J., Lavrinienko A., Mappes T., Milinevsky G., Mølleret A.P., Mousseau T.A., Tukanenko E., Watts P.C. Transcriptional upregulation of DNA damage response genes in bank voles (*Myodes glareolus*) inhabiting the Chernobyl Exclusion Zone. *Frontiers in Environmental Science*. 2018. № 5. P. 1–8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00095>
  14. Kesäniemi J., Lavrinienko A., Tukanenko E., Boratynski Z., Kivisaari K., Mappes T., Milinevsky G., Møller A.P., Mousseau T.A., Watts P.C. Exposure to environmental radionuclides associates with tissue-specific impacts on telomerase expression and telomere length. *Sci. Rep.* 2019. **9**, N 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37164-8>
  15. Kesäniemi J., Lavrinienko A., Tukanenko E., Moutinho A.F., Mappes T., Møller A.P., Mousseau T.A., Watts P.C. Exposure to environmental radionuclides alters mitochondrial DNA maintenance in a wild rodent. *Evol. Ecol.* 2020. **34**, N 2. P. 163–174. <https://doi.org/10.1007/s10682-019-10028-x>
  16. Тронько М.Д., Замотаєва Г.А., Пастер І.П., Масюк С.В. Українсько-Американський проект дослідження наслідків опромінення in utero внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС: огляд наукових публікацій. *Ендокринологія*. 2019. **24**, № 4. С. 346–359. <https://doi.org/10.31793/1680-1466.2019.24-4.346>
  17. Reste J., Zvagule T., Kurjane N., Diesters A., Silova A., Eglite M., Cirule J., Gabruseva N., Ziverts A., Eurbakova E. Investigations on health conditions of chernobyl nuclear power plant accident recovery workers from latvia in late period after disaster. *Proc. Latvian Acad. Sci.* 2016. **70**, N 5. P. 257–265. <https://doi.org/10.1515/prolas-2016-0040>
  18. Einor D., Bonisoli-Alquati A., Costantini D., Mousseau T.A., Møller A.P. Ionizing radiation, antioxidant response and oxidative damage: a meta-analysis. *Sci. Total Environ.* 2016. **48**, N 5. P. 463–471. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.027>
  19. Car C., Gilles A., Goujon E., Muller M.L.D., Camoin L., Frelon S., Burraco P., Granjeaud S., Baudelet E., Audebert S., Orizaola G., Armengaud J., Tenenhaus A., Garali I., Bonzom J.M., Armant O. Population transcriptogenomics highlights impaired metabolism and small population sizes in tree frogs living in the Chernobyl Exclusion Zone. *Evol. Appl.* 2023. **15**, N 2. P. 203–209. <https://doi.org/10.1111/eva.13282>
  20. Іванюта С.П. 35 років Чорнобильської катастрофи: наслідки та пріоритети подолання. Національний інститут стратегічних досліджень. Центр безпекових досліджень. 2021. Київ, С. 1–5.

21. Caplin N., Willey N. Ionizing radiation, higher plants, and radioprotection: from acute high doses to chronic low doses. *Front. Plant Sci.* 2018. N 9. P. 847. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00847>
22. Shore R.E., Beck H.L., Boice J.D., Caffrey E.A., Davis S., Grogan H.A., Mettler F.A., Preston R.J., Till J.E., Wakeford R., Walsh L., Dauer L.T. Implications of recent epidemiologic studies for the linear nonthreshold model and radiation protection. *J. Radiol. Protect.* 2018. **38**, N 3. P. 1217–1233. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00847>
23. Mousseau T.A., Møller A.P. Plants in the light of ionizing radiation: what have we learned from Chernobyl, Fukushima, and other «hot» places? *Front. Plant Sci.* 2020. N 11. P. 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00552>
24. Maluszynska J., Juchimiuk J. Plant genotoxicity: a molecular cytogenetic approach in plant bioassays. *Arch. Indust. Hygiene Toxicol.* 2005. № 56. P. 177–184.
25. Ramzaev V., Bøtter-Jensen L., Thomsen K.J. An assessment of cumulative external doses from Chernobyl fallout for a forested area using the optically stimulated luminescence from quartz inclusions in bricks. *J. Environ. Radioact.* 2008. **99**, N 7. P. 1154–1164. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.01.014>
26. Singh R.J. *Practical manual on plant cytogenetics*. Boca Raton: CRC Press, 2017. 346 p. <https://doi.org/10.4324/9781351228268>
27. Атраментова Л.О., Утевська О.М. Біометрія. Харків: Ранок, 2007. 176 с.
28. Bolsunovsky A., Dementyev D., Trofimova E., Iniatkina E., Kladko Y., Petrichenkov M. Chromosomal aberrations and micronuclei induced in onion (*Allium cepa*) by gamma-radiation. *J. Environ. Radioact.* 2019. N 207. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.05.014>
29. Garnier-Laplace J., Geras'kin S., Della-Vedova C., Beaugelin-Seiller K., Hinton T.G., Real A., Oudalovaet A. Are radiosensitivity data derived from natural field conditions consistent with data from controlled exposures? A case study of Chernobyl wildlife chronically exposed to low dose rates. *J. Environ. Radioact.* 2013. N 121. P. 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.01.013>
30. Yakymchuk R.A. Cytogenetic disorders in *Triticum aestivum* L. cells affected by radionuclide contamination of water reservoirs in the alienation zone of Chornobyl NPP. *Biopolym. Cell.* 2018. **34**, N 2. P. 97–106. <https://doi.org/10.7124/bc.000974>
31. Yin X., Mason J., Lobachevsky P.N., Munforte L., Selbie L., Ball D.L., Martin R.F., Leong T., Siva S., Martin O.A. Radiation therapy modulates dna repair efficiency in peripheral blood mononuclear cells of patients with non-small cell lung cancer. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.* 2019. **103**, N 2. P. 521–531. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2018.10.001>
32. Ocolotobiche E.E., Dauder R.M., Güerci A.M. Radiosensitivity of radiotherapy patients: the effect of individual DNA repair capacity. *Mutat. Res.* 2021. N 867. P. 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2021.503371>
33. Cherednichenko O., Pilyugina A., Nuraliev S., Azizbekova D. Persons chronically exposed to low doses of ionizing radiation: a cytogenetic dosimetry study. *Mutat. Res.* 2024. N 894. P. 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2024.503728>
34. Шкарупа В.М., Неумержицька Л.В., Клименко С.В., Семіглазова Т.В. Динаміка змін спектра аберацій хромосом, індукованих мітоміцином С у *Allium cepa* L. Вісн. укр. т-ва генет. селекц. 2011. **9**, № 1. С. 112–117.
35. Anderson R.M. Cytogenetic Biomarkers of Radiation Exposure. *Clinic. Oncol.* 2019. N 31. P. 311–318. <https://doi.org/10.1016/j.clon.2019.02.009>
36. Nugis V.Y., Kozlova M.G., Nadejina N.M., Galstyan I.A., Nikitina V.A., Khvostunov K.I., Golub E.V. Cytogenetic biodosimetry of accidental exposures in the long terms after irradiation. *Radiat. Protect. Dos.* 2019. **186**, N 1. P. 31–36. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz040>
37. Krupina K., Goginashvili A., Cleveland D.W. Causes and consequences of micronuclei. *Curr. Opin. Cell Biol.* 2021. N 70. P. 91–99. <https://doi.org/10.1016/j.ceb.2021.01.004>
38. Bursted B., Zamariolli M., Bellucco F.T., Melaragno M.I. Mechanisms of structural chromosomal rearrangement formation. *Mol. Cytogen.* 2022. N 15. P. 1–19. <https://doi.org/10.1186/s13039-022-00600-6>
39. Siri S.O., Martino J., Gottifredi V. Structural chromosome instability: types, origins, consequences, and therapeutic opportunities. *Cancers.* 2021. N 13. P. 1–22. <https://doi.org/10.3390/cancers13123056>

40. Куцоконь Н.К., Безруков В.Ф., Лазаренко Н.К., Рашидов Н.М., Гродзинський Д.М. Кількість аберацій на аберантну клітину як параметр хромосомної нестабільності. 1. Характеристика дозових залежностей. Цитол. генет. 2003. 37, N 4. С. 20—25.

Отримано 09.05.2024

#### REFERENCES

- Duarte, G.T., Volkova, P.Y., Perez, F.F. & Horemans, N. (2023). Chronic ionizing radiation of plants: an evolutionary factor from direct damage to non-target effects. *Plants*, 12, No. 5, 1178. <https://doi.org/10.3390/plants12051178>
- Mousseau, T.A. (2021). The biology of Chernobyl. *Ann. Rev. Ecol. Evol. Systematics*. No. 52, pp. 87-109. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110218-024827>
- Amiard, J.C. (2018). *Military Nuclear Accidents: Environmental, Ecological, Health and Socio-economic Consequences*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Beresford, N.A., Fesenko, S., Konoplev, A., Skuterud, L., Smith, J.T. & Voigt, G. (2016). Thirty years after the Chernobyl accident: What lessons have we learnt? *J. Environ. Radioact.*, No. 157, pp. 77-89. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.02.003>
- Piguet, F.-P., Eckert, P., Deriaz, B., Knüsli, C. & Giuliani, G. (2019). Modeling of a major accident in five nuclear power plants from 365 meteorological situations in Western Europe and analysis of the potential impacts on populations, soils and affected countries. Geneva: Biosphere Institute.
- Cannon, G. & Kiang, J.G. (2022). A review of the impact on the ecosystem after ionizing irradiation: wildlife population. *Int. J. Radiat. Biol.*, 98, No. 6 pp. 1054-1062. <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1793021>
- Ludovici, G.M., Chierici, A., de Souza, S.O., d'Errico, F., Iannotti, A. & Malizia, A. (2022). Effects of Ionizing Radiation on Flora Ten Years after the Fukushima Dai-ichi Disaster. *Plants*, 11, No. 2, p. 222. <https://doi.org/10.3390/plants11020222>
- Skalozubov, V., Kozlov, I., Hayo, H., Kozlov, O., Dudarev, I. & Yarotskaya, G. (2022). Issues of predicting the impact of nuclear power facilities accidents' radiation consequences. *Proc. Odessa Polytech. Univ.*, 66, No. 2, pp. 64-73. <https://doi.org/10.15276/opu.2.66.2022.08>
- Baker, R.J., Dickins, B., Wickliffe, J.K., Khan, F.A., Gaschak, S., Makova, K.D. & Phillips, C.D. (2017). Elevated mitochondrial genome variation after 50 generations of radiation exposure in a wild rodent. *Evol. Appl.*, 10, No. 8, pp. 784-791. <https://doi.org/10.1111/eva.12475>
- Fuller, N., Ford, A.T., Lerebours, A., Gudkov, D.I., Nagorskaya, L.L. & Smith, J.T. (2019). Chronic radiation exposure at Chernobyl shows no effect on genetic diversity in the freshwater crustacean, *Asellus aquaticus* thirty years on. *Ecol. Evol.*, No. 9, pp. 10135-10144. <https://doi.org/10.1002/ece3.5478>
- Morgun, V.V. & Yakymchuk, R.A. (2021). Henetychni naslidky Chornobylskoi katastrofy: 35 rokiv doslidzhen [Genetic consequences of chornobyl disaster: 35 years of study]. *Fiziol. rast. genet.*, 53, No. 3, pp. 216-239 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/frg2021.03.216>
- Dillon, M.N., Thomas, R., Mousseau, T.A., Betz, J.A., Kleiman, N.J., Reiskind, M.O.B. & Breen, M. (2023). Population dynamics and genome-wide selection scan for dogs in Chernobyl. *Can. Med. Genet.*, 10, No. 1. pp. 1-14. <https://doi.org/10.1186/s40575-023-00124-1>
- Jernfors, T., Kesäniemi, J., Lavrinienko, A., Mappes, T., Milinevsky, G., Mølleret, A.P., Mousseau, T.A., Tukalenko, E. & Watts, P.C. (2018). Transcriptional upregulation of DNA damage response genes in bank voles (*Myodes glareolus*) inhabiting the Chernobyl Exclusion Zone. *Front. Environ. Sci.*, No. 5. pp. 1-8. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2017.00095>
- Kesäniemi, J., Lavrinienko, A., Tukalenko, E., Boratynski, Z., Kivisaari, K., Mappes, T., Milinevsky, G., Møller, A.P., Mousseau, T.A. & Watts, P.C. (2019). Exposure to environmental radionuclides associates with tissue-specific impacts on telomerase expression and telomere length. *Sci. Rep.* 9, No. 1, pp. 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37164-8>

15. Kesäniemi, J., Lavrinienko, A., Tukalenko, E., Moutinho, A.F., Mappes, T., Møller, A.P., Mousseau, T.A. & Watts, P.C. (2020). Exposure to environmental radionuclides alters mitochondrial DNA maintenance in a wild rodent. *Evol. Ecol.*, 34, No. 2, pp. 163-174. <https://doi.org/10.1007/s10682-019-10028-x>
16. Tronko, M.D., Zamotaieva, H.A., Paster, I.P. & Masiuk, S.V. (2019). Ukrainsko-Amerykanskyyi proekt doslidzhennia naslidkiv oprominennia in utero vnaslidok avarii na Chornobylskii AES: ohliad naukovykh publikatsii [The Ukrainian-American project for studying the consequences of in utero exposure to ionizing radiation as a result of the accident at the Chornobyl NPP: a review of scientific publications]. *Endokrynologia*, 24, No. 4, pp. 346-359 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31793/1680-1466.2019.24-4.346>
17. Reste, J., Zvagule, T., Kurjane, N., Diesters, A., Silova, A., Eglite, M., Cirule, J., Gabruseva, N., Ziverts, A. & Eurbakova, E. (2016). Investigations on health conditions of chernobyl nuclear power plant accident recovery workers from latvia in late period after disaster. *Proc. Latvian Acad. Sci.*, 70, No. 5, pp. 257-265. <https://doi.org/10.1515/prolas-2016-0040>
18. Einor, D., Bonisoli-Alquati, A., Costantini, D., Mousseau, T.A. & Møller, A.P. (2016). Ionizing radiation, antioxidant response and oxidative damage: a meta-analysis. *Sci. Total Environ.*, 48, No. 5, pp. 463-471. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.027>
19. Car, C., Gilles, A., Goujon, E., Muller, M.L.D., Camoin, L., Frelon, S., Burraco, P., Granjeaud, S., Baudelet, E., Audebert, S., Orizaola, G., Armengaud, J., Tenenhaus, A., Garali, I., Bonzom, J.M. & Armant, O. (2023). Population transcriptogenomics highlights impaired metabolism and small population sizes in tree frogs living in the Chernobyl Exclusion Zone. *Evol. Appl.* 15, No. 2, pp. 203-2019. <https://doi.org/10.1111/eva.13282>
20. Ivanuta, S.P. (2021). 35 rokov Chornobylskoi katastrofy: naslidky ta priorityty podolannya [35 years of the Chernobyl disaster: consequences and priorities of overcoming]. National Institute of Strategic Studies. Center for Security Studies. pp. 1-5 [in Ukrainian].
21. Caplin, N. & Willey, N. (2018). Ionizing radiation, higher plants, and radioprotection: from acute high doses to chronic low doses. *Front. Plant Sci.*, No. 9, 847. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00847>
22. Shore, R.E., Beck, H.L., Boice, J.D., Caffrey, E.A., Davis, S., Grogan, H.A., Mettler, F.A., Preston, R.J., Till, J.E., Wakeford, R., Walsh, L. & Dauer, L.T. (2018). Implications of recent epidemiologic studies for the linear nonthreshold model and radiation protection. *J. Radiol. Protect.*, 38, No. 3, pp. 1217-1233. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00847>
23. Mousseau, T.A. & Møller, A.P. (2020). Plants in the light of ionizing radiation: what have we learned from Chernobyl, Fukushima, and other «hot» places? *Front. Plant Sci.*, No. 11, pp. 1-9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00552>
24. Maluszynska, J. & Juchimiuk, J. (2005). Plant genotoxicity: a molecular cytogenetic approach in plant bioassays. *Arch. Indust. Hygiene Toxicol.*, No. 56, pp. 177-184.
25. Ramzaev, V., Bøtter-Jensen, L. & Thomsen, K.J. (2008). An assessment of cumulative external doses from Chernobyl fallout for a forested area using the optically stimulated luminescence from quartz inclusions in bricks. *J. Environ. Radioact.*, 99, No. 7, pp. 1154-1164. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.01.014>
26. Singh, R.J. (2018). Practical manual on plant cytogenetics. Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.4324/9781351228268>
27. Atramentova, L.O., & Utievskaya, O.M. (2007). Biometriia [Biometrics]. Kharkiv: Ranok [in Ukrainian].
28. Bolsunovsky, A., Dementyev, D., Trofimova, E., Iniatkina, E., Kladko, Y. & Petrichenkov, M. (2019). Chromosomal aberrations and micronuclei induced in onion (*Allium cepa*) by gamma-radiation. *J. Environ. Radioact.*, No. 20, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.05.014>
29. Garnier-Laplace, J., Geras'kin, S., Della-Vedova, C., Beaugelin-Seiller, K., Hinton, T.G., Real, A. & Oudalovaet, A. (2013). Are radiosensitivity data derived from natural field conditions consistent with data from controlled exposures? A case study of Chernobyl wildlife chronically exposed to low dose rates. *J. Environ. Radioact.*, No. 121, pp. 12-21. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.01.013>

30. Yakymchuk, R.A. (2018). Cytogenetic disorders in *Triticum aestivum* L. cells affected by radionuclide contamination of water reservoirs in the alienation zone of Chernobyl NPP. *Biopolym. Cell.*, 34, No. 2, pp. 97-106. <https://doi.org/10.7124/bc.000974>
31. Yin, X., Mason, J., Lobachevsky, P.N., Munforte, L., Selbie, L., Ball, D.L., Martin, R.F., Leong, T., Siva, S. & Martin, O.A. (2019). Radiation therapy modulates dna repair efficiency in peripheral blood mononuclear cells of patients with non-small cell lung cancer. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 103, No. 2, pp. 521-531. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2018.10.001>
32. Ocolotobiche, E.E., Dauder, R.M. & Güerci, A.M. (2021). Radiosensitivity of radiotherapy patients: the effect of individual DNA repair capacity. *Mutat. Res.*, No. 867, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2021.503371>
33. Cherednichenko, O., Pilyugina, A., Nuraliev, S. & Azizbekova, D. (2024). Persons chronically exposed to low doses of ionizing radiation: a cytogenetic dosimetry study. *Mutat. Res.*, No. 894, pp. 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2024.503728>
34. Shkarupa, V.M., Neumerzhyska, L.V., Klymenko, S.V. & Semihlazova, T.V. (2011). Dynamika zmin spektra aberatsii khromosom, indukovanykh mitomitsynom C u *Allium cepa* L. [Dynamics of changes in chromosome aberration spectrum induced by mytomicin C in *Allium cepa* L.]. *Bull. Ukrain. Soc. Genet. Breed.*, 9, No. 1, pp. 112-117 [in Ukrainian].
35. Anderson, R.M. (2019). Cytogenetic Biomarkers of Radiation Exposure. *Clinic. Oncol.*, 31, pp. 311-318. <https://doi.org/10.1016/j.clon.2019.02.009>
36. Nugis, V.Y., Kozlova, M.G., Nadejina, N.M., Galstyan, I.A., Nikitina, V.A., Khvostunov, K.I. & Golub, E.V. (2019). Cytogenetic biodosimetry of accidental exposures in the long terms after irradiation. *Radiat. Protect. Dos.*, 186, No. 1, pp. 31-36. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz040>
37. Krupina, K., Goginashvili, A. & Cleveland, D.W. (2021). Causes and consequences of micronuclei. *Curr. Opin. Cell Biol.*, No. 70, pp. 91-99. <https://doi.org/10.1016/j.ceb.2021.01.004>
38. Bursted, B., Zamariolli, M., Bellucco, F.T. & Melaragno, M.I. (2022). Mechanisms of structural chromosomal rearrangement formation. *Mol. Cytogen.*, No. 15, pp. 1-19. <https://doi.org/10.1186/s13039-022-00600-6>
39. Siri, S.O., Martino, J. & Gottifredi, V. (2021). Structural chromosome instability: types, origins, consequences, and therapeutic opportunities. *Cancers*, No. 13, pp. 1-22. <https://doi.org/10.3390/cancers13123056>
40. Kutsokon, N.K., Bezrukov, V.F., Lazarenko, L.M., Rasydov, N.M. & Hrodzynskiy, D.M. (2003). Kilkist aberatsii na aberantnu klitynu yak parametr khromosomnoi nestabilnosti. 1. Kharakterystyka dozovykh zalezhnosti [The number of aberrations per aberrant cell as a parameter of chromosomal instability. 1. Characteristics of dose dependence]. *Cytol. Genet.*, 37, No. 4, pp. 20-25 [in Ukrainian].

Received 09.05.2024

#### CYTOGENETIC ANALYSIS OF INDUCED MUTATIONS IN THE EXCLUSION ZONE OF CHERNOBYL NPP 35 YEARS AFTER THE ACCIDENT

R.A. Yakymchuk, V.V. Morgun, V.O. Skriplov

Institute of Plant Physiology and Genetics, National Academy of Sciences of Ukraine  
31/17 Vasylkivska St., Kyiv, 03022, Ukraine  
e-mail: peoplenature16@gmail.com

The mutagenic activity of radionuclide soil contamination in the exclusion zone of the Chernobyl nuclear power plant 35 years after the accident was studied. Using the anatelophase method, a cytogenetic analysis of root meristem cells of *Triticum aestivum* L. seedlings of Smuglyanka and Bohdana varieties, which were treated by prolonged exposure to radionuclide soil contamination within the 10-km zone of the Chernobyl NPP (the villages of Kopachi, Chistohalivka, and Yaniv), was carried out. The specific activity of <sup>137</sup>Cs and <sup>90</sup>Sr was 4.5–28.2 kBq/kg. The soil of Glevakha village, Fastiv district, Kyiv region,

whose specific radioactivity is 0.29 kBq/kg, was taken as control. The frequency of aberrant cells induced by radionuclide soil contamination exceeds the control level by 3.5–7.5 times. A direct relationship between the frequency of aberrant cells and the specific radioactivity of the soil was not found. The spectrum of chromosomal disorders included paired fragments and bridges, typical for the conditions of exposure to ionizing radiation, the ratio of which varies between 1.0 and 7.2. The mutagenic effect of radionuclide contamination of the soil causes an expansion of the chromosomal aberrations spectrum and abnormalities of mitosis, which includes chromosomal acentric rings, micronuclei, lagging chromosomes. Induction of lagging chromosomes as a result of prolonged exposure to radionuclide contamination of the soil indicates the aneugenic effect of the mutagenic factor. The mutagenic effect of radionuclides in the soil of the Chernobyl NPP exclusion zone is accompanied by the appearance of cells with multiple aberrations, the proportion of which shows an inverse dependence on the density of radionuclide contamination, which can be taken into account when conducting radioecological monitoring of the natural environment. The results of long-term research of the genetic consequences of the Chernobyl disaster and accidents at nuclear objects in other countries indicate a long-term radiation threat to the stability of the genome of living organisms and serve as a basis for including in the state environmental program systematic genetic monitoring of the territories affected by radionuclide pollution and near radiation-dangerous objects.

*Key words:* *Triticum aestivum* L., radionuclide contamination, specific radioactivity, chromosomal aberrations.

#### ORCID

**Р.А. ЯКИМЧУК** — Ruslan Yakymchuk <https://orcid.org/0000-0002-6249-4304>

**В.В. МОРГУН** — Volodymyr Morgun <https://orcid.org/0000-0001-5842-6328>

**В.О. СКРИПЛЬОВ** — Volodymyr Skryplov <https://orcid.org/0009-0003-4951-4539>