

УДК 575.224.4: 633.111

## ЦИТОГЕНЕТИЧНА АКТИВНІСТЬ ЗАБРУДНЕНИХ РАДІОНУКЛІДАМИ ПОВЕРХНЕВИХ ВОДОЙМ ЗОНИ ВПЛИВУ ХВОСТОСХОВИЩА УРАНОДОБУВНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Р.А. ЯКИМЧУК

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

Проведено цитогенетичний аналіз клітин кореневої меристеми пшениці озимої м'якої (*Triticum aestivum* L.), насіння якої було пророщене за умов впливу забруднень природними радіонуклідами води і донних відкладів водойм зони впливу хвостосховища уранодобувної промисловості. Частота хромосомних аберацій в 1,3–4,4 раза перевищувала спонтанний рівень. Спектр типів цитогенетичних порушень переважно формують ацентричні фрагменти і мости. Підвищена частота клітин з множинними абераціями за умов впливу радіонуклідів водойм свідчить про їх високу мутагенну активність, яка частково може бути зумовлена особливістю реакції-відповіді системи відновлення радіаційно індукованих цитогенетичних порушень у діапазоні малих доз опромінення.

*Ключові слова:* *Triticum aestivum* L., цитогенетичні порушення, хромосомні аберації, аномалії мітозу, радіонуклідне забруднення, поверхневі водойми.

Наслідки, пов'язані з розвитком атомної енергетики в Україні, традиційно асоціюють із Чорнобильською аварією, яка за площею уражених територій, кількістю постраждалого населення і тривалістю впливу радіонуклідних забруднень залишається найбільшою техногенною катастрофою в історії людства. Ще гострішою й масштабнішою стала проблема радіаційної безпеки після вибуху на АЕС «Фукусіма-1» (Японія) в 2011 р. [11]. Разом з тим як в Україні, так і в деяких інших країнах гостра кризова радіоекологічна ситуація формувалася десятиліттями задовго до радіаційних катастроф і пов'язана з видобутком, переробкою уранової руди та утворенням сховищ відносно низькоактивних відходів збагачення урану [18].

За обсягом радіоактивних відходів (60 млн т) Дніпропетровський регіон в Україні посідає друге місце після Чорнобильської зони [22, 29]. Лише в результаті діяльності ДП «Придніпровський хімічний завод», яке розміщене на території м. Кам'янське, в дев'яти хвостосховищах накопичено близько 42 млн т радіоактивних речовин загальною активністю  $3,2 \cdot 10^{15}$  Бк (86 000 Ки) [18, 27]. Поширення матеріалів хвостосховищ, спричинене ерозійними процесами, та забруднення природними радіонуклідами ґрунту, атмосфери, поверхневих і підземних вод призводять до зростання опромінення населення України природними радіонуклідами, яке у 75 разів перевищує загальне опромінення від усіх техногенних причин, включно з аварією на Чорнобильській АЕС, та

майже вдвічі — середньосвітовий рівень [15, 27]. Це відображається у генетично детермінованих вадах розвитку, зростанні смертності над народжуваністю, прогресуючому розвитку захворювань, серед яких особливу тривогу викликають онкопатології, порушення кровотворення та репродуктивної функції [22, 26].

За даними ВООЗ, 80 % захворювань, від яких щороку у світі помирає 25 млн людей, пов'язані із забрудненням води. На сьогодні прісні водойми віднесені до переліку критичних об'єктів навколишнього середовища, в які потрапляють води атомних енергоблоків і розвантажуються підземні радіоактивно забруднені води від хвостосховищ відходів уранового виробництва [1, 21, 28]. Учені велику увагу приділяють дослідженню їх мутагенної активності й прогнозуванню генетичних наслідків радіонуклідного забруднення для живих організмів [2, 3, 7–9]. Згідно з висновками експертів МАГАТЕ, хвостосховище «Дніпровське» в м. Кам'янське (12 млн т відходів) є найнебезпечнішим для навколишнього середовища, що пов'язано з його близькістю до р. Дніпро, наявністю витоків і можливістю катастрофічного руйнування утримувальної греблі. Основними джерелами надходження радіонуклідів із хвостосховища в р. Дніпро є розвантаження забруднених підземних вод, поверхневий стік із забрудненої території промайданчика і річковий стік р. Коноплянка, з яким протягом року виноситься  $13,2 \cdot 10^{10}$  Бк природних радіонуклідів [11, 13, 37]. Більшість досліджень присвячено вивченню питомої активності природних радіонуклідів у прилеглих до хвостосховища водоймах, їх ізотопного складу, сезонних змін, розподілу за течією р. Коноплянка, накопиченню в гідробіонтах [4, 9, 11, 13, 28]. Проте наслідки їх впливу на живі організми за складних взаємодій із різноманітними хімічними сполуками проаналізувати лише фізичними й хімічними методами неможливо [31]. Використання рослинних тест-об'єктів для оцінювання генотоксичності води і донних відкладів радіонуклідно забруднених водойм і водотоків дасть змогу встановити ризик виникнення мутагенних ефектів у контактуючих з ними живих організмів і передбачити небезпеку виникнення віддалених генетичних наслідків.

Метою роботи було вивчення частоти і спектра хромосомних аберацій у клітинах кореневої меристеми *Triticum aestivum* L. за пролонгованої дії радіонуклідних забруднень води й донних відкладів поверхневих водойм зони впливу хвостосховища уранодобувної промисловості.

### Методика

Насіння двох сортів пшениці м'якої озимої (*T. aestivum* L.) Альбатрос одеський і Зимоярка пророщували за умов впливу проб води і донних відкладів р. Коноплянка (витік річки та перепускний канал седиментаційного відстійника) і кар'єру «Тритузний», які з півдня та південного сходу прилягають до території хвостосховища «Дніпровське» м. Кам'янське. У зв'язку з недоступністю даних питомої активності природних радіонуклідів у воді досліджуваних об'єктів значення цього показника було обрано за літературними даними. У місцях витoku р. Коноплянка й перепускного каналу седиментаційного відстійника він становив відповідно  $^{238}\text{U}$ — $^{234}\text{U}$  — 0,505 Бк/л,  $^{226}\text{Ra}$  — 0,025 Бк/л та  $^{238}\text{U}$ — $^{234}\text{U}$  — 0,525 Бк/л,  $^{226}\text{Ra}$  — 0,02 Бк/л [12], питома активність радіонуклідів води кар'єру «Тритузний» —  $^{238}\text{U}$ — $^{234}\text{U}$  — 0,280 Бк/л,

$^{226}\text{Ra}$  — 0,032 Бк/л [12, 19]. За контроль було взято проби води і донних відкладів з умовно чистого оз. Голосіївське м. Київ. Проби води і донних відкладів відбирали в 2015 р. за стандартними методиками [23, 35, 36].

Насіння в кількості 50 шт. на варіант досліду витримували у зазначених пробах води упродовж 18 год, після чого висівали в чашки Петрі на фільтрувальний папір, зволожений водою цих проб, і пророщували за температури 24—26 °С. Для визначення цитогенетичної активності донних відкладів водойм насіння пророщували протягом 40 год на їх піщаних і дрібногравійних субстратах. Первинні корінці завдовжки 0,8—1,0 см фіксували протягом 4 год у фіксаторі Кларка, що складається з 96 %-го розчину етанолу і льодяної оцтової кислоти у співвідношенні 3 : 1. Хімічну мацерацію корінців проводили протягом 1 хв в 1 н розчині соляної кислоти. Після мацерації з метою аналізу хромосомних аберацій і порушень мітозу клітин корінці вмішували у розчин ацетоорсеїну на 24 год за температури 23—25 °С.

Для мікроскопічного аналізу готували тимчасові давлені цитологічні препарати за загальноприйнятими методами [20]. Мікроскопічне вивчення меристематичної зони корінців проводили з використанням мікроскопа «JENVAL» («Carl Zeiss» Jena) за збільшення  $\times 900$ . Під час визначення частоти хромосомних аберацій і порушень мітозу до уваги брали клітини, які перебували в анафазі та ранній телофазі. Вибірка становила не менш як 1000 клітин для кожного варіанта. Враховували частоту абераційних клітин як відсоток клітин в анафазі та ранній телофазі з порушеннями хромосом. При обчисленні середньої кількості аберацій на абераційну клітину (КАнаАК) враховували клітини з 0, 1, 2 та множинними хромосомними абераціями («>2» аберацій). Експериментальні дані оброблені статистично загальноприйнятими методами [10], вірогідність різниці оцінено за *t*-критерієм Стьюдента. У таблицях наведено середньоарифметичні дані та їх стандартні похибки.

### Результати та обговорення

За дії радіонуклідно забруднених зразків води, відібраних із водойм і водотоків зони впливу хвостосховища «Дніпровське», на меристему первинних корінців проростків озимої м'якої пшениці виявлено зростання в 2,3—4,4 раза кількості абераційних клітин порівняно з контрольними показниками. Найвищу цитогенетичну активність забруднень води р. Коноплянка виявлено в перепускному каналі седиментаційного відстійника. Частота клітин із хромосомними абераціями становила  $1,65 \pm 0,31$  % у сорту Альбатрос одеський та  $2,16 \pm 0,35$  % у сорту Зимоярка, що істотно перевищує показники контролю відповідно в 3,2 та 2,6 раза (табл. 1). Забруднення води у створі витoku р. Коноплянка характеризувалось нижчими показниками цитогенетичної активності, однак рівень індукованих хромосомних порушень був статистично вірогідно вищий у 2,3—2,5 раза від спонтанного і становив  $1,15 \pm 0,27$  % у сорту Альбатрос одеський та  $2,03 \pm 0,39$  % у сорту Зимоярка.

Водне наповнення кар'єру «Тритузний» в останні роки спричинене витоком і подальшою інфільтрацією води з ділянки р. Коноплянка, що обмежує з півдня хвостосховище «Дніпровське», тому питома активність радіонуклідів води кар'єру «Тритузний» залежить від рівня радіонуклідного забруднення річки і ґрунтових вод, які є основним її джерелом

ТАБЛИЦА 1. Частота і спектр хромосомних абераций в озимій пшениці за дії радіонуклідного забруднення поверхневих водним золи впливу хвостосховища «Дніровське»

Місце відбору зразків	Вивчено ана-телофаз мітозів, шт.	Мітози з порушеннями і хромосомними аберациями		Спектр порушень мітозу та хромосомних абераций								Кількість абераций на аберантну клітину						
		шт.	%	Фрагменти	Мости		Мости + фрагменти	Мікроядра		Відстаючі хромосоми		Хромосомні кільця						
					шт.	%		шт.	%	шт.	%	шт.	шт.	шт.	шт.			
Альбатрос одеський																		
оз. Голосієвське (контроль)	1561	8	0,51±0,18	5	0,32	3	0,19	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1,00±0,00
Кар'єр «Григузний»	1610	36	2,24±0,37**	10	0,62	13	0,81*	4	0,25*	0	0,00	9	0,56*	0	0,00	0	0,00	1,50±0,11**
Перепускний канал р. Коношлянка	1700	28	1,65±0,31**	13	0,77	10	0,59	0	0,00	0	0,00	5	0,29*	0	0,00	0	0,00	1,18±0,07*
Вилік р. Коношлянка	1566	18	1,15±0,27*	11	0,70	5	0,32	0	0,00	0	0,00	2	0,13	0	0,00	0	0,00	1,39±0,14**
Зимоярка																		
оз. Голосієвське (контроль)	1470	12	0,82±0,23	5	0,34	6	0,41	1	0,07	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1,08±0,08
Кар'єр «Григузний»	1933	37	1,91±0,31**	12	0,62	20	1,04*	1	0,05	1	0,05	1	0,05	2	0,10	1	0,05	1,32±0,09*
Перепускний канал р. Коношлянка	1758	38	2,16±0,35**	19	1,08**	12	0,68	3	0,17	0	0,00	4	0,23*	0	0,00	0	0,00	1,26±0,08
Вилік р. Коношлянка	1326	27	2,03±0,39**	10	0,75	16	1,21*	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1	0,07	1	0,07	1,22±0,08

\*Різниця з контролем статистично вірогідна за  $P < 0,05$ .

\*\*Різниця з контролем статистично вірогідна за  $P < 0,01$ .

[19]. Пролонгована дія води кар'єру «Тритузний» на кореневу меристему пшениці спричинювала істотне зростання частоти клітин з порушеннями цілісності хромосом. Рівень аберантних меристематичних клітин становив  $2,24 \pm 0,37$  % у сорту Альбатрос одеський та  $1,91 \pm 0,31$  % у сорту Зимоярка, що в 2,3—4,4 раза перевищує показники контролю. Оскільки в поверхневій воді з ґрунтовими водами із хвостосховища «Дніпровське» крім природних радіонуклідів періодично потрапляють іони важких металів (свинцю, мангану, титану, лантану, цинку, барію, хрому), концентрації яких перевищують норму в 1,8—22,5 раза [31], логічно припустити, що високий рівень цитогенетичної активності проб води з кар'єру «Тритузний» за майже вдвічі нижчої питомої активності радіонуклідів пов'язаний з адитивним чи синергічним ефектом комплексної дії природних радіонуклідів та інших генотоксичних хімічних агентів. За підсумками попередньо проведених досліджень з визначення цитогенетичної активності забруднених радіонуклідами поверхневих водійм зони відчуження Чорнобильської АЕС на різних рослинних тест-об'єктах встановлено позитивну кореляцію між частотою хромосомних аберацій і потужністю поглиненої дози хронічного зовнішнього і внутрішнього опромінення [7, 8, 16] та її відсутність — за умов зовнішньої пролонгованої низькоінтенсивної дії опромінення на проросле насіння [34].

Динаміка розподілу радіонуклідів у системі вода—завись—донні відклади є предметом багатьох досліджень. У результаті вивчення питомої активності радіонуклідних забруднень поверхневих водійм зони відчуження Чорнобильської АЕС [6, 16, 24] встановлено, що радіонукліди, потрапивши з поверхневими і ґрунтовими водами в гідрологічну мережу, розбавляються водами чистих приток і виносяться з водотоками у р. Дніпро та його водосховища або локалізуються в безстічних замкнених водних системах, де швидко включаються в біологічний кругообіг. Переважна кількість радіонуклідів у озерних екосистемах накопичена в донних відкладах, тому в більшості непроточних водійм питома активність радіонуклідів у воді переважно залежить від інтенсивності обміну їх мобільних форм між донними відкладами і водними масами. Компоненти річкових екосистем, донні відклади яких зазнають природного самоочищення, мають найнижчу питому активність радіонуклідів [8]. Здатністю накопичуватися в донних відкладах характеризуються не лише штучні, а й природні радіонукліди, що може посилювати локальне радіоактивне забруднення [11].

Істотне зростання рівня цитогенетичної активності радіонуклідних забруднень донних відкладів порівняно зі спонтанними показниками виявлено в кар'єрі «Тритузний» та витоку р. Коноплянка. Частота хромосомних аберацій клітин меристеми первинних корінців пшениці становила відповідно  $1,47 \pm 0,31$  і  $1,89 \pm 0,36$  % у сорту Альбатрос одеський та  $2,00 \pm 0,34$  і  $2,13 \pm 0,36$  % у сорту Зимоярка (табл. 2), що в 2,1—3,0 раза перевищувало контрольні показники. Збільшення в 1,3—1,6 раза кількості аберантних клітин за впливу донних відкладів перепускного каналу є неістотним по відношенню до показників контролю і може бути наслідком слабкої адсорбції радіонуклідів піщаним і дрібногравійним донним субстратом в умовах річкового водотоку [9].

Хромосомні аберації — одна з ознак дестабілізації каріотипу, активації соматичного мутагенезу, яку традиційно використовують для тестування генотоксичних ефектів. Вона об'єднує групу феноменів, що від-

ТАБЛИЦА 2. Частота і спектр хромосомних абераций в озимій пшениці за дії радіонуклідного забруднення долинних відкладів поверхневих водойм зони впливу хвостосховища «Дніровське»

Місце відбору зразків	Вивчено ана-телофаз мітозів, шт.	Мітози з порушеннями і хромосомними аберациями		Спектр порушень мітозу та хромосомних абераций								Кількість абераций на аберантну клітину						
		шт.	%	Фрагменти	Мітози		Місти + фрагменти	Мікроядра		Відстаючі хромосоми		Хромосомні кільця						
					шт.	%		шт.	%	шт.	%	шт.	%					
Альбатрос одеський																		
оз. Голосівецьке (контроль)	1555	10	0,64±0,20	6	0,39	3	0,19	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1	0,06	0	0,00	1,00±0,00
Кар'єр «Григузний»	1500	22	1,47±0,31*	8	0,53	12	0,80*	0	0,00	1	0,07	1	0,07	1	0,07	0	0,00	1,09±0,06
Перепускний канал р. Коношлянка	1409	12	0,85±0,24	7	0,50	5	0,35	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1,08±0,09
Вилік р. Коношлянка	1428	27	1,89±0,36**	14	0,98	8	0,56	0	0,00	2	0,14	3	0,21	0	0,00	0	0,00	1,19±0,07*
Зимоярка																		
оз. Голосівецьке (контроль)	1274	12	0,94±0,27	5	0,39	6	0,47	1	0,08	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1,08±0,11
Кар'єр «Григузний»	1649	33	2,00±0,34*	10	0,61	21	1,27*	0	0,00	0	0,00	1	0,06	1	0,06	1	0,06	1,12±0,06
Перепускний канал р. Коношлянка	1645	25	1,52±0,30	10	0,61	14	0,85	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1	0,06	1,24±0,09
Вилік р. Коношлянка	1641	35	2,13±0,36**	7	0,43	23	1,40**	2	0,12	0	0,00	3	0,18	0	0,00	0	0,00	1,31±0,09

\*Різниця з контролем статистично вірогідна за  $P < 0,05$ .

\*\*Різниця з контролем статистично вірогідна за  $P < 0,01$ .

різняються за механізмами виникнення [14]. У спектрі типів хромосомних аберацій, індукованих забрудненням природними радіонуклідами води і донних відкладів поверхневих водойм переважають ацентричні фрагменти і дицентрики. На відміну від спектра спонтанних цитогенетичних порушень разом з індукованими радіонуклідним забрудненням аберациями хроматидного типу зростають частки парних фрагментів (рис. 1, *а*), хроматидних і хромосомних мостів (див. рис. 1, *б*, *в*). Виникнення хромосомних фрагментів найчастіше відображає пошкодження ДНК, які виникають до початку реплікації, хроматидних — в її процесі. Вважають, що делеції фрагментів ДНК різного розміру, розриви хроматид та їх перебудови є найхарактернішими радіаційно індукованими пошкодженнями хромосом в S і G<sub>2</sub> періоди мітотичного циклу [25, 39, 40], а зростання їх рівня до 79 % [14] — характерна реакція клітин організмів на хронічне опромінення в зоні відчуження ЧАЕС.

Істотне зростання в 2,5—4,3 раза частоти клітин з дицентриками — індикаторів радіаційного опромінення, виявлено за умов впливу на проросле насіння пшениці обох сортів проб води і донних відкладів кар'єру «Тригузний» (рис. 2). Високу частоту дицентричних хромосом зумовлює також пролонгована дія води і донних відкладів витоку р. Коноплянка на меристематичні клітини первинних корінців пшениці сорту Зимоярка. Проте вплив радіонуклідного забруднення води перепускного каналу седиментаційного відстійника р. Коноплянка супроводжується істотним зростанням частоти одиничних і парних ацентричних фрагментів, що становить 0,77 % у сорту Альбатрос одеський, 1,08 % у сорту Зимоярка і перевищує показники контролю відповідно в 2,4 і 3,2 раза. Таку ж дію чинять забруднені радіонуклідами донні відклади витоку р. Коноплянка на меристематичні клітини первинних корінців сорту Альбатрос одеський, вони індукують фрагменти з частотою 0,98 %, що в 2,5 раза вище від спонтанного рівня. Спектр типів хромосомних аберацій клітин пшениці сорту Зимоярка за умов впливу води і донних відкладів кар'єру «Тригузний», води витоку р. Коноплянка та донних відкладів перепускного каналу р. Коноплянка розширюється внаслідок індукування з частотою 0,05—0,07 % хромосомних кілець.

Розрив хромосом і утворення мостів супроводжується появою ацентричних фрагментів, які найчастіше запізнюються в мітозі. За радіаційного впливу формування мікроядер на 90 % пов'язане з включенням таких фрагментів [14, 33]. Серед типів аномалій мітозу, індукованих впливом радіонуклідного забруднення води і донних відкладів кар'єру «Тригузний» і води витоку р. Коноплянка, виявлено мікроядра (див. рис.

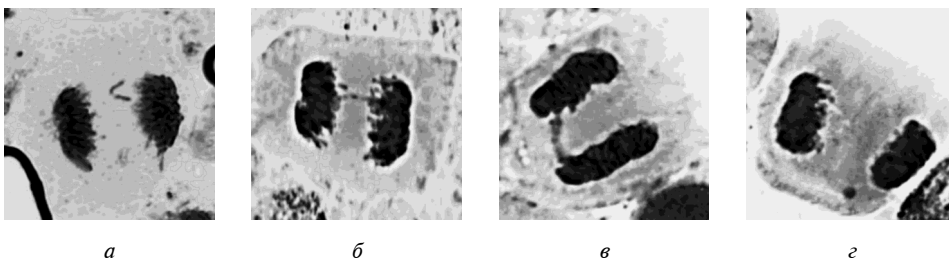


Рис. 1. Типи хромосомних аберацій, індуковані радіонуклідним забрудненням води і донних відкладів водойм зони впливу хвостосховища «Дніпровське»:

*а* — парні ацентричні фрагменти; *б* — хроматидний міст; *в* — хромосомний міст; *г* — мікроядро

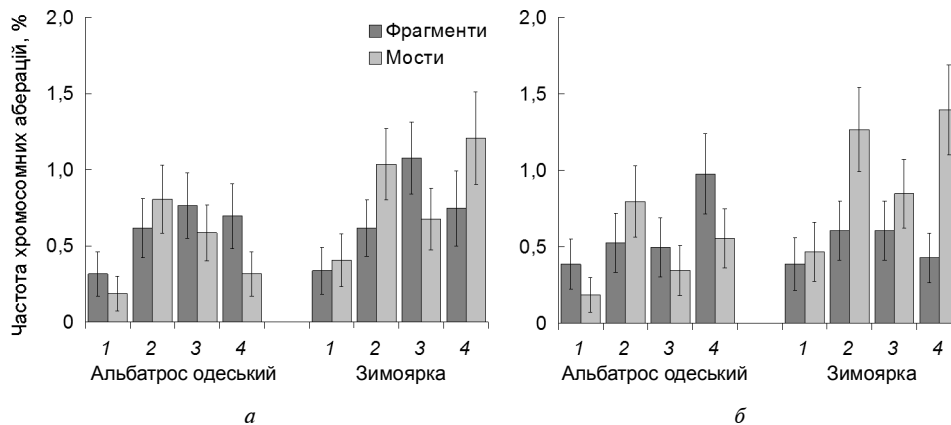


Рис. 2. Частота утворення ацентричних фрагментів і мостів за впливу радіонуклідних забруднень води (а) і донних відкладів (б) водойм зони впливу хвостосховища «Дніпровське»: 1 — оз. Голосіївське (контроль); 2 — кар'єр «Трибузний»; 3 — перепускний канал р. Коноплянка; 4 — витік р. Коноплянка

1, з), які в клітинах кореневої меристеми сорту Альбатрос одеський траплялися з частотою 0,07—0,14 %, сорту Зимоярка — з частотою 0,05 %, що істотно менше за частоту аберантних клітин із фрагментами. Різницю між частотою клітин із фрагментами і клітин з мікроядрами за дії іонізуючої радіації зазначали й інші автори [33]. Це свідчить про те, що хоча мікроядра утворюються переважно з ацентричних фрагментів, однозначного зв'язку між ними немає. Не всі ацентрики формують мікроядра: частина з них потрапляє в дочірнє ядро; кілька ацентричних фрагментів можуть формувати одне мікроядро; фрагменти, видимі в анафазі на екваторі поділу, можуть «втягуватися» назад і поглинатися дочірнім ядром; сестринські хроматиди хромосомного фрагмента можуть розділитися й утворювати два мікроядра; розірвані в анафазі мости також можуть давати ацентричні фрагменти і відповідно мікроядра. Крім того, мікроядра часто не рееструються внаслідок їх малого розміру або накладання ядра. Ймовірність усіх цих процесів може бути несталою і залежати від розміру, кількості, походження фрагментів, багатьох інших нез'ясованих чинників [33].

Радіонуклідне забруднення проб води з водойм зони впливу хвостосховища «Дніпровське» індукує істотне зростання анеуплоїдних клітин кореневої меристеми пшениці. Найвищою частотою патологій розходження хромосом у мітозі до полюсів характеризувались клітини пшениці сорту Альбатрос одеський за мутагенної дії на них води кар'єру «Трибузний» — 0,56 %, перепускного каналу седиментаційного відстійника р. Коноплянка — 0,29 %, донних відкладів витоку р. Коноплянка, а також сорту Зимоярка за впливу води перепускного каналу седиментаційного відстійника р. Коноплянка — 0,23 % і донних відкладів витоку р. Коноплянка — 0,18 %. Збільшення частки клітин із мікроядрами і патологіями поділу, як правило, супроводжується пригніченням мітотичної активності, що може бути зумовлене зниженою життєздатністю клітин із мікроядрами й відстаючими хромосомами [41]. У зв'язку з цим виявлена за дії радіонуклідного забруднення поверхневих водойм висока частота клітин з аномаліями мітозу може вказувати на можливий в подальшому прояві пригнічення росту окремих органів рослин і організму в цілому. За даними Д.М. Гродзинського та І.М. Гудко-



ва [5], у багатьох видів рослин, що зростають в умовах урано-радієвого і стронцієво-ітрієвого забруднення, знижується інтенсивність фотосинтезу, транспірації, синтезу окремих метаболітів, затримується настання окремих фаз онтогенезу, збільшується тривалість вегетаційного періоду.

У цитогенетичних дослідженнях для збільшення інформативності аналізу крім частоти аберантних клітин та аберацій хромосом враховують і такі показники, як кількість аберацій на аберантну клітину, типи аберацій, їх співвідношення, частота мультиаберантних клітин, особливості розподілу аберацій по клітинах. За допомогою поклітинного розподілу аберацій можна робити припущення стосовно механізмів взаємодії мутагенного чинника з хромосомами [17]. Індукування множинних хромосомних аберацій було характерним переважно за впливу на проросле насіння мутагенно забрудненої води, в той час як за дії забруднень донних відкладів частота мультиаберантних клітин не перевищувала спонтанного рівня. Статистично вірогідне збільшення частоти клітин із комплексними аберациями (0,25 %), що включали ацентричні фрагменти і мости, виявлено в меристемі первинних корінців пшениці сорту Альбатрос одеський, які зазнали впливу радіонуклідного забруднення води кар'єру «Тритузний». Серед них траплялися клітини з одним фрагментом і хроматидним мостом, парними фрагментами і хроматидним мостом, двома парними фрагментами і хромосомним мостом. Підвищену частоту клітин із множинними аберациями (0,17 %) виявлено в меристемі проростків пшениці сорту Зимоярка, що зазнали пролонгованої дії радіонуклідів води перепускного каналу седиментаційного відстійника р. Коноплянка, однак цей показник неістотно перевищував контрольні значення.

У результаті визначення показника  $K_{\text{АнаАК}}$ , який є якісно відмінною кількісною характеристикою цитогенетичної активності радіаційного забруднення середовища [32], встановлено, що для сорту Альбатрос одеський він найвищий за умов впливу води кар'єру «Тритузний» ( $1,50 \pm 0,11$ ), перепускного каналу седиментаційного відстійника р. Коноплянка ( $1,18 \pm 0,07$ ) та води ( $1,39 \pm 0,14$ ) і донних відкладів ( $1,19 \pm 0,07$ ) витоку р. Коноплянка, для сорту Зимоярка — води кар'єру «Тритузний» ( $1,32 \pm 0,09$ ) і донних відкладів витоку р. Коноплянка ( $0,31 \pm 0,09$ ). Відомо, що індуквані іонізуючим випромінюванням первинні пошкодження молекул ДНК розподілені по клітинах відповідно до закону Пуассона [30], а їх кінцевий розподіл може істотно від цього відрізнятися. Більш того, чим значніша роль систем відновлення, тим більше розподіл пошкоджень має відрізнятися від пуассонівського. Відомо, що кількість мультиаберантних клітин дозозалежно збільшується лише за умови значного мутагенного навантаження [32], тому зростання показника  $K_{\text{АнаАК}}$  за впливу забруднень водойм природними радіонуклідами свідчить про їх високу мутагенну активність, яка частково визначається особливістю реакції-відповіді системи відновлення ДНК радіаційно ураженої клітини в діапазоні малих доз. Таке припущення знаходить своє підтвердження в ході аналізу експериментальних даних щодо розподілу структурних мутацій по клітинах при опроміненні насіння і проростків багатьох інших сільськогосподарських рослин [38].

Отже, радіонуклідні забруднення води і донних відкладів поверхневих водойм зони впливу хвостосховища уранодобувної промисловості виявляють високу цитогенетичну активність, яка в 1,3—4,4 раза перевищує спонтанний рівень. Найвищу частоту аберантних клітин індукують

забруднення природними радіонуклідами води перепускного каналу седиментаційного відстійника р. Коноплянка. Збереження високого рівня цитогенетичної активності води кар'єру «Тритузний» за майже вдвічі нижчої питомої активності радіонуклідних забруднень може свідчити про можливі генетичні наслідки адитивного чи синергічного ефекту комплексної дії опромінення та підвищених концентрацій сполук важких металів, що потрапляють із хвостосховища. Підвищення в 1,3–2,9 раза частоти клітин із хромосомними абераціями за умов впливу донних відкладів радіонуклідно забруднених водойм вказує на небезпеку часткового переходу природних радіонуклідів з товщі води у донні субстрати, що може призводити до локального зростання мутагенної активності в результаті їх накопичення. Спектр типів хромосомних аберацій формують переважно одиничні й парні ацентричні фрагменти, хромосомні й хроматидні мости. Радіонуклідні забруднення водойм спричиняють високу частоту аномалій мітозу, що в подальшому можуть виявлятися зниженою життєздатністю клітин, пригніченням росту і розвитку рослин. Підвищена частота клітин із множинними абераціями, зростання показника КАнаАК за впливу забруднень водойм природними радіонуклідами свідчить про їх високу мутагенну активність, яка частково може бути зумовлена особливістю реакції-відповіді системи відновлення радіаційно індукованих цитогенетичних порушень у діапазоні малих доз опромінення.

1. Артамонов В.М., Камуз А.М. Вплив діяльності АТЗТ «Веско» на стан забруднення басейну ріки Казений Торець поверхнево-активними речовинами // Проблеми екології. — 2007. — № 1–2. — С. 16–20.
2. Баранов В., Баня А., Боднар Л. та ін. Токсикологічний аналіз води дренажних каналів і золи золівідвалів Добротвірської ТЕС // Вісн. Львів. ун-ту. Сер. Біологія. — 2014. — Вип. 65. — С. 238–244.
3. Болсуновский А.Я., Муратова Е.Н., Суковатый А.Г. и др. Радиоэкологический мониторинг реки Енисей и цитогенетические характеристики водного растения *Elodea canadensis* // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2007. — 47, № 1. — С. 63–73.
4. Виконання робіт згідно з програмами і регламентами радіаційного моніторингу: Звіт про результати. Госпдоговір 9 з ДП «Бар'єр» від 28.05.08, керівник НДР О.В. Войцехович / ЦМДПТ. — К., 2008. — 66 с.
5. Гродзинский Д.М., Гудков И.Н. Радиационное поражение растений в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2006. — 46, № 2. — С. 189–199.
6. Гудков Д.И., Каглян А.Е., Кленус В.Г. и др. Современные уровни и динамика радионуклидного загрязнения компонентов водных экосистем в Чернобыльской зоне отчуждения // Наук. зап. Терноп. нац. пед. ун-ту. Сер. Біологія. — 2015. — 64, № 3–4. — С. 149–152.
7. Гудков Д.И., Кузьменко М.И., Киреев С.И. и др. Радиоэкологические проблемы водных экосистем в Чернобыльской зоне отчуждения // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2009. — 49, № 2. — С. 192–202.
8. Гудков Д., Кузьменко М., Киреев С. та ін. Радіоекологічні проблеми водних екосистем зони відчуження Чорнобильської АЕС // Вісн. НАН України. — 2008. — № 4. — С. 44–55.
9. Долина Л.Ф., Гулько Е.Ю., Машихина П.Б. Защита вод от радиоактивного загрязнения. — Днепропетровск: Лира, 2016. — 477 с.
10. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследования). — М.: Колос, 1985. — 423 с.
11. Зайченко Е.Ю., Севериновская Е.В., Дворецкий А.И. и др. Экологическая опасность радиационно-химического загрязнения Приднепровского региона // Экологія і природокористування. — 2014. — Вип. 18. — С. 84–94.
12. Заниздра В.С., Жданова Г.В. Мониторинговые исследования радиоактивности в хранилище отходов уранового производства «Днепропровское» // Зб. наук. праць Севастоп. нац. ун-ту ядерної енергії та промисловості. — 2013. — Вип. 2. — С. 101–110.

13. *Кириченко В.К.* Радіоекологічна небезпека та додаткове дозове навантаження на населення від хвостосховища Придніпровського хімічного заводу: Автореф. дис. ... канд. біол. наук. — К., 2015. — 21 с.
14. *Ковалева О.А.* Цитогенетические аномалии в соматических клетках млекопитающих // Цитология и генетика. — 2008. — **42**, № 1. — С. 58—72.
15. *Ковалевский Л.И., Оперчук А.П., Лось И.П.* Состояние радиационной безопасности на урановых шахтах Украины // Довкілля та здоров'я. — 2008. — № 2. — С. 4—8.
16. *Кузьменко М.І.* Радіонуклідна аномалія. — К.: Академперіодика, 2013. — 394 с.
17. *Куцоконь Н.К., Безруков В.Ф., Лазаренко Л.М. та ін.* Кількість аберацій на аберантну клітину як параметр хромосомної нестабільності. 1. Характеристика дозових залежностей // Цитология и генетика. — 2003. — **37**, № 4. — С. 20—25.
18. *Международные программы МАГАТЭ по обращению с РАО* [Электронный ресурс], 2012. — Режим доступа: <http://ecsocman.hse.ru>.
19. *От мифов и фобий к возрождению безопасности производств на площадке бывшего ПО «Приднепровский химический завод»* (по результатам совещания экспертов на ГП «Барьер» 11.08.2016) [Электронный ресурс], 2016. — Режим доступа: <http://baryer.dp.ua/index.php/uk/press-office/news-and-events/53-ot-mifov-i-fobij-k-vozrozhdeniyu-bezopasnosti-proizvodstv-na-ploshchadke-byvshogo-po-pridneprovskij-khimicheskij-zavod>.
20. *Паушева З.П.* Практикум по цитологии растений. — М.: Агропромиздат, 1988. — 271 с.
21. *Письменная О.Б.* Экономическая оценка целесообразности обессоливания шахтных вод урановых рудников // Матеріали п'ятої Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми природокористування сталого розвитку та техногенної безпеки регіонів» (Дніпропетровськ, 8—9 жовтня 2009). — Ч. 1. — Дніпропетровськ, 2009. — С. 74—75.
22. *Рожко М.М., Ерстенюк Г.М., Крижанівська А.Є. та ін.* Розробка та впровадження системи зменшення техногенного навантаження на території і населення екологічно кризових територій // Екологія і природокористування. — 2014. — Вип. 18. — С. 97—110.
23. *Романенко В.Д.* Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод. — К.: Логос, 2006. — 408 с.
24. *Руденко Л.И., Хан В.Е., Одинцов А.А., Джуужа О.В.* Фазовое распределение, формы нахождения и доля микрочастиц в грунтовой воде по <sup>137</sup>Cs, <sup>90</sup>Sr, урану и трансурановым элементам // Доп. НАН України. — 2013. — № 7. — С. 165—171.
25. *Рябенко Н.М.* Цитогенетичні показники в оцінці індивідуальної радіаційної чутливості людини // Матеріали наук.-практ. конф. з міжнародною участю «Радіоекологія—2014» (Київ, 24—26 квітня 2014). — Житомир: Вид-во Житомир. держ. ун-ту ім. І. Франка, 2014. — С. 236—240.
26. *Сердюк С.М.* Диагностика загрязнения тяжелыми металлами почвенного покрова индустриально-урбанизированных территорий // Екологія та ноосферологія. — 2007. — **18**, № 3—4. — С. 133—138.
27. *Скляр Н.* Заручник хвостосховищ / М. Андрущенко // Надзвичайна ситуація. — 2009. — № 6. — С. 24—26.
28. *Сорока Ю.М., Рець Ю.М., Чесанов В.Л.* Обгрунтування радіаційної безпеки при проектуванні заходів по розчищенню річки Коноплянка // Строительство, материаловедение, машиностроение. Сер. Безопасность жизнедеятельности. — 2016. — Вып. 93. — С. 106—112.
29. *Суматохіна І.М., Дук Н.М., Шевченко О.А.* Промислові відходи як чинник стану екологічної безпеки регіону: оцінка, картографування, управління // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. — 2008. — № 1. — С. 69—75.
30. *Тимофеев-Ресовский Н.В., Иванов В.И.* Применение принципа попадания в радиобиологии. — М.: Атомиздат, 1968. — 228 с.
31. *Тяпкин О.К., Подрезенко И.Н., Остапенко Н.С. и др.* Особенности мониторинговых исследований техногенного влияния на гидросистемы в горнодобывающих регионах // Горный информ.-аналит. бюл. — 2016. — № 3. — С. 235—340.
32. *Шкарупа В.М., Неумержицька Л.В., Клименко С.В., Симиглазова Т.В.* Динаміка змін спектра аберацій хромосом, індукованих мітоміцином С у *Allium cepa* L. // Вісн. УТГіС. — 2011. — **9**, № 1. — С. 112—117.
33. *Шмакова Н.Л., Насонова Е.А., Красавин Е.А. и др.* Индукция хромосомных aberrаций и микроядер в лимфоцитах периферической крови человека при действии малых доз облучения // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2006. — **46**, № 4. — С. 480—487.
34. *Якимчук Р.А., Валюк В.Ф.* Мутагенна активність радіонуклідних забруднень водою в ближній зоні відчуження Чорнобильської АЕС // Зб. матеріалів І Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених «Проблеми екології та еволюції екосистем в умовах трансформованого середовища» (Київ, 25—26 травня 2017). — К.: ДУ «ІЕЕ НАН України», 2017. — С. 176—181.

35. ДСТУ ISO 5667-6—2001. Якість води. Відбирання проб. Частина 6. Настанови щодо відбирання проб води з річок та інших водотоків. — К., 2002. — 11 с.
36. ДСТУ ISO 5667-4—2003. Якість води. Відбирання проб. Частина 4. Настанови щодо відбирання проб з природних та штучних озер. — К., 2003. — 11 с.
37. Dvoretzky A.I., Belokon A.S., Severinovskaya E.V. et al. Ecological-toxicological estimation of superficial water quality of middle Dnieper in conditions of anthropogenic influence // Efficient Water Management: World Water Congress. — Berlin, 2001. — P. 18.
38. Geras'kin S.A., Oudalova A.A., Kim J.K. et al. Cytogenetic effect of low dose  $\gamma$ -radiation in *Hordeum vulgare* seedlings: non linear dose-effect relationship // Radiat. Environ. Biophys. — 2007. — **46**, N 1. — P. 31—41.
39. Naito K., Kusabba M., Shikazono N. et al. Transmissible and nontransmissible mutations induced by irradiation *Arabidopsis thaliana* pollen with  $\gamma$ -rays and carbon ions // Genetics. — 2005. — N 169. — P. 881—889.
40. Puchta H. The repair of double-strand breaks in plants: molecular mechanisms and consequences for genome evolution // J. Exp. Bot. — 2005. — **56**, N 409. — P. 1—14.
41. Takatsuji T., Takayanagi H., Morishita K. et al. Induction of micronuclei in germinating onion seed root tip cells irradiated with high energy heavy ions // J. Rad. Res. — 2010. — **51**, N 3. — P. 315—323.

Отримано 06.07.2017

ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЗАГРЯЗНЕННЫХ РАДИОНУКЛИДАМИ  
ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДОЕМОВ ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ ХВОСТОХРАНИЛИЩА  
УРАНОДОБЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Р.А. Якимчук

Институт физиологии растений и генетики Национальной академии наук Украины, Киев

Проведен цитогенетический анализ клеток корневой меристемы пшеницы мягкой озимой (*Triticum aestivum* L.), семена которой были пророщены в условиях влияния загрязнений естественными радионуклидами воды и донных отложений водоемов зоны влияния хвостохранилища уранодобывающей промышленности. Частота хромосомных aberrаций в 1,3—4,4 раза превышала спонтанный уровень. Спектр типов цитогенетических нарушений преимущественно формируют ацентрические фрагменты и мосты. Повышенная частота клеток с множественными aberrациями в условиях влияния радионуклидов водоемов свидетельствует об их высокой мутагенной активности, которая частично может быть обусловлена особенностью реакции-ответа системы восстановления радиационно индуцированных цитогенетических нарушений в диапазоне малых доз облучения.

CYTOGENETIC ACTIVITY OF RADIONUCLIDE CONTAMINATED SUPERFICIAL  
WATER RESERVOIRS IN THE AFFECT ZONE OF TAILING STORAGE OF URANIUM  
MINING INDUSTRY

R.A. Yakimchuk

Institute of Plant Physiology and Genetics, National Academy of Sciences of Ukraine  
31/17 Vasylykivska St., Kyiv, 03022, Ukraine

A cytogenetic analysis of root meristem cells of *Triticum aestivum* L., whose seeds were grown in the conditions of natural radionuclide contaminated water and bottom deposits of water reservoirs in the affect zone of tailing storage of uranium mining industry, was made. Frequency of chromosome aberrations exceeds a spontaneous level by 1.3—4.4 times. Type spectrum of cytogenetic disorders includes acentric fragments and bridges. Increased frequency of the cells with multiple aberrations in the conditions of effect of water reservoirs radionuclides confirms their high mutagenic activity, which can be partially explained by specific response of the restoration system to radiation-induced cytogenetic disorders in the range of low-rate radiation.

*Key words:* *Triticum aestivum* L., cytogenetic disorders, chromosome aberrations, mitosis anomaly, radionuclide contamination, superficial water reservoirs.