

УДК 633.11:575.224.4

## МУТАГЕННАЯ АКТИВНОСТЬ РАДИОНУКЛИДНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В ЗОНЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС

В.В. МОРГУН, Р.А. ЯКИМЧУК

*Институт физиологии растений и генетики Национальной академии наук Украины  
03022 Киев, ул. Васильковская, 31/17*

Изучали генетические последствия хронического облучения растений озимой пшеницы в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС. Установлено, что даже через 20 лет после аварии на ЧАЭС тенденция к снижению уровня мутационной изменчивости не наблюдается. Частота видимых мутаций через 7, 13 и 20 лет после аварии существенно превышала спонтанный уровень и включала широкий спектр их типов. Повышенный уровень мутационной изменчивости в зоне ЧАЭС свидетельствует о генетической угрозе всему живому на значительных территориях и требует дальнейшего тестирования генетических последствий загрязнения окружающей среды радионуклидами.

*Ключевые слова:* озимая пшеница, генетические последствия, видимые мутации, мутационная изменчивость, мутагенная активность.

Интенсивное развитие промышленности и транспорта, рост объемов добычи топливно-энергетических полезных ископаемых, колоссальное накопление отходов производства и быта, крупные экологические катастрофы конца XX ст. привели к угрожающему загрязнению окружающей среды радионуклидами и химическими токсическими веществами. Их влияние вызывает необратимые геномные изменения растений и животных, глубокие генетические и соматические нарушения у человека [6].

Особенно тревожны факты локального повышения уровня действующих радиационных доз и глобальное повышение фона ионизирующих излучений, связанные с последствиями крупнейшей катастрофы в истории атомной энергетики — аварией на Чернобыльской АЭС. В результате радионуклидному загрязнению подверглось более 100 тыс. км<sup>2</sup> территории СНГ, где проживает около 4 млн человек, более 250 тыс. га земель выведены из хозяйственного оборота [3, 8]. Под действием радиоактивного загрязнения учащаются генетические нарушения организмов, изменяется направленность естественного отбора [4, 7], угнетается функциональная активность иммунной системы [1], повышается уровень врожденных аномалий, онкологической и общей заболеваемости населения [10, 14], снижается его жизненный потенциал [9, 11, 16]. Среди проблем, возникших перед многими странами мира после Чернобыльской катастрофы, особенно важными являются изучение отдаленных последствий длительного воздействия повышенного уровня радиации в загрязненных радионуклидами районах [13, 18, 20], а также анализ влияния мутационных изменений на стабильность и качество генофонда будущих поколений [5, 19]. Согласно результатам исследова-

ний, проведенных в отдаленные сроки после аварии на ЧАЭС [4, 12, 17], хроническое действие ионизирующего излучения даже малой мощности вызывает разнообразные генетические нарушения. Поскольку в недалеком будущем основными дозообразующими элементами на загрязненных территориях будут долгоживущие трансурановые изотопы — америций и плутоний — то, по подсчетам разных специалистов, живые организмы будут испытывать такое облучение на протяжении от 400 до нескольких тысяч лет [2, 15].

Цель данного исследования состояла в изучении на примере озимой пшеницы мутагенной активности радионуклидных загрязнений зоны отчуждения Чернобыльской АЭС в отдаленные сроки после аварии.

### Методика

Мутагенную активность радионуклидных загрязнений зоны отчуждения ЧАЭС изучали на озимой пшенице (*T. aestivum* L.) сортов Киянка, Альбатрос одесский, Донецкая 48, Одесская 161. Исследования проводились через 7, 13 и 20 лет после аварии в районах г. Припять (в 2 км от ЧАЭС), с. Чистоголовка (6 км от ЧАЭС), с. Копачи (4 км от ЧАЭС) Чернобыльского р-на Киевской обл., а также на территориях пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) «Подлесный» и «Буряковка». Радиационный фон в зависимости от загрязненности радионуклидами превышал контрольный уровень (пгт Глеваха Васильковского р-на Киевской обл.) в 27—852 раза.

Растения озимой пшеницы на протяжении всего вегетационного периода хронически облучались радиоактивными загрязнениями. Отсутствие  $\beta$ - и  $\gamma$ -активности выращенного материала указывает на влияние только внешнего действия радиации и отсутствие инкорпорированных радиоактивных изотопов. Первое поколение растений ( $M_1$ ) выращивали сплошным посевом на загрязненных территориях. Растения поколений  $M_2$  и  $M_3$  произрастали в условиях естественного радиационного фона (пгт Глеваха Васильковского р-на Киевской обл.). Их выращивали четко по семьям, что давало возможность выявлять слабые мутации и проводить правильный учет видимых изменений. Разными случаями мутирования считали растения, которые фенотипически отличались от исходной формы в пределах одной семьи. Растения с измененными признаками выделяли посредством тщательного осмотра всех семей во время прохождения ими основных фаз роста и развития.

Частоту мутантных форм учитывали, начиная с поколения  $M_3$ , после проверки наследования измененных признаков, по отношению их числа к 100 растениям  $M_2$  или по количеству семей с мутантными растениями относительно изученных семей в  $M_2$ .

### Результаты и обсуждение

В результате изучения влияния радионуклидных загрязнений на мутационную изменчивость озимой пшеницы через 7 лет после аварии на ЧАЭС выявлено существенное повышение уровня мутационной изменчивости (табл. 1). Частота видимых мутаций растений в поколении  $M_3$ , выращенных вблизи с. Чистоголовка, у сорта Киянка составила 2,6, у сорта Альбатрос одесский — 4,1 %, что соответственно в 2,6 и 5,8 раза выше, чем в контроле. Еще более высокой — соответственно в 4,9 и 13

МУТАГЕННАЯ АКТИВНОСТЬ РАДИОНУКЛИДНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

ТАБЛИЦА 1. Влияние радионуклидных загрязнений на частоту мутаций растений озимой пшеницы  $M_2$ — $M_3$  через 7 лет после аварии на ЧАЭС (1992 г.)

Сорт	Изучено семей, шт.	Мутантные семьи	
		шт.	%
пгт Глеваха			
Киянка	400	4	$1,0 \pm 0,5$
Альбатрос одесский	400	3	$0,7 \pm 0,4$
с. Чистоголовка			
Киянка	191	5	$2,6 \pm 1,2$
Альбатрос одесский	170	7	$4,1 \pm 1,5^*$
г. Припять			
Киянка	185	9	$4,9 \pm 1,6^*$
Альбатрос одесский	185	18	$9,7 \pm 2,2^*$

\*Здесь и в табл. 2, 3 разница по сравнению с контролем статистически достоверна при  $P_{0,05}$ .

раз по сравнению со спонтанным уровнем оказалась частота мутаций у растений, выращенных в окрестностях г. Припять, где уровень радиоактивности в 667 раз превышал естественный фон и в 16 раз — уровень радиоактивности в с. Чистоголовка.

В результате изучения видимых мутаций образцов озимой пшеницы сортов Одесская 161 и Донецкая 48, растения  $M_1$  которых были выращены в зоне отчуждения через 13 лет после аварии на Чернобыльской АЭС, также выявлено существенное повышение уровня мутационной изменчивости (табл. 2). Количество мутантных растений превышало спонтанный уровень в 15 (Одесская 161, с. Чистоголовка), 12,5 (Донецкая 48, с. Чистоголовка) и в 16,7 раза (Донецкая 48, с. Копачи).

Повышение уровня мутационной изменчивости растений, вызванное хроническим действием радиоактивного загрязнения, зафиксирова-

ТАБЛИЦА 2. Влияние радионуклидных загрязнений на частоту мутаций растений озимой пшеницы  $M_2$ — $M_3$  через 13 лет после аварии на ЧАЭС (1998 г.)

Сорт	Изучено растений, шт.	Мутантные растения	
		шт.	%
пгт Глеваха			
Донецкая 48 (контроль)	7540	17	$0,23 \pm 0,06$
Одесская 161 (контроль)	6730	18	$0,27 \pm 0,06$
с. Чистоголовка			
Донецкая 48	2400	69	$2,88 \pm 0,34^*$
Одесская 161	2400	97	$4,04 \pm 0,40^*$
с. Копачи			
Донецкая 48	600	23	$3,83 \pm 0,78^*$

ТАБЛИЦА 3. Влияние радионуклидных загрязнений на частоту мутаций растений озимой пшеницы  $M_2$ — $M_3$  через 20 лет после аварии на ЧАЭС (2006 г.)

Сорт	Изучено семей, шт.	Мутантные семьи	
		шт.	%
пгт Глеваха			
Альбатрос одесский	500	2	$0,40 \pm 0,28$
Донецкая 48	500	3	$0,60 \pm 0,35$
ПЗРО «Буряковка»			
Альбатрос одесский	185	7	$3,78 \pm 1,40^{**}$
Донецкая 48	280	15	$5,35 \pm 1,35^*$
ПЗРО «Подлесный», участок № 1			
Альбатрос одесский	199	19	$9,55 \pm 2,08^*$
Донецкая 48	214	12	$5,61 \pm 1,57^*$
ПЗРО «Подлесный», участок № 2			
Альбатрос одесский	184	20	$10,87 \pm 2,29^*$
Донецкая 48	180	10	$5,56 \pm 1,71^*$

\*\*Разница по сравнению с вариантами «Подлесный» № 1 и «Подлесный» № 2 статистически достоверна при  $p_{0,05}$ .

но и через 20 лет после аварии (табл. 3). У растений озимой пшеницы сорта Альбатрос одесский, выращенных на территории ближней зоны ЧАЭС с разным уровнем радиоактивного загрязнения, наблюдали повышение частоты видимых мутаций во всех вариантах опыта. Количество выявленных мутационных изменений превышало контрольный уровень в 9,5—27,2 раза. Частота мутаций растений, подвергшихся хроническому облучению на территории ПЗРО «Подлесный», была существенно выше, чем частота мутирования растений на территории ПЗРО «Буряковка», где уровень радиационного фона в 5—10 раз ниже. Это дает основание сделать вывод о зависимости частоты возникновения видимых мутаций растений данного сорта от дозы облучения.

Повышение мутационной изменчивости по сравнению со спонтанным уровнем выявлено и у сорта Донецкая 48: частота мутационных изменений колебалась в пределах 5,35—5,61 %, тогда как спонтанный уровень был равен 0,60 %. Однако у растений пшеницы сорта Донецкая 48 четкой зависимости между частотой видимых мутаций и уровнем радионуклидного загрязнения исследованных территорий не наблюдалось.

Одна из проблем биологических последствий хронического действия ионизирующей радиации состоит в том, что их невозможно предвидеть. Примером могут служить и результаты наших исследований, когда два сорта одной культуры при одинаковых условиях дозовой нагрузки по-разному реагировали на хроническое облучение. Так, у сорта Альбатрос одесский наблюдалась зависимость между уровнем радионуклидного загрязнения и частотой видимых мутаций, а у сорта Донецкая 48 частоты мутационных изменений, несмотря на разницу радиационного фона, были приблизительно одинаковыми.

МУТАГЕННАЯ АКТИВНОСТЬ РАДИОНУКЛИДНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Хроническое облучение от радионуклидных загрязнений зоны отчуждения через 7, 13 и 20 лет после Чернобыльской катастрофы индуцирует у растений озимой пшеницы достаточно широкий спектр видимых мутаций. Большинство из них независимо от времени, прошедшего после аварии, составляли мутационные изменения, связанные с высотой растений, строением колоса, его остистостью, длительностью вегетационного периода. Некоторые мутации были весьма оригинальными: скверхедный колос с закрученной осью, неполный выход колоса в трубку, широкий лист — у сорта Донецкая 48, эректоидный лист, карлики — у сорта Одесская 161, красные ости колоса — у сорта Альбатрос одесский. Перечень типов мутаций и частота их встречаемости в  $M_2$ — $M_3$  растений озимой пшеницы приведены ниже:

Тип мутаций	Частота мутаций, %	Тип мутаций	Частота мутаций, %
1) высокорослые	0,0—1,9	16) ригидный колос	0,0—0,5
2) низкорослые	0,0—0,7	17) сизый колос	0,0—0,5
3) карлики	0,0—2,7	18) красные ости колоса	0,0—0,5
4) остистый колос	0,2—4,7	19) неполный выход колоса в трубку	0,0—0,2
5) полуостистый колос	0,0—0,5	20) интенсивный восковой налет	0,0—2,8
6) безостый колос	0,2—3,3	21) раннеспелость	0,0—1,1
7) скверхедный колос	0,0—5,0	22) среднеспелость	0,0—1,0
8) спельтоидный колос	0,0—1,1	23) позднеспелость	0,0—3,8
9) длинный колос	0,0—0,2	24) интенсивный рост	0,0—0,2
10) короткий колос	0,0—0,8	25) интенсивная кустистость	0,0—0,1
11) крупный колос	0,0—0,2	26) широкий лист	0,0—0,1
12) плотный колос	0,1—0,3	27) эректоидный лист	0,0—0,1
13) рыхлый колос	0,0—0,5	28) раннее пожелтение флагового листа	0,0—0,5
14) цилиндрический колос	0,0—0,3	29) темно-зеленая окраска стебля	0,0—1,1
15) эректоидный колос	0,0—0,5	30) устойчивость к мучнистой росе	0,0—0,6

Для спектра мутаций было характерным появление со сравнительно высокой частотой (до 2,70 %) мутаций по генам карликовости (карликовых и низкорослых форм), что крайне редко встречается при спонтанной изменчивости и с низкой частотой — при экспериментальном мутагенезе (рисунок). Поскольку аналогичные формы с частотой 0,2—1,3 % были выявлены и в материале, собранном в год аварии на Чернобыльской АЭС в пяти областях Украины [11], становится очевидным, что появление мутаций пшеницы, связанных со снижением высоты растений, является характерным следствием влияния хронического облучения на загрязненных территориях.

Таким образом, несмотря на то что в отдаленные сроки после аварии на Чернобыльской АЭС в зоне отчуждения внешний радиационный фон постепенно снижается, частота видимых мутаций растений озимой пшеницы продолжает существенно превышать спонтанный уровень на-



Мутантные растения пшеницы сорта Альбатрос одесский, индуцированные радионуклидными загрязнениями в зоне отчуждения ЧАЭС:

1 — исходный сорт; 2 — высокорослый мутант; 3, 4 — карлики

следственной изменчивости. Высокая мутагенная активность радионуклидных загрязнений выявляется даже через 20 лет после аварии и тенденция к снижению уровня мутационной изменчивости не наблюдается. Частота видимых мутаций растений озимой пшеницы через 7, 13 и 20 лет после аварии остается практически на одном уровне.

Хроническое действие радиационного облучения в зоне отчуждения ЧАЭС вызывает широкий спектр видимых мутаций. Повышенный уровень мутационной изменчивости в зоне ЧАЭС свидетельствует о генетической угрозе всему живому на значительных территориях. Поэтому необходимым является дальнейшее тестирование на всех уровнях организации биоты генетических последствий загрязнения окружающей среды радионуклидами с учетом влияния на последующие поколения.

1. *Аклеев А.В.* Реакции тканей на хроническое воздействие ионизирующего излучения // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2009. — **49**, № 1. — С. 5—20.
2. *Бондаренко О.А., Мельничук Д.В., Цыганков Н.Я.* Прогноз формирования доз от трансурановых элементов для населения Украины // П'ятнадцять років Чорнобильської катастрофи. Досвід подолання (18—20 квітня 2001 р., Київ): Зб. тез. — Ч. 2. — К., 2001. — С. 25.
3. *Булдаков Л.А., Гуськова А.К.* 15 лет после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2002. — **42**, № 2. — С. 228—233.
4. *Гераський С.А., Ванина Ю.С., Дикарев В.Г. и др.* Генетическая изменчивость в популяциях сосны обыкновенной из районов Брянской области, подвергшихся радиоактивному загрязнению в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Там же. — 2009. — **49**, № 2. — С. 136—146.
5. *Гродзінський Д.М., Гудков І.М.* Радіобіологічні ефекти у рослин на забрудненій радіонуклідами території // Чорнобиль. Зона відчуження. — К.: Наук. думка, 2001. — С. 325—377.
6. *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.

7. Зайнулин В.Г., Юшкова Е.А. Динамика изменчивости генотипа экспериментальных популяций *Drosophila melanogaster* при хроническом воздействии ионизирующей радиации // Там же. — № 1. — С. 67—71.
8. Йощенко В.И., Бондарь Ю.О. Дозовая зависимость частоты морфологических изменений у сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Чернобыльской зоне отчуждения // Там же. — С. 117—126.
9. Кудяшева А.Г., Шишкина Л.Н., Загорская Н.Г. Экологические и биохимические последствия радиоактивного загрязнения в зоне аварии на ЧАЭС в популяциях мышевидных грызунов // V съезд по радиационным исследованиям (радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность) (10—14 апр. 2006, Москва): Тез. докл. — Т. 2. — М., 2006. — С. 115.
10. Минина В.И., Дружинин В.Г., Глушков А.Н. и др. Количественные характеристики частоты хромосомных aberrаций у жителей районов с различным уровнем онкологических заболеваний // Генетика. — 2009. — 45, № 2. — С. 239—246.
11. Моргун В.В., Логвиненко В.Ф. Мутационная селекция пшеницы. — Киев: Наук. думка, 1995. — 624 с.
12. Офицеров М.В., Игонина Е.В. Генетические последствия радиационного воздействия на популяцию сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) // Генетика. — 2009. — 45, № 2. — С. 209—214.
13. Пелевина И.И., Готлиб В.Я., Конрадов А.А. 20 лет изучения последствий Чернобыльской аварии — это много или мало для оценки их характера и масштабов? // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2006. — 46, № 2. — С. 240—247.
14. Сычева Л.П., Рахманин Ю.А., Ревазова Ю.А., Журков В.С. Роль генетических исследований при оценке влияния факторов окружающей среды на здоровье человека // Гигиена и санитария. — 2005. — № 6. — С. 59—62.
15. Терещенко Н.Н. Аккумуляция изотопов плутония гидробионтами Черного моря // V съезд по радиационным исследованиям (радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность) (10—14 апр. 2006 г., Москва): Тез. докл. — Т. 2. — М., 2006. — С. 148.
16. Шишкина Л.Н., Кудяшева А.Г., Загорская Н.Г., Таскаев А.И. Регуляция окислительных процессов в тканях мышевидных грызунов, отловленных в зоне аварии на ЧАЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2006. — 46, № 4. — С. 216—232.
17. Якимчук Р.А., Моргун В.В., Логвиненко В.Ф. Генетические последствия радионуклидного загрязнения зоны отчуждения через 13 лет после аварии на Чернобыльской АЭС // Физиология и биохимия культ. растений. — 2001. — 33, № 3. — С. 226—231.
18. Geraskin S.A., Dikarev V.G., Evseeva T.I. et al. Effects of radiation exposure on plants and radiation protection of the environment // The 35<sup>th</sup> Annual Meeting of the European Radiation Research Society and the 4<sup>th</sup> Annual Meeting of the Ukrainian Society of Radiation Biology (22—25 Aug. 2006, Kyiv): Programme & Abstracts. — Kyiv, 2006. — P. 176.
19. Glazko V.L., Glazko T.T. Decline of reproduction as universal population answer to the increase of ionizing irradiation level // Ibid. — P. 174.
20. Wright E.G. Radiation-induced genomic instability: manifestations and mechanisms // Ibid. — P. 22.

Получено 22.02.2011

МУТАГЕННА АКТИВНІСТЬ РАДІОНУКЛІДНИХ ЗАБРУДНЕНЬ У ЗОНІ АВАРІЇ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС

В.В. Моргун, Р.А. Якимчук

Інститут фізіології рослин і генетики Національної академії наук України, Київ

Вивчали генетичні наслідки хронічного опромінення рослин озимої пшениці в зоні відчуження Чорнобильської АЕС. Встановлено, що навіть через 20 років після аварії на ЧАЕС тенденція до зниження рівня мутаційної мінливості не спостерігається. Частота видимих мутацій через 7, 13 і 20 років після аварії істотно перевищувала спонтанний рівень і включала широкий спектр їх типів. Підвищений рівень мутаційної мінливості в зоні ЧАЕС свідчить про генетичну загрозу всьому живому на значних територіях і потребує подальшого тестування генетичних наслідків забруднення довкілля радіонуклідами.

MUTAGENIC ACTIVITY OF RADIONUCLIDE CONTAMINATION IN THE ZONE OF THE CHERNOBYL ACCIDENT

*V.V. Morgun, R.A. Yakimchuk*

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

The genetic effects of chronic exposure of winter wheat plants in the exclusion zone of Chernobyl were studied. It was found that even 20 years after the Chernobyl accident trends to reduction of the level of mutational variability not observed. The frequency of visible mutations after 7, 13 and 20 years after the accident was much higher than the spontaneous level and included a wide range of types. Elevated levels of mutational variability in the Chernobyl zone indicate the genetic risk of all alive on large areas and require further testing of genetic effects of environmental pollution by radionuclides at all levels of biota with regard to effect on future generations.

*Key words:* winter wheat, genetic effects, visible mutations, mutational variability, mutagenic activity.