

УДК 575.224.4 : 633.111

## **ЦИТОГЕНЕТИЧНА АКТИВНІСТЬ РАДІОНУКЛІДНО ЗАБРУДНЕНИХ ПОВЕРХНЕВИХ ВОДОЙМ ЗОНИ ВПЛИВУ ХВОСТОСХОВИЩА УРАНОДОБУВНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

Р.А. ЯКИМЧУК

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

Проведено цитогенетичний аналіз клітин кореневої меристеми *T. aestivum L.*, насіння якої пророщено 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 перевищує спонтанний рівень. Спектр типів цитогенетичних порушень переважно складають ацентричні фрагменти та мости. Підвищена частота клітин з множинними абераціями за умов впливу радіонуклідів водойм свідчить про їх високу мутагенну активність, яка частково може бути обумовлена особливістю реакції відповіді системи відновлення радіаційно індукованих цитогенетичних порушень в 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 з Чорнобильською аварією, яка за площами охоплених територій, кількістю постраждалого населення і тривалістю впливу радіонуклідних забруднень залишається найбільш значущою техногенною

катастрофою в історії людства. Ще більшої гостроти і масштабності набула проблема радіаційної безпеки після вибуху на АЕС «Фукусіма-1» (Японія) в 2011 р. [13]. Разом з тим, як в Україні, так і в деяких інших країнах гостра кризова радіоекологічна ситуація формувалася десятиріччями задовго до радіаційних катастроф та пов'язана з видобутком, переробкою уранової руди і утворенням сховищ відносно низькоактивних відходів збагачення урану [20].

За обсягом радіоактивних відходів (60 млн. т.) Дніпропетровський регіон в Україні займає друге місце після Чорнобильської зони [24, 31]. 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 (86000 Ки) [20, 29]. Розповсюдження матеріалу хвостосховищ, спричинених ерозійними процесами, та забруднення природними радіонуклідами ґрунту, атмосфери, поверхневих і підземних вод сприяє зростанню опромінення населення України природними радіонуклідами, яке у 75 разів більше загального опромінення від усіх техногенних причин, включаючи аварію на Чорнобильській АЕС та перевищує майже у два рази середньосвітовий рівень [17, 29]. 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 [24, 28].

За даними ВООЗ 80 % захворювань, від яких щороку у світі помирає 25 млн. людей, пов'язані із забрудненням води. На сьогодні прісні водойми відносять до переліку критичних об'єктів навколишнього середовища, у які потрапляють води атомних енергоблоків і розвантажуються підземні радіоактивно-забруднені води від хвостосховищ відходів уранового виробництва [1, 23, 30]. Велика увага приділяється вивченню їх мутагенної активності та прогнозуванню генетичних наслідків радіонуклідного забруднення для живих організмів [2, 3, 6, 7, 9]. Згідно висновків експертів

МАГАТЕ хвостосховище «Дніпровське» в м. Кам'янське (12 млн. т відходів) є найбільш небезпечним для оточуючого середовища, що пов'язано з його близькістю до р. Дніпро, наявністю витоків і можливості катастрофічного руйнування утримуючої греблі. Основними джерелами надходження радіонуклідів із хвостосховища у р. Дніпро є розвантаження забруднених підземних вод, поверхневий стік із забрудненої території проммайданчика і річковий стік р. Коноплянка, з яким протягом року виноситься  $13,2 \cdot 10^{10}$  Бк природних радіонуклідів [13, 15, 37]. Більшістю досліджень увага приділяється вивченню питомої активності природних радіонуклідів у прилеглих до хвостосховища водоймах, їх ізотопному складу, сезонним змінам, розподілу за течією р. Коноплянка, накопиченню в гідробіонтах [4, 9, 13, 15, 30]. Проте наслідки їх впливу на живі організми за складних взаємодій з різноманітними хімічними сполуками проаналізувати лише фізичними та хімічними методами неможливо [33]. Використання рослинних тест-об'єктів для оцінки генотоксичності води і донних відкладів радіонуклідно забруднених водойм і водотоків дозволить встановити ризик виникнення мутагенних ефектів у контактуючих з ними живих організмів та передбачити можливість виникнення віддалених генетичних наслідків.

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

### **Методика**

Насіння двох сортів пшениці м'якої озимої (*T. aestivum* L.) Альбатрос одеський і Зимоярка пророщувалось 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, вибір значень цього показника був здійснений з використанням літературних даних. У місцях витоку р. Коноплянка та 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 [14]. Питома активність радіонуклідів води кар'єру «Тригузний» складала  $^{238}\text{U}$  -  $^{234}\text{U}$  – 0,280 Бк/л,  $^{226}\text{Ra}$  – 0,032 Бк/л [14, 21]. За контроль було взято проби води і донних відкладів з умовно чистого оз. Голосіївське м. Києва. Проби води і донних відкладів відбирали в 2015 році відповідно до стандартних методик [11, 12, 25].

Насіння в кількості 50 шт. на варіант досліду витримували у вказаних пробах води впродовж 18 год., після чого висівали в чашках Петрі на фільтрувальному папері, зволоженому водою вказаних проб та пророщували за температури 24-26 °С. Для визначення цитогенетичної активності донних відкладів водойм насіння пророщувалось протягом 40 год. на їх піщаних і дрібногравійних субстратах. Первинні корінці довжиною 0,8-1,0 см фіксували протягом 4 год. у фіксаторі Кларка, що складається з 96 % розчину етилового спирту 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 та порушень мітозу клітин корінці поміщали у розчин ацетоорсеїну на 24 год. за температури 23-25 °С.

Для мікроскопічного аналізу готували тимчасові давлені цитологічні препарати за загальноприйнятими методами [22]. Мікроскопічне вивчення меристематичної зони корінців проводили з використанням мікроскопу «JENAVAL» (Carl Zeiss Jena) при збільшенні 900х. Під час визначення частоти хромосомних аберацій та порушень мітозу до уваги брали клітини, які перебували в анафазі та ранній телофазі. Вибірка становила не менше як 1000 клітин для кожного варіанту. Враховували частоту абераційних клітин як відсоток клітин в анафазі та ранній телофазі, що містили порушення

хромосом. При обчисленні середньої кількості аберацій на аберантну клітину (КАнаАК) враховували клітини з 0, 1, 2 та множинними хромосомними абераціями («>2» аберацій). Статистичну обробку експериментальних даних здійснювали загальноприйнятими методами [10], достовірність різниці оцінювали за критерієм Ст'юдента. У таблицях наведені середні арифметичні та їх стандартні похибки.

### **Результати й обговорення**

За дії радіонуклідно забруднених зразків води, відібраних з водоєм і водотоків зони вплив хвостосховища «Дніпровське», на меристему первинних корінців проростків озимої м'якої пшениці виявлено зростання в 2,3-4,4 раза кількості аберантних клітин у порівнянні з контрольними показниками. Найвищу цитогенетичну активність забруднень води р. Коноплянка виявлено в перепускному каналі седиментаційного відстійника. Частота клітин з хромосомними абераціями становить  $1,65 \pm 0,31$  % у сорту Альбатрос одеський та  $2,16 \pm 0,35$  % у сорту Зимоярка, що суттєво перевищує показники контролю відповідно в 3,2 та 2,6 раза (табл. 1). Забруднення води у створі витоку р. Коноплянка характеризується нижчими показниками цитогенетичної активності, однак рівень індукованих хромосомних порушень статистично достовірно вищий в 2,3-2,5 раза від спонтанного та складає  $1,15 \pm 0,27$  % у сорту Альбатрос одеський і  $2,03 \pm 0,39$  % 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 радіоізотопів води кар'єру «Тритузний» залежить від рівня радіонуклідного забруднення річки та ґрунтових вод, які є основним її джерелом [21]. Пролонгована дія води кар'єру «Тритузний» на кореневу меристему пшениці викликає суттєве зростання частоти клітин з порушеннями цілісності хромосом. Рівень аберантних меристематичних клітин становить  $2,24 \pm 0,37$  % у сорту

Альбатрос одеський та  $1,91 \pm 0,31$  % у сорту Зимоярка, що перевищує в 2,3-4,4 рази показники контролю. Враховуючи, що у поверхневій воді з ґрунтовими водами з хвостосховища «Дніпровське» крім природних радіонуклідів періодично потрапляють високі концентрації іонів важких металів (свинцю, марганцю, титану, лантану, цинку, барію, хрому), концентрації яких перевищують норму в 1,8-22,5 рази [33], можна припустити, що високий рівень цитогенетичної активності проб води з кар'єру «Тритузний» за майже вдвічі нижчої питомої активності радіонуклідів пов'язаний із адитивним чи синергетичним ефектами комплексної дії природних радіонуклідів та інших генотоксичних хімічних агентів. За підсумками попередньо проведеної низки досліджень з визначення цитогенетичної активності радіонуклідно забруднених поверхневих водійм зони відчуження Чорнобильської АЕС на різних рослинних тест-об'єктах встановлено позитивну кореляцію між частотою хромосомних аберацій і потужністю поглинутої дози хронічного зовнішнього і внутрішнього опромінення [6, 7, 18] та відсутність її – за умов зовнішньої пролонгованої низькоінтенсивної дії опромінення на проросле насіння [36].

Динаміка розподілу радіонуклідів у системі вода – завись – донні відклади є предметом низки досліджень. Вивчаючи питому активність радіонуклідних забруднень поверхневих водійм зони відчуження Чорнобильської АЕС [8, 18, 26] встановлено, що радіонукліди, потрапляючи з поверхневими та ґрунтовими водами в гідрологічну сітку, розбавляються чистими притоками 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 водіймах питома активність радіонуклідів у воді залежить переважно від інтенсивності обміну їх мобільних форм між донними відкладами і водними масами. Компоненти річкових

Таблиця 1

Частота і спектр хромосомних аберацій в озимій пшениці за дії радіонуклідного забруднення поверхневих водойм зони впливу хвостосховища «Дніпровське»

Місце відбору зразків	Вивчено ана-телофаз мітозів, шт.	Мітози з порушеннями і хромосомними абераціями		Спектр порушень мітозу та хромосомних аберацій												Кількість аберацій на аберагентну клітину
		шт.	%	фрагменти		мости		мости + фрагменти		мікроядра		відстаючі хромосоми		хромосомні кільця		
				шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%	
Альбатрос одеський																
оз. Голосіївське (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	1,00±0,00
Кар'єр «Тритузний»	1610	36	2,24±0,37**	10	0,62	13	0,81*	4	0,25*	0	0,00	9	0,56*	0	0,00	1,50±0,11**
Перепускний канал р. Коноплянка	1700	28	1,65±0,31**	13	0,77	10	0,59	0	0,00	0	0,00	5	0,29*	0	0,00	1,18±0,07*
Витік р. Коноплянка	1566	18	1,15±0,27*	11	0,70	5	0,32	0	0,00	0	0,00	2	0,13	0	0,00	1,39±0,14**
Зимоярка																
оз. Голосіївське (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	1,08±0,08
Кар'єр «Тритузний»	1933	37	1,91±0,31**	12	0,62	20	1,04*	1	0,05	1	0,05	2	0,10	1	0,05	1,32±0,09*
Перепускний канал р. Коноплянка	1758	38	2,16±0,35**	19	1,08**	12	0,68	3	0,17	0	0,00	4	0,23*	0	0,00	1,26±0,08
Витік р. Коноплянка	1326	27	2,03±0,39**	10	0,75	16	1,21*	0	0,00	0	0,00	0	0,00	1	0,07	1,22±0,08

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

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

екосистем, донні відклади яких зазнають природного самоочищення, характеризуються найнижчою питомою активністю радіонуклідів [6]. Здатністю накопичуватися в донних відкладах характеризуються не лише штучні, а й природні радіонукліди, що може посилювати локальне радіоактивне забруднення [13].

Суттєве зростання рівня цитогенетичної активності радіонуклідних забруднень донних відкладів, у порівнянні зі спонтанними показниками, виявлено в кар'єрі «Тригузний» та витоку р. Коноплянка. Частота хромосомних аберацій клітин меристеми первинних корінців пшениці складає 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 рази перевищує рівень контролю. Зростання в 1,3-1,6 рази кількості абераційних клітин за впливу донних відкладів перепускного каналу є несуттєвим по відношенню до показників контролю і може бути наслідком слабкої адсорбції радіонуклідів піщаним і дрібногравійним донним субстратом в умовах річкового водотоку [9].

Хромосомні аберації – це одна з ознак дестабілізації каріотипу, активації соматичного мутагенезу, яка традиційно використовується для тестування генотоксичних ефектів та об'єднує групу феноменів, що відрізняються за механізмами виникнення [16]. У спектрі типів хромосомних аберацій, індукованих забрудненням природними радіонуклідами води і донних відкладів поверхневих водойм переважають ацентричні фрагменти і дицентрики. На відміну від спектру спонтанних цитогенетичних порушень, поряд з індукованими радіонуклідним забрудненням аберацій хроматидного типу зростає частка парних фрагментів (рис. 1 а) і хромосомних мостів (рис. 1 б, в). Виникнення хромосомних фрагментів найчастіше відображає пошкодження ДНК, які виникають до початку реплікації, хроматидні – 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> періодах мітотичного циклу [27, 39, 40], а



Таблиця 2

Частота і спектр хромосомних аберацій в озимій пшениці за дії радіонуклідного забруднення донних відкладів  
поверхневих водойм зони впливу хвостосховища «Дніпровське»

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

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

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

зростання їх рівня до 79 % [16] є характерною реакцією клітин організмів на хронічне опромінення в зоні відчуження ЧАЕС.

Рис. 1. Типи хромосомних аберацій, індуковані радіонуклідним забрудненням води і донних відкладів водою зони впливу хвостосховища «Дніпровське»: а – парні ацентричні фрагменти, б – хроматидний міст, в – хромосомний міст, г – мікроядро.

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

Розрив хромосом і утворення мостів супроводжується появою ацентричних фрагментів, які найчастіше запізнюються в мітозі. За умов радіаційного впливу формування мікроядер на 90 % пов'язане з включенням таких фрагментів [16, 35]. Серед типів аномалій мітозу, індукованих впливом радіоізотопного забруднення води і донних відкладів кар'єру «Тритузний» та води витоку р. Коноплянка, виявлено мікроядра (рис. 1 г), які в клітинах кореневої меристеми сорту Альбатрос одеський зустрічаються з частотою 0,07-0,14 % і сорту Зимоярка – з частотою 0,05 %, що суттєво менше частоти аберантних клітин з фрагментами. Різниця між частотою клітин з фрагментами та клітин з мікроядрами за дії іонізуючої радіації була відмічена й іншими авторами [35]. 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 фрагменту можуть розділятися, утворюючи два мікроядра; розірвані в анафазі мости також можуть давати ацентричні фрагменти і відповідно мікроядра. Крім того мікроядра часто не реєструються внаслідок їх малого розміру або накладання ядра. Ймовірність усіх цих процесів може бути непостійною і залежати від розміру, кількості, походження фрагментів та багатьох інших невідомих факторів [35].

Радіонуклідне забруднення проб води з водойм зони впливу хвостосховища «Дніпровське» індукує суттєве зростання анеуплоїдних клітин кореневої меристеми пшениці. Найвищою частотою патологій розходження хромосом у мітозі до полюсів характеризуються клітини сорту Альбатрос одеський, які зазнали мутагенної дії води кар'єру «Тритузний» – 0,56 %, перепускного каналу седиментаційного відстійника р. Коноплянка – 0,29 %, донних відкладів витоку р. Коноплянка, та сорту Зимоярка за умов впливу води перепускного каналу седиментаційного відстійника

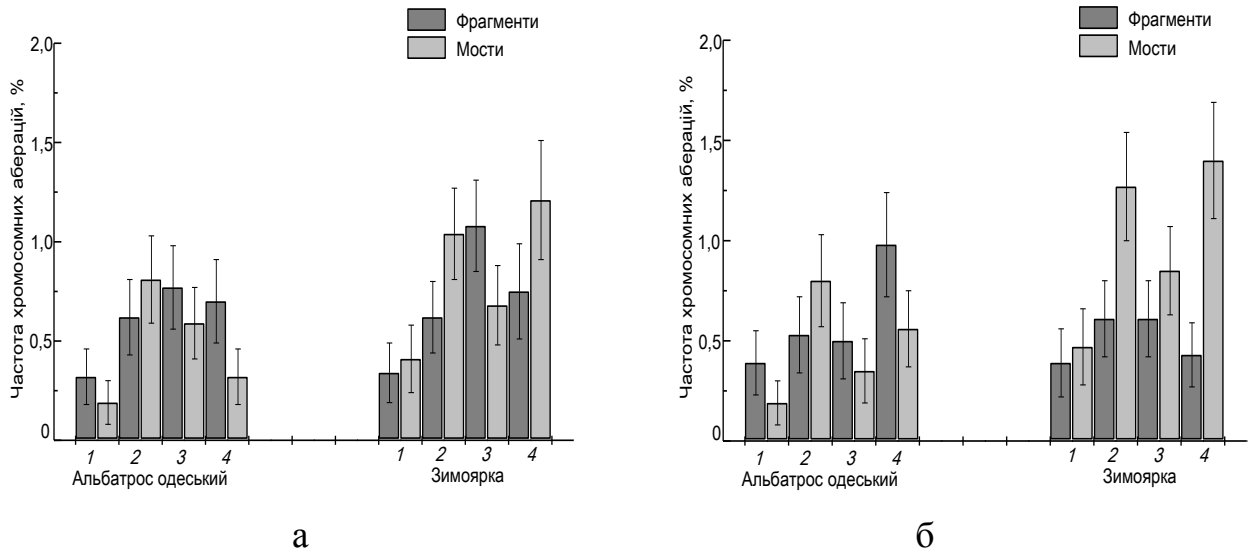


Рис. 2. Частота утворення ацентричних фрагментів і мостів за впливу радіонуклідних забруднень води (а) і донних відкладів (б) водойм зони впливу хвостосховища «Дніпровське»: 1 – оз. Голосіївське (контроль), 2 – кар'єр «Трибузний», 3 – перепускний канал р. Коноплянка, 4 – витік р. Коноплянка.

р. Коноплянка – 0,23 % і донних відкладів витоку р. Коноплянка – 0,18 %. Збільшення частки клітин з мікроядрами та патологіями поділу супроводжується, як правило, пригніченням мітотичної активності, що може бути зумовлене пониженою життєздатністю клітин з мікроядрами та відстаючими хромосомами [41]. Тому виявлена за дії радіонуклідного забруднення поверхневих водойм висока частота клітин з аномаліями мітозу може вказувати на можливі в подальшому прояви пригнічення росту окремих органів рослин і організму в цілому. За даними Д.М. Гродзінського та І.М. Гудкова (2006) в багатьох видів рослин, що зростають в умовах урано-радієвого і стронцієво-ітриєвого забруднення спостерігається зниження інтенсивності фотосинтезу, транспірації, синтезу окремих метаболітів, затримка настання окремих фаз онтогенезу, збільшення тривалості вегетаційного періоду [5].

В цитогенетичних дослідженнях для збільшення інформативності аналізу крім частоти аберантних клітин та аберацій хромосом враховуються також такі показники, як кількість аберацій на аберантну клітину, типи аберацій та їх співвідношення, частота мультиаберантних клітин, особливості розподілу аберацій по клітинах. За допомогою поклітинного розподілу аберацій можна робити припущення про механізми взаємодії мутагенного чинника з хромосомами [19]. Індукування множинних хромосомних аберацій виявилось характерним переважно за впливу на проросле насіння мутагенно забрудненої води, в той час як за дії забруднень донних відкладів частота мультиаберантних клітин не перевищує спонтанного рівня. Статистично достовірне зростання частоти клітин з комплексними абераціями (0,25 %), що включають ацентричні фрагменти і мости, виявлено в меристемі первинних корінців сорту Альбатрос одеський, які зазнали впливу радіоізотопного забруднення води кар'єру «Тритузний». Серед них зустрічаються клітини з одиничним фрагментом і хроматидним мостом, парними фрагментами і хроматидним мостом, двома парними фрагментами і хромосомним мостом. Підвищена частота клітин з множинними абераціями (0,17 %) виявлена в меристемі проростків сорту Зимоярка, що зазнали пролонгованої дії радіонуклідів води перепускного каналу седиментаційного відстійника р. Коноплянка, однак суттєвого перевищення показника контролю не прослідковується.

Визначаючи показник КАнаАК, який є якісно відмінною кількісною характеристикою цитогенетичної активності радіаційного забруднення середовища [34], встановлено, що для сорту Альбатрос одеський він є найвищим 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, а 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 індуковані іонізуючим випромінюванням первинні пошкодження молекул ДНК

розподілені по клітинах у відповідності з законом Пуассона [32], а їх кінцевий розподіл може суттєво від цього відрізнятися. Більш того, чим значиміша роль систем відновлення, тим більше розподіл пошкоджень повинен відрізнятися від пуассонівського. Крім того, дозозалежне збільшення кількості мультиаберантних клітин спостерігається лише за умов значного мутагенного навантаження [34]. Тому зростання показника КАнаАК в умовах впливу забруднень водою природними радіонуклідами свідчить про їх високу мутагенну активність, яка частково може бути визначена особливістю реакції відповіді системи відновлення ДНК радіаційно ураженої клітин в діапазоні малих доз. Таке припущення знаходить своє підтвердження в ході аналізу експериментальних даних про розподіл структурних мутацій по клітинах при опроміненні насіння і проростків багатьох інших сільськогосподарських рослин [38].

Таким чином, радіонуклідні забруднення води і донних відкладів поверхневих водою зони впливу хвостосховища уранодобувної промисловості проявляють високу цитогенетичну активність, яка в 1,3-4,4 рази перевищує спонтанний рівень. Найвищу частоту аберантних клітин індукують забруднення природними радіоізотопами 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 синергетичного ефекту комплексної дії опромінення та підвищених концентрацій сполук важких металів, що потрапляють із хвостосховища. Підвищення в 1,3-2,9 рази частоти клітин з хромосомними абераціями за умов впливу донних відкладів радіонуклідно забруднених водою вказує на можливість часткового переходу природних радіонуклідів з товщі води у донні субстрати та, в результаті їх накопичення, призводити до локального зростання мутагенної активності. Спектр типів хромосомних аберацій переважно складають одиничні й парні ацентричні фрагменти та мости хромосомного і

хроматидного типів. Радіонуклідні забруднення водойм викликають високу частоту аномалій мітозу, що в подальшому можуть проявлятися пониженою життєздатністю клітин та пригніченням росту і розвитку рослин. Підвищена частота клітин з множинними абераціями та зростання показника КАнаАК за умов впливу забруднень водойм природними радіонуклідами свідчить про їх високу мутагенну активність, яка частково може бути обумовлена особливістю реакції відповіді системи відновлення радіаційно індукованих цитогенетичних порушень в діапазоні малих доз опромінення.

### Література

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 зола відвалів Добротвірської ТЕС // Вісник Львівського університету. Серія 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., Кузьменко М., Кіреєв С. та ін.* Радіоекологічні проблеми водних екосистем зони відчуження Чорнобильської АЕС // Вісник НАН України. – 2008. – № 4. – С. 44-55.

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.И., Каглян А.Е., Кленус В.Г. и др.* Современные уровни и динамика радионуклидного загрязнения компонентов водных экосистем в Чернобыльской зоне отчуждения // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету. Серія Біологія. – 2015. – **64**, № 3-4. – С. 149-152.
9. *Долина Л.Ф., Гунько Е.Ю., Машихина П.Б.* Защита вод от радиоактивного загрязнения: Монография. – Д.: «ЛИРА», 2016. – 477 с.
10. *Доспехов Б.А.* Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследования). – М.: Колос, 1985. – 423 с.
11. ДСТУ ISO 5667-6-2001. Якість води. Відбирання проб. Частина 6. Настанови щодо відбирання проб води з річок та інших водотоків. Київ, 2002. – 11с.
12. ДСТУ ISO 5667-4-2003 Якість води. Відбирання проб. Частина 4. Настанови щодо відбирання проб з природних та штучних озер. Київ, 2003. – 11 с.
13. *Зайченко Е.Ю., Севериновская Е.В., Дворецкий А.И. и др.* Экологическая опасность радиационно-химического загрязнения Приднепровского региона // Екологія і природокористування. – 2014. – Випуск 18. – С. 84-94.
14. *Заниздра В.С., Жданова Г.В.* Мониторинговые исследования радиоактивности в хранилище отходов уранового производства «Днепровское» // Збірник наукових праць Севастопольського національного університету ядерної енергії та промисловості. – 2013. – Вип. 2. – С. 101-110.
15. *Кириченко В.К.* Радіоекологічна небезпека та додаткове дозове навантаження на населення від хвостосховища придніпровського хімічного



заводу: автореф. дис. ... канд. біол. наук: 03.00.01 – радіобіологія. – К., 2015. – 21 с.

16. *Ковалева О.А.* Цитогенетические аномалии в соматических клетках млекопитающих // Цитология и генетика. – 2008. – **42**, № 1. – С. 58-72.

17. *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.

18. *Кузьменко М.І.* Радіонуклідна аномалія. – К.: Академперіодика, 2013. – 394 с.

19. *Куцюконь 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.

20. Международные программы МАГАТЭ по обращению с РАО [Электронный ресурс], 2012. – Режим доступа: <http://ecsocman.hse.ru>

21. От мифов и фобий к возрождению безопасности производствна площадке бывшего ПО «Приднепровский химический завод» (по результатам совещания экспертов на ГП «Барьер» 11.08.2016 г.) [Электронный ресурс], 2016. – Режим доступа: <http://baryer.dp.ua/index.php/uk/press-office/news-and-events/53-ot-mifov-i-fobij-k-vozhrozhdeniyu-bezopasnosti-proizvodstv-na-ploshchadke-byvshego-po-pridneprovskij-khimicheskij-zavod>

22. *Паушева З.П.* Практикум по цитологии растений. – М.: Агропромиздат, 1988. – 271 с.

23. *Письменная О.Б.* Экономическая оценка целесообразности обессоливания шахтных вод урановых рудников. // Проблеми природо-користування сталого розвитку та техногенної безпеки регіонів: мат. п'ятої Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Дніпропетровськ, 08–09 жовтня 2009 р.). – Ч.1. – Дніпропетровськ, 2009. – с. 74-75.

24. *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.
25. *Романенко В.Д.* Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод. – К.: ЛОГОС, 2006. – 408 с.
26. *Руденко Л.И., Хан В.Е., Одинцов А.А., Джужа О.В.* Фазовое распределение, формы нахождения и доля микрочастиц в грунтовой воде по  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , урану и трансурановым элементам // Доповіді НАН України. – 2013. – № 7. – С. 165-171.
27. *Рябченко Н.М.* Цитогенетичні показники в оцінці індивідуальної радіаційної чутливості людини // Радіоекологія – 2014: Матеріали науково-практичної конференції з міжнародною участю (м. Київ, 24-26 квітня, 2014 р.). – Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка. – С. 236-240.
28. *Сердюк С.М.* Диагностика загрязнения тяжелыми металлами почвенного покрова индустриально-урбанизированных территорий // Екологія та ноосферологія. – 2007. – **18**, № 3-4. – С. 133-138.
29. *Скляр Н.* Заручник хвостосховищ / М. Андрущенко // Надзвичайна ситуація. – 2009. – № 6. – С. 24-26.
30. *Сорока Ю.М., Рець Ю.М., Чесанов В.Л.* Обгрунтування радіаційної безпеки при проектуванні заходів по розчищенню річки Коноплянка // Строительство, материаловедение, машиностроение: Серия «Безопасность жизнедеятельности». – 2016. – Вып. 93. – С. 106-112.
31. *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.
32. *Тимофеев-Ресовский Н.В., Иванов В.И.* Применение принципа попадания в радиобиологии – М.: Атомиздат, 1968. – 228 с.

33. Тяпкин О.К., Подрезенко И.Н., Остапенко Н.С. и др. Особенности мониторинговых исследований техногенного влияния на гидросистемы в горнодобывающих регионах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 3. – С. 235-340.

34. Шкарупа В.М., Неумержицька Л.В., Клименко С.В., Симиглазова Т.В. Динаміка змін спектра аберацій хромосом, індукованих мітоміцином С у *Allium cepa* L. // Вісник УТГіС. – 2011. – 9, № 1. – С. 112-117.

35. 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. – 480-487.

36. Якимчук Р.А., Валюк В.Ф. Мутагенна активність радіонуклідних забруднень водоюм ближньої зони відчуження Чорнобильської АЕС // Проблеми екології та еволюції екосистем в умовах трансформованого середовища: збірник матеріалів І Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених (Київ, 25-26 травня 2017 рік). – К.: ДУ «ІЕЕ НАН України», 2017. – С. 176-181.

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, № 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. – № 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**, № 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**, № 3. – P. 315-323.

## **ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ РАДИОНУКЛИДНО ЗАГРЯЗНЕННЫХ 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 *T. aestivum* L., семена которой 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 превышает спонтанный уровень. Спектр типов цитогенетических нарушений преимущественно составляют 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 of the National academy of sciences of Ukraine, Kiev

A cytogenetic analysis of root meristem cells of *T. aestivumL.*, 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 1.3-3.4 times. Type spectrum of cytogenetic disorders includes acentric fragments and bridges. Increased frequency of the cells with multiple aberrations in the conditions of radionuclide effect of water reservoirs confirms their high mutagenic activity, which can be partially explained by specific response of the restoration system of radiation-induced cytogenetic disorders in the range of low-rate radiation.

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