

РАДИОБИОЛОГИЯ РАСТЕНИЙ

УДК 576.356.2:57.084.1

ТЕСТИРУЕМЫЕ С *ALLIUM SERA* КЛАСТОГЕННЫЕ
ЭФФЕКТЫ ОБЛУЧЕНИЯ
ОТ ПОЧВЫ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ В СРАВНЕНИИ
С ФОРМОЙ ГЕНОТОКСИЧНОСТИ МОДЕЛЬНОГО ОКИСЛИТЕЛЯ

© 2025 г. В. В. Столбова*, Г. И. Агапкина, С. В. Мамихин,
Д. В. Манахов, А. И. Щеглов

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, факультет почвоведения,
кафедра радиоэкологии и экотоксикологии, г. Москва, Россия

*E-mail: vstol@bk.ru

Поступила в редакцию 07.07.2025 г.

После доработки 05.11.2025 г.

Принята к публикации 12.11.2025 г.

В условиях лабораторного биотеста проведена оценка вклада кластогенного эффекта в нарушение митоза в клетках апикальной меристемы корней *Allium sera* при действии ионизирующего излучения от почвенного образца из 30-км зоны Чернобыльской атомной электростанции в сравнении с формой генотоксичности окислителя — пероксида водорода. Протестируирован ряд концентраций окислителя (0.03–150 ммоль/л) и уровней радиации при мощности эквивалентной дозы γ -излучения в диапазоне 0.3–1.53 мкГр/час. Разложение индекса общей частоты патологий митоза на спектр, с выделением доли кластогенного эффекта, позволило выявить различия в формах генотоксичности действующих факторов. Большой вклад кластогенной компоненты (60–76%) в спектре нарушений митоза установлен при воздействии ионизирующих излучений по сравнению с эффектами окислителя (36–51%). Цитогенетические признаки кластогенного эффекта проанализированы согласно существующим представлениям о молекулярных механизмах образования аберраций хромосом. Тестовый показатель “доля кластогенного эффекта”, измеряемый при простом методе цитогенетического анализа с недифференцированным окрашиванием хромосом, рекомендован как чувствительный информативный индикатор для характеристики профиля стресс-реакции в условиях загрязнения среди генетически активными факторами различной природы.

Ключевые слова: растительные тест-системы, биодиагностика, генетически активные загрязнители, *Allium*-тест, цитогенетические показатели, окислительный стресс, ионизирующее излучение, митотический индекс

DOI: 10.7868/S3034590125060074

В практике радиоэкологии и экотоксикологии широко используются растительные тест-системы и фитоиндикаторы для решения различных природоохранных и научных задач [1–2]. При этом традиционные цитогенетические индексы являются информативными показателями в условиях загрязнения среды генетически активными факторами радиационной и химической природы и используются при биомониторинге состояния популяций на импактных и фоновых территориях, для анализа микроэволюционных процессов в облученных фитоценозах [3–5]. В лабораторных условиях они позволяют изучать радиобиологические закономерности проявления острых и хронических эффектов облучения, применяются как тестовые показа-

тели уровня загрязнения среды [6–8]. Анализ величины митотического индекса, частоты патологий деления и аберраций хромосом различного типа дают возможность охарактеризовать форму проявления и меру токсичности, сделать предположение о пусковых событиях и молекулярных механизмах конечного эффекта и вовлеченности в его реализацию различных, зачастую разнородных процессов. Некоторые мутагены способны оказывать кластогенное воздействие на хромосомы. Первичными событиями радиационно-индуцированных повреждений хромосом являются двунитевые разрывы или суперпозиция однонитевых разрывов, вероятность которой увеличивается для редкоионизирующего типа при возрастании мощности дозы.

Мутагены же химической природы проявляют свой кластогенный потенциал в более сложной цепи событий, и для них более характерно воздействие на митотический аппарат и изменение поверхности хромосом [9, 10]. Цитогенетические признаки кластогенного воздействия на хромосомы достаточно отчетливо и однозначно выявляются в простых процедурах цитогенетического анализа, позволяющих фиксировать нарушения генетического материала и аппарата деления. Это значительно упрощает учет результатов и сокращает трудоемкость и время процедуры при проведении серийных испытаний. При этом анализ полученных наборов данных может рассматриваться как индикатор механизма генотоксического действия и отражать природу мутагена-загрязнителя [11].

Биоиндикационный потенциал тестовой системы с луком репчатым *Allium cepa* L. подтверждается многими исследователями, оценивающими эффекты химических и физических мутагенных факторов, а также их сочетанного воздействия [12, 13]. Для факторов радиационной природы и химических мутагенов тест выявляет кластогенное влияние на хромосомы [14]. Например, в работе [15] с семенами лука *A. cepa* тестировали почвы 30-км зоны Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) с высоким уровнем загрязнения радиоцезием (до 15–40 Ки/км²) и использовали классификацию типов aberrаций с учетом кластогенности и опасности для дальнейшей судьбы aberrантной клетки. Наибольшую долю в общей частоте aberrаций составляли проявления кластогенного эффекта — мосты (от 40 до 65%) и фрагменты (35–40%) в ана- и телофазе клеток. Авторы при этом отмечали наибольший вред таких цитогенетических признаков, как проявление к-митоза и слипание хромосом.

Цель работы связана с проблемами биодиагностики генетически активных загрязнителей окружающей среды и заключалась в оценке в условиях *Allium*-теста чувствительности цитогенетических показателей, отражающих проявления кластогенного эффекта, к различным по форме генотоксическому действию мутагенам физической и химической природы. В задачи входило: 1) простым методом цитогенетического анализа с недифференцированным окрашиванием хромосом оценить долю кластогенного эффекта в спектре патологий деления и aberrаций хромосом при воздействии ионизирующего излучения от почвенного образца зоны чернобыльского загрязнения в сравнении с модельным окисли-

телем — пероксидом водорода; 2) проанализировать возможности использования для целей биодиагностики индекса “доля кластогенного эффекта” при различной природе мутагенного фактора и видов излучения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Источником ионизирующего излучения служил образец почвы территории зоны аварии на ЧАЭС с плотностью загрязнения по ¹³⁷Cs 1–5 Ки/км². В деревянных штативах на различном расстоянии от источника размещались стеклянные пробирки с луковицами диаметром около 1.5 см без покровных чешуй, донце и корни которых все время экспозиции находились в водной среде. Было использовано по три луковицы на каждый вариант опыта.

Тестирование велось при мощности эквивалентной дозы γ -излучения в диапазоне 0.3–1.53 мкГр/час. Измерения мощности дозы проводили в пяти повторностях для одного расстояния от источника с помощью дозиметра-радиометра МКС-АТ 6130С. Вся экспериментальная площадка находилась за свинцовой защитой. Протестированы концентрации раствора пероксида водорода в диапазоне 0.03–150 ммоль/л. Концентрации оценивались на начало эксперимента. Цитогенетические эффекты при 120-часовой экспозиции *Allium*-теста к воздействию факторов фиксировали при недифференцированном окрашивании биоматериала 2% ацетоарсенином. Микроскопирование препаратов проводили в проходящем свете с синим светофильтром с использованием микроскопа Микмед-6 с три-нокулярной насадкой (ОАО “ЛОМО”, Россия). Оценку мито- и генотоксичности проводили по изменению величины митотического индекса (MI) и частоте патологий митоза (ЧПМ). Для выявления особенностей генотоксического воздействия факторов проводили разложение показателя ЧПМ на группы по морфологическому спектру (конфигурации хромосом в картинах аномального митоза) и согласно современным представлениям о молекулярных механизмах генотоксичности, индуцирующих дезорганизацию и aberrации хромосом в митозе. При оценке доли кластогенного воздействия в спектре хромосомных нарушений использовали виды aberrаций, доступные к учету при простом методе цитогенетического анализа без остановки на стадии метафазы. Доверительные интервалы долей для оценки достоверности величин MI и ЧПМ оценивали после углового ϕ -преобразования. Достоверность различий MI и ЧПМ с фоновыми

значениями оценивали после углового ф-образования на основании F-статистики. Сравнение вида распределений морфологического спектра патологий митоза проводили по критерию χ^2 . Для показателя “доля кластогенного эффекта” рассчитывали биномиальные интервальные оценки методом Клоппера-Пирсона и использовали точный критерий Фишера для обнаружения достоверных отличий по вариантам тестов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Действующими по митотоксичности являлись все протестированные концентрации окислителя (0.03–150 ммоль/л): фиксировалось статистически достоверное снижение до 2.0–6.3% величины МИ относительно фонового уровня в 7.6%. Некоторое замедление деления в клетках *A. cepa* до значений индекса 6.2–7.3% отмечалось также в условиях облучения ионизирующей радиацией (при мощности эквивалентной дозы γ -излучения в диапазоне 0.3–1.53 мкГр/час). Величина ЧПМ относительно фона в 3.9% нелинейно возрастала при всех уровнях воздействия радиации до 7.4–13.8%. Для окислителя по данному пока-

зателю как пороговая доза зафиксирована 3 мильмолярная концентрация пероксида водорода, а диапазон действующих концентраций составил 3.0–150 ммоль/л. При этих концентрациях ЧПМ возрастала более, чем в 5–6 раз (табл. 1).

Одним из способов анализа генотоксичности изучаемых в данной работе факторов, выявленной по возрастанию частоты патологий митоза, было изучение распределения патологий по морфологии (конфигурации) окрашенных хромосом в картинах аномального митоза. Использовались классификации, традиционные при работе с растительными биотестерами, в частности — с луком репчатым *A. cepa*. Для выполнения условий применения критерия χ^2 -квадрат при статистической оценке достоверности различий в распределении выделенные формы дезорганизации и аберраций хромосом были перегруппированы с объединением в группы с абсолютной частотой наблюдений не менее 5 для 80% ячеек в контрольных тестах. Эти тесты рассматривались нами как показатели “ожидаемой частоты”: 1) микроядра/фрагменты/пробелы; 2) мосты; 3) ацентрическая/мультиполярная анафаза/отставание/убегание хромосом; 4) к-ми-

Таблица 1. Оценка (при 95%-ной доверительной вероятности) в условиях Allium-теста величины митотического индекса и частоты патологий митоза при различных уровнях 120-часового воздействия ионизирующего излучения от образца почв чернобыльской зоны и модельного окислителя пероксида водорода

Tab. 1. Evaluation (95%- confidence level) of the mitotic index and the frequency of mitosis pathologies under Allium-test conditions at various levels of 120-hour exposure to ionizing radiation from a soil sample (Chernobyl zone) and hydrogen peroxide as an oxidizing agent

Фактор	Уровень воздействия	Объем выборки	Число делящихся	Число с патологиями	Митотический индекс		Патологии митоза	
					%	Интервал	%	Интервал
Контроль		21533	1637	64	7.6	7.3–8.0	3.9	3.0–4.9
Ионизирующее излучение (мощность эквивалентной дозы γ -излучения, мкГр/ч)	0.30	11062	710	98	6.4*	6.0–6.9	13.8*	11.4–16.4
	0.45	12385	902	67	7.3	6.8–7.7	7.4*	5.8–9.2
	0.92	9962	613	54	6.2*	5.7–6.6	8.8*	5.3–13.1
	1.53	11195	753	62	6.7*	6.3–7.2	8.2*	6.4–10.3
Модельный окислитель (пероксид водорода, ммоль/л)	0.03	13559	852	42	6.3*	5.9–6.7	4.9	3.6–6.5
	0.3	10213	320	11	3.1*	2.8–3.5	3.4	1.7–5.7
	3.0	12006	501	108	4.2*	3.8–4.5	21.6*	18.7–24.5
	30	7686	256	32	3.3*	2.9–3.7	12.5*	8.7–16.8
	150	3120	63	16	2.0*	1.6–2.5	25.4*	15.5–36.8

* достоверное отличие от фонового уровня по $F < F_{0.05} = 3.8$

тоз/полая метафаза/рассеивание хромосом; 5) слипание хромосом. Результаты представлены на рис. 1.

При всех уровнях воздействия факторов получены достоверные различия в распределении аномалий, выделенных по конфигурации хромосом, с контрольным фоновым распределением патологий митоза в клетках корневой меристемы биотестера. Рассчитанные величины χ^2 превышают критическое значение 9.49 для степени свободы 4.

Другой способ перегруппировки частот аномалий митоза заключался в выделении двух типов aberrантных клеток. Первый тип отражал

эффекты кластогенного воздействия на хромосомы и объединял хромосомные aberrации в виде микроядер (фрагментов внекядерного хроматина, образовавшихся в результате разрывов хромосом и фиксируемых в интерфазе митоза), наблюдавшихся в анафазе митоза мостов различной конфигурации, двойных и одиночных фрагментов и пробелов хромосом. Второй тип картин митоза связан с дезорганизацией хромосом во время деления и отражал анеугенные эффекты повреждения веретена деления и/или изменения свойств поверхности хромосом: слипание и рассеивание, отставание и убегание хромосом; к-митоз; полые, ацентричные и многополярные метафазы. Перегруппированные данные представлены в виде диаграммы на рис. 2.

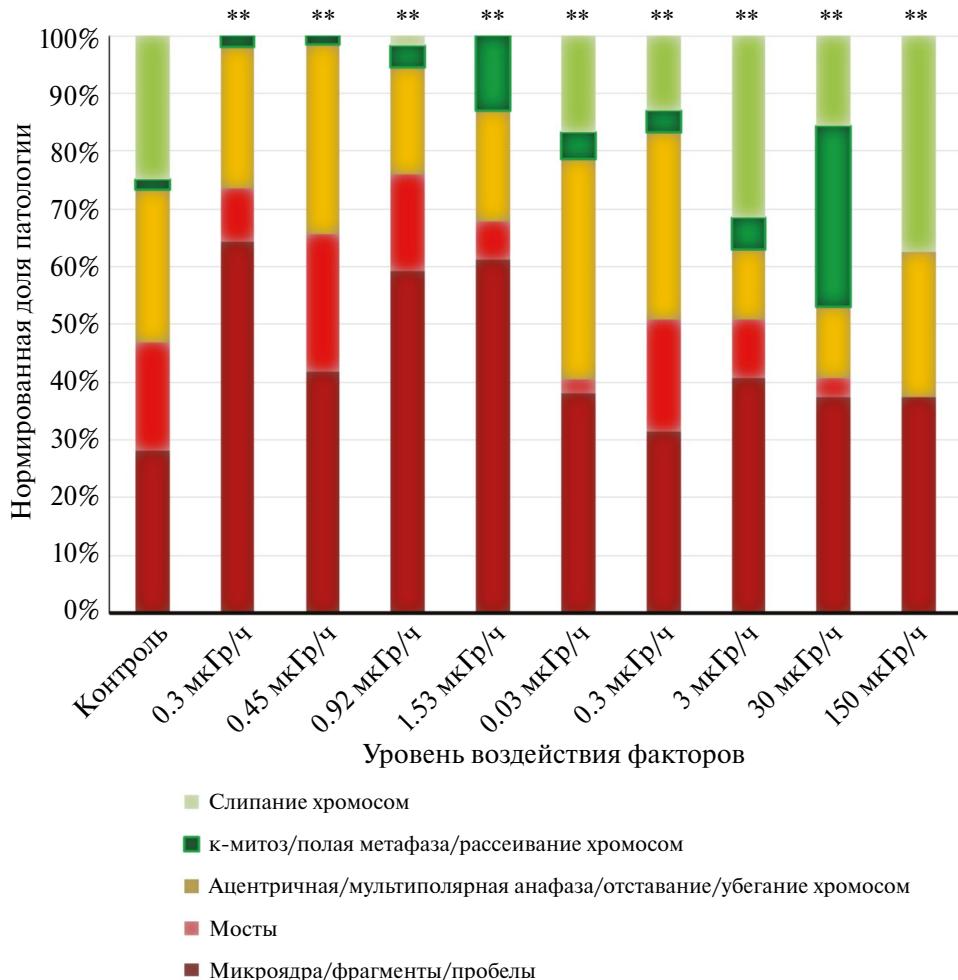


Рис. 1. Распределение тестируемых с *Allium cepa* видов патологии митоза, обозначенных согласно традиционным классификациям по конфигурации окрашенных хромосом, при воздействии ионизирующего излучения от образца почв чернобыльской зоны и модельного окислителя пероксида водорода.

**достоверное отличие от контроля по критерию χ^2 с $p < 0.05$.

Fig. 1. Distribution of mitosis pathology types tested with *Allium cepa*, designated according to traditional classifications based on the configuration of stained chromosomes, when exposed to ionizing radiation from a soil sample from the Chernobyl zone and hydrogen peroxide as an oxidizing agent.

**significant difference from control according to χ^2 with $p < 0.05$.

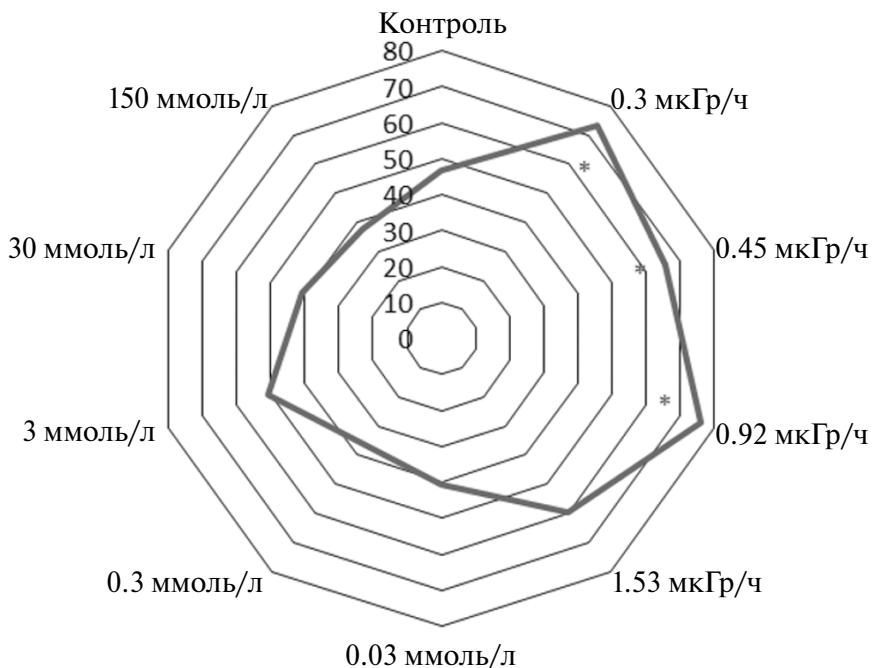


Рис. 2. Оценка в условиях Allium-теста относительной доли клеток, отражающих кластогенное воздействие на хромосомы, при различных уровнях 120-часового воздействия ионизирующим излучения от образца почв чернобыльской зоны и модельного окислителя пероксида водорода (% от общего количества aberrантных клеток).

*достоверное отличие от контроля по точному тесту Фишера с $p < 0.05$.

Fig. 2. Assessment of the relative proportion of cells reflecting clastogenic effects on chromosomes under Allium test conditions at various levels of 120-hour exposure to ionizing radiation of a soil sample from the Chernobyl zone and hydrogen peroxide as an oxidizing agent (% of total aberrant cells number).

*significant difference from control according to Fisher's exact test with $p < 0.05$.

Достоверное возрастание относительного фонового уровня доли кластогенного эффекта по точному тесту Фишера выявлено только для серии тестов с воздействием γ -излучения при уровнях 0.30–0.92 мкГр/ч.

ОБСУЖДЕНИЕ

В лабораторных условиях проведено сравнение показателей цитогенетических нарушений, отражающих особенности мито- и генотоксического действия, для ионизирующего излучения от почв, загрязненных радионуклидами чернобыльского выброса и химического окислителя пероксида водорода. Большую чувствительность в условиях Allium-теста МИ и ЧПМ проявляли к действию ряда концентраций (0.03–150 ммоль/л) окислителя. Выраженная митотоксичность отражалась снижением митотического индекса до 2.0–4.2% против фонового значения в 7.6%. Генотоксичность модельного окислителя измерялась достоверным возрастанием индекса ЧПМ до 21.6% с фонового уровня в 3.9%. Значительно меньшую чувствительность показатели проявили в условиях облучения

делящихся клеток ионизирующей радиацией от почв чернобыльской зоны при мощности эквивалентной дозы γ -излучения в диапазоне 0.3–1.53 мкГр/час. МИ снижался незначительно до значений 6.2–7.3%, а ЧПМ варьировала в диапазоне 7.4–13.8%. Возможно, в этих условиях меньшая чувствительность митотического индекса и общей частоты aberrаций обусловлена низкими уровнями мощности дозы и формой биотестера. По данным работы [16], при изучении цитогенетических эффектов γ -излучения сделан вывод о большей чувствительности проростков семян по сравнению с корнями луковиц *A. cepa*. В настоящей работе при цитогенетическом анализе использовали апикальную меристему корней луковиц. При этом в исследованном нами диапазоне уровня излучения изменение цитогенетических показателей не было связано линейной дозовой зависимостью с фактором воздействия. В литературе вид дозовой зависимости по цитогенетическим показателям характеризуется нелинейностью или линейным трендом (регрессией) в зависимости от того, какой тип показателя использован авторами. Так, при использовании микроядерного теста в рабо-

те [17] не была выявлена линейная зависимость показателя от дозы радиационного воздействия. Напротив, эффекты γ -излучения по показателю общей частоты aberrаций хромосом при ана-телефазном методе Allium-теста характеризовались линейной дозовой зависимостью в диапазоне до 6 Гр. Также при использовании в качестве цитогенетического показателя частоты aberrаций хромосом дублирующего типа (двойные мосты, двойные фрагменты), эффект характеризовался линейной зависимостью от дозы γ -излучения, начиная с 10 сГр. В работе [18] с корневой меристемой проростков семян *A. serra* возрастание общей частоты aberrаций хромосом и показателя микроядерного теста в диапазоне доз 0,02–13 Гр носило нелинейный характер, после линейного участка при воздействии γ -излучения в области малых доз следовало дозонезависимое плато. Авторы данной работы показали, что в области малых доз большую чувствительность имеет показатель общей частоты aberrаций хромосом по сравнению с микроядерным тестом. В последнем случае отличия результатов воздействия излучения от контроля не были статистически значимы в области малых доз. Для показателя общей частоты aberrаций участок плато (дозонезависимый) начинался с дозы 5 Гр, а для микроядерного показателя — с величины 2,6 Гр. В нашем исследовании интегральная оценка поглощенной дозы за 120 часов экспозиции была значительно меньше, но значительный объем выборки цитогенетических данных позволил статистически выявить достоверность отличий от фоновых значений величин индексов МИ и ЧПМ. Возможно, что отмеченный эффект связан с влиянием β -компоненты ионизирующего излучения от продуктов ядерного деления, загрязняющих почву чернобыльской зоны.

Последующий анализ цитогенетических данных был основан на представлениях о молекулярных механизмах их образования и критических "мишениях" с точки зрения целостности структуры хромосом и митотического аппарата клетки при воздействии мутагенов химической и радиационной природы. Разрыв хромосомы (кластогенное воздействие) является характерным пусковым событием механизма прямого генотоксического воздействия ионизирующих излучений. При метафазном анализе разрывы на предсинтетической стадии клеточного цикла отражаются в виде характерного набора патологий — дицентриков и кольцевых хромосом. Аберрации этого типа являются маркерами радиационного воздействия и относятся по принятой классификации к хромосомному типу (двойные).

Они являются нестабильными и не передаются в ряду поколений делящихся клеток. Анафазная судьба этих маркеров представлена в "митотическом окне" более простого варианта цитогенетического анализа в виде мостов различной конфигурации, фрагментов/пробелов и интерфазных микроядер. Другой тип фиксируемых патологий митоза связывают с разрывами на постсинтетической стадии клеточного цикла. В данном случае хромосомные aberrации обозначают как aberrации хроматидного (одиночного) типа и классифицируют как стабильные, которые передаются в череде делений клетки [9–11].

Некластогенные (анеугенные) эффекты мутагенов фиксируются в митотическом окне цитогенетического анализа в виде многочисленных картин дезорганизации хромосом и хромосомных aberrаций, обусловленных повреждением аппарата/веретена деления или изменением свойств поверхности хромосом. Такой тип генотоксического воздействия более характерен для химических факторов, а также косвенного действия ионизирующей радиации через продукты радиолиза [9–11]. В этом случае при низкоуровневых радиационных воздействиях эффекты связывают именно с механизмом косвенного действия, нарушениями в функционировании антиоксидантных систем и изменением окислительного гомеостаза клетки [1, 19]. Кроме того, при воздействии малых доз ионизирующей радиации в качестве критической мишени радиационного воздействия рассматриваются не только ДНК, но и мембранные структуры в клетках [20], что может влиять на работу митотического аппарата.

Авторы исследования [19] отмечают, что в настоящее время находят экспериментальное подтверждение представления о том, что процессы изменения окислительного гомеостаза растительной клетки неспецифичны и индуцируются как низкоуровневым ионизирующим излучением с низкой величиной линейной передачи энергии (ЛПЭ), так и сопровождают облучение магнитными и электромагнитными полями, в том числе радиочастотного диапазона. В работе рассмотрены пусковые события в осуществлении защитной реакции растений на примере двухнедельных растений гороха *Pisum sativum* L. при сравнительном исследовании γ -излучения ^{60}Co и низкоинтенсивного переменного магнитного поля. Активные формы кислорода, способные к миграции через мембранны, запускают процессы перекисного окисления. На ранних этапах защиты от окислительного стресса велика роль фермента супероксиддисмутазы, генерирующей

пероксид водорода. Восстановление перекиси катализируется в зависимости от локализации процесса в организме растения либо каталазой, либо в аскорбат-глутатионовом цикле с участием низкомолекулярных антиоксидантов.

Цитогенетические показатели Allium-теста, отражающие проявление кластогенных эффектов, используются для анализа генотоксических эффектов с различными целями. Целью работы [21] было сравнение тестируемых с *A. cepa* цитогенетических эффектов ионизирующей радиации в виде потока α -частиц ^{239}Pu с действием излучений мобильного телефона формата GSM 900. Оба фактора вызывали как кластогенный, так и анеугенный эффекты, однако кластогенная по цитогенетическим признакам активность была выделена авторами как ведущая форма токсичности для α -потока, а анеугенная — для электромагнитного поля мобильного телефона. В исследовании [22] показаны перспективы использования теста с *A. cepa* для биодозиметрии ионизирующей радиации с различной величиной ЛПЭ. Авторы выполняли процедуру микроядерного теста и показателем кластогенного воздействия на хромосомы являлась частота внеядерного интерфазного хроматина. Сравнивались эффекты излучения с низкой и высокой ЛПЭ: γ -излучение (медицинский генератор) и α -излучение (точечный источник ^{241}Am). При дозах α -излучения до 80 мГр отмечали линейное возрастание частоты микроядер и снижение затем при 120 мГр. Для γ -излучения линейный дозозависимый участок фиксировался в диапазоне 0–600 мГр. Отмечено, что α -излучение вызывает значительные повреждения, частота микроядер в 20 раз больше по сравнению с уровнем этих аберраций при воздействии γ -излучения. Авторы делают заключение о различных весовых коэффициентах, отражающих биологические эффекты разных видов ионизирующих излучений и подчеркивают необходимость исследования чувствительности других цитогенетических показателей.

Таким образом, использование цитогенетических показателей, отражающих кластогенный эффект (мосты, фрагменты/пробелы, микроядра), позволяет отметить особенности генотоксического воздействия разных типов ионизирующих излучений с различной величиной ЛПЭ, при различных мощностях дозы, а также в условиях сочетанных воздействий с факторами химической природы и при облучении электромагнитными полями. Как можно заключить из литературных данных, результаты исследова-

ний свидетельствуют о различной чувствительности цитогенетических индексов и подчеркивают необходимость дальнейших исследований информативности различных тестовых показателей для оценки эффектов генотоксичности. Хотелось бы отметить также, что более тонкое разделение кластогенного эффекта на спектр, учитывающий аберрации хромосомного и хроматидного типа (одиночные и двойные картины аберраций), может послужить более точным инструментом для выявления пусковых событий и механизмов воздействия мутагенов различной природы и формы токсического действия, в том числе и электромагнитных излучений неионизирующей природы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение доли кластогенного эффекта в клетках биотестера лука репчатого *A. cepa* использовано для оценки чувствительности этого индекса для целей биодиагностики генетически активных загрязнителей среды различной природы. Такой аспект рассмотрения спектра патологий митоза и хромосомных аберраций, основанный на перегруппировке с выделением типов по механизму воздействия, позволил показать различия между эффектами модельного окислителя и ионизирующей радиации.

Из полученных в ходе эксперимента данных были сделаны следующие выводы:

- 1) Доля в спектре патологий митоза аберраций хромосом, отражающих по цитогенетическим признакам проявления кластогенного эффекта, выявляет значимые различия по форме генотоксического действия между низкоинтенсивным излучением от загрязненного техногенными радионуклидами почвенного образца чернобыльской зоны и модельным окислителем пероксидом водорода. Большой вклад кластогенной компоненты в спектр нарушений митоза выявлен при воздействии ионизирующего излучения с мощностью эквивалентной дозы гамма-излучения 0.3–1.53 мкГр/час по сравнению с эффектами окислителя при 0.03–150 ммоль/л концентрациях: доля кластогенного эффекта варьировала в диапазонах 60–76 и 36–51% соответственно.

- 2) Представления о критической “мишени” и молекулярных механизмах токсического воздействия мутагенов химической и радиационной природы на структуру хромосом и митотический аппарат позволяют обосновать использование

индекса “доля кластогенного эффекта” как критерий для характеристики формы генотоксичности при тестовых испытаниях.

3) Картинны митоза, отражающие в спектре нарушений проявление кластогенного эффекта, идентифицируются при простом окрашивании хромосом достаточно отчетливо и однозначно. Чувствительность к природе действующего генотоксичного фактора и простота измерения в процедуре биотеста данного цитогенетического показателя/индекса позволяет рассматривать его как индикатор приоритетного типа генетически активного загрязнения среды.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М. В. Ломоносова.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы статьи сообщают об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Esnault M.-A., Legue F., Chenal C. Ionizing radiation: Advances in plant response. *Environmental and Experimental Botany*. 2010; 68:231–237. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.01>
2. Geras'kin S.A., Evseeva T.I., Oudalova A.A. Plants as a tool for the environmental health assessment. *Encyclopedia of Environmental Health*. Burlington: Elsevier; 2011. (4):571–579.
3. Буторина А.К., Калаев В.Н. Анализ чувствительности различных критериев цитогенетического мониторинга. *Экология*. 2000; (3):206–210. [Butorina A.K., Kalaev V.N. Analiz chuvstvitel'nosti razlichnyh kriteriev citogeneticheskogo monitoring. *Ekologiya*. 2000; (3):206–210. (In Russ.)].
4. Гераськин С.А., Волкова П.Ю., Удалова А.А., Казакова Е.А., Васильев Д.В., Дикарева Н.С., Макаренко Е.С., Даурте Г.Т., Кузьменков А.Г. Эффекты хронического облучения в популяциях растений на примере референтного организма “сосна обыкновенная”. Обзор. *Радиация и риск*. 2018; 27(4):95–18. [Geras'kin S.A., Volkova P. Yu., Udalova A.A., Kazakova E.A., Vasil'ev D.V., Dikareva N.S., Makarenko E.S., Duarte G.T., Kuz'menkov A.G. Effekty hronicheskogo oblucheniya v populyaciyah rastenij na primere referentnogo organizma “sosna obyknovennaya”. Obzor. *Radiaciya i risk*. 2018; 27(4): 95–118. (In Russ.)].
5. Калаев В.Н., Карпова С.С. Цитогенетический мониторинг: методы оценки загрязнений окружающей среды и состояния генетического аппарата организма. Воронеж: Издательство ВГУ, 2004. 80 с. [Kalaev V.N., Karpova S.S. Citogeneticheskij monitoring: metody ocenki zagryaznenij okrughayushchej sredy i sostoyaniya geneticheskogo apparata organizma. Voronezh: Izdatel'stvo VGU; 2004. 80 p. (In Russ.)].
6. Evseeva T.I., Geras'kin S.A., Shuktomova I.I. Genotoxicity and toxicity assay of water sampled from a radium production industry storage cell territory by means of Allium-test. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2003; 68:235–248.
7. Столбова В.В., Щеглов А.И., Агапкина Г.И., Манахов Д.В., Цветнова О.Б. Формы токсичности почв территорий с высокой степенью долговременного радионуклидного загрязнения, выявляемые твердофазным биотестом с *Allium cepa* // *Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение*. 2024 79(3):168–177. <https://doi.org/10.55959/MSU0137-0944-17-2024-79-3-170-179> [Stolbova V.V., Shcheglov A.I., Agapkina G.I et al. Forms of soil toxicity in areas with a high degree of long-term radionuclide contamination identified by a solid-phase biotest with *Allium cepa*. *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2024; 79(3):170–179. (In Russ.) <https://doi.org/10.3103/S0147687424700285>].
8. Удалова А.А., Пяткова С.В., Гераськин С.А. и др. Оценка цито- и генотоксичности поземных вод, отобранных на промплощадке Дальневосточного центра по обращению с радиоактивными отходами. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2016; 56(2):208–219. [Udalova A.A., Pyatkova S.V., Geras'kin S.A. i dr. Ocenna cito- i genotoksichnost pozemnyh vod, otobrannyyh na promploshchadke Dal'nevostochnogo centra po obrashcheniyu s radioaktivnymi othodami. *Radiacionnaya Biologiya. Radioekologiya*. 2016; 56(2): 208–219. (In Russ.)].
9. Дубинин Н.П. *Радиационный и химический мутагенез*. М.: Наука, 2000. 465 с. [Dubinin N.P. *Radiacionnyj i himicheskij mutagenez*. M.: Nauka, 2000. 465 p. (In Russ.)].
10. Ярмоненко С.П., Вайнсон А.А. Радиобиология человека и животных. М.: Высшая школа, 2004. 549 с. [Yarmonenko S.P., Vajnson A.A. *Radiobiologiya cheloveka i zhivotnyh*. M.: Vysshaya shkola, 2004. 549 p. (In Russ.)].
11. Столбова В.В., Мамихин С.В., Котельникова А.Д. и др. Детализация классификации аберраций хромосом с недифференцированным окрашиванием для учета кластогенного воздействия радионуклидных и комплексных загрязнений. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2019; 59(5):465–474. <https://doi.org/10.1134/S0869803119040118>

- [Stolbova V.V., Mamikhin S.V., Kotelnikova A.D. et al. Detailed classification of chromosome aberrations with undifferentiated staining to account for clastogenic effects of radionuclide and complex contaminations. *Biology Bulletin.* 2019; 46(12):465–474. <https://doi.org/10.1134/S1062359019120082>].
12. Синовец С.Ю., Пяткова С.В., Козьмин Г.В. Экспериментальное обоснование использования Аллиум-теста в радиоэкологическом мониторинге. *Изв. высших учебных заведений. Ядерная энергетика.* 2009; 1:32–38. [Sinovec S. Yu., Pyatkova S.V., Koz'min G.V. Eksperimental'noe obosnovanie ispol'zovaniya Allium-testa v radioekologicheskem monitoring. *Izv. vysshih uchebnyh zavedenij. Yadernaya energetika.* 2009; (1): 32–38. (In Russ.)].
13. Пяткова С.В., Гераськин С.А., Васильева А.Н. и др. Особенности использования Allium-теста для оценки токсичности образцов воды и почвы с радиоактивно загрязненных территорий. *Известия вузов. Ядерная энергетика.* 2009; (3):50–57. [Pyatkova S.V., Geras'kin S.A., Vasil'eva A.N i dr. Osobennosti ispol'zovaniya Allium-testa dlya ocenki toksichnosti obrazcov vody i pochvy s radioaktivno zagryaznennyh territorij. *Izv. vysshih uchebnyh zavedenij. Yadernaya energetika.* 2009; (3):50–57. (In Russ.)].
14. Grant W.F. Chromosome aberration assays in allium: A report of the U.S. environmental protection agency gene-tox program. *Mutation Research/Reviews in Genetic Toxicology.* 1982; 99 (3):273–291.
15. Kovalchuk O., Kovalchuk I., Arkhipov A., Telyuk P., Hohn B., Kovalchuk L. The *Allium cepa* chromosome aberration test reliably measures genotoxicity of soils of inhabited areas in the Ukraine contaminated by the Chernobyl accident. *Mutation Research.* 1998; 415:47–57.
16. Бурлакова Е.Б., Дементьев Д.В., Трофимова Е.А., Иняткина Е.М., Кладко Ю.В., Петриченков М.В. Цитогенетические эффекты гамма-излучения в проростках *Allium cepa* L. // Доклады Академии наук.— 2018.— Т. 481.— № 1.— С. 99–103. [Burlakova E.B., Dement'ev D.V., Trofimova E.A., Inyatkina E.M., Klad'ko Yu.V., Petrichenkov M.V. Citogeneticheskie effekty gamma-izlucheniya v prorostkah *Allium cepa* L. Doklady Akademii nauk. 2018; 481(1): 99–103. (In Russ.)].
17. Алдебекова А.Е., Стяжкина Е.В. Цитогенетические эффекты воздействия острого гамма-излучения и импульсного магнитного поля на клетки меристемы *Allium cepa* // 8-ая Международная научно-практическая конференция “Экология XXI века: синтез образования и науки” / Под научной редакцией Н.Н. Назаренко.— Челябинск: Изд-во ЮУрГГПУ, 2020.— С. 117–121. [Aldibekova A.E., Styazhkina E.V. Citogeneticheskie effekty vozdejstviya ostrogo gamma-izlucheniya i impul'snogo magnitnogo polya na kletki meristemy *Allium cepa*. 8-aya Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya “Ekologiya XXI veka: sintez obrazovaniya i nauki” (Conference proceedings) / Pod nauchnoj redakciej N.N. Nazarenko. Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGGPU; 2020. P. 117–121. (In Russ.)].
18. Bolsunovsky A., Dementev D., Trofimova E., Iniatkina E., Kladko Yu., Petrichenkov M. Chromosomal aberrations and micronuclei induced in onion (*Allium cepa*) by gamma-radiation. *Journal of Environmental Radioactivity.* 2019; 207:1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.05.014>
19. Васильева Е.А., Синицына Ю.В., Половинкина Е.О., Цыганкова М.И., Веселов А.П. Изменение некоторых параметров перекисного гомеостаза хлоропластов гороха в ответ на действие физических факторов низкой интенсивности. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского.* 2010; (2): 498–503. [Vasil'eva E.A., Sinicina Yu.V., Polovinkina E.O., Cygankova M.I., Veselov A.P. Izmenenie nekotoryh parametrov perekisnogo gomeostaza hloroplastov goroha v otvet na dejstvie fizicheskikh faktorov nizkoj intensivnosti. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo.* 2010; (2):498–503. (In Russ.)].
20. Бурлакова Е.Б., Голошапов А.Н., Жижина Г.П., Конрадов А.А. Новые аспекты закономерностей действия низкоинтенсивного облучения в малых дозах. Радиационная биология. Радиоэкология. 1999; 39(1):26–33. [Burlakova E.B., Goloshchapov A.N., Zhizhina G.P., Konradov A.A. Novye aspekty zakonomernostej dejstviya nizkointensivnogo oblucheniya v malyh dozah. *Radiacionnaya Biologiya. Radioekologiya.* 1999; 39 (1):26–33. (In Russ.)]
21. Pesnya D.S., Romanovsky A.V. Comparison of cytotoxic and genotoxic effects of plutonium-239 alpha particles and mobile phone GSM 900 radiation in the *Allium cepa* test. *Mutat. Res./Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis.* 2013; 750: 27–33. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2012.08.010>
22. Butini T., Barco F., Cascone M.G., Ciolinia R., Quattrocchi M., Rosellini E., Torres Novas J.A., Xavier M.N., de Souza Lalic S., d'Errico F. Biodosimetry of ionizing radiations at different LET levels through cytogenetic endpoints in *Allium cepa* meristems. *Radiation Measurements.* 2024; 176:107223. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2024.107223>

Tested with *Allium cepa* Clastogenic Effects of Irradiation from Chernobil Zone one Soil Samples in Comparison with Model Oxidizer Genotoxicity

**V. V. Stolbova*, G. I. Agapkina, S. V. Mamikhin,
D. V. Manakhov, A. I. Shcheglov**

*Lomonosov Moscow State University, Soil Science Faculty,
Department of Radioecology and Ecotoxicology, Moscow, Russia*

**e-mail: vstol@bk.ru*

Contribution of the clastogenic effect to mitotic disruption in *Allium cepa* root apical meristem was evaluated in laboratory biotest when exposed to ionizing radiation of a soil sample from 30-km zone of the Chernobyl Nuclear Power Plant, in comparison with genotoxicity of hydrogen peroxide as an oxidizing agent. A range of oxidant concentrations (0.03–150 mmol/l) and radiation levels (equivalent dose rates 0.3–1.53 µGy/h) were tested. Decomposition of the mitotic pathologies frequency into spectrum with allocation of the clastogenic effect share made it possible to identify differences in genotoxicity for the active factors. A greater contribution of the clastogenic component (60–76%) to the spectrum of mitosis disorders was observed under the influence of ionizing radiation compared to the oxidant effect of (36–51%). Cytogenetic features of the clastogenic effect were analyzed according to existing concepts of the molecular mechanisms of chromosome aberration formation. Cytogenetic index “proportion of clastogenic effect”, measured by a simple method of cytogenetic analysis with undifferentiated chromosome staining, is recommended as a sensitive informative indicator for characterizing the stress reaction profile in conditions of environmental pollution by genetically active pollutants of various natures.

Keywords: phytotests, biodiagnostics, genetically active pollutants, Allium-test, cytogenetic indicators, oxidative stress, ionizing radiation, mitotic index, chromosome aberrations

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Столбова Валерия Владимировна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5433-5533>, кандидат биологических наук, кафедра радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М. В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, e-mail: vstol@bk.ru

Stolbova Valeriya Vladimirovna, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5433-5533>, Candidate in Sciences of Biology, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Department of Radioecology and Ecotoxicology, Leninskie Gory, 1, building 12, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: vstol@bk.ru

Агапкина Галина Ивановна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9132-5972>, кандидат химических, кафедра радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М. В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, e-mail: galina_agapkina@mail.ru

Agapkina Galina Ivanovna, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5433-5533>, Candidate in Sciences of Chemistry, Lomonosov Moscow State

University, Faculty of Soil Science, Department of Radioecology and Ecotoxicology, Leninskie Gory, 1, building 12, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: galina_agapkina@mail.ru

Манахов Дмитрий Валентинович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6710-9284>, кандидат биологических наук, кафедра радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М. В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, e-mail: demian2@yandex.ru

Manakhov Dmitriy Valentinovich, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6710-9284>, Candidate in Sciences of Biology, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Department of Radioecology and Ecotoxicology, Leninskie Gory, 1, building 12, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: demian2@yandex.ru

Мамихин Сергей Витальевич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8503-2516>, доктор биологических наук, кафедра радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М. В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, e-mail: mam@soil.msu.ru

Mamikhin Sergey Vital'evich, ORCID:
<https://orcid.org/0000-0002-8503-2516>, Doctor of Biological Sciences, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Department of Radioecology and Ecotoxicology, Leninskie Gory, 1, building 12, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: mam@soil.msu.ru

Щеглов Алексей Иванович, ORCID:
<https://orcid.org/0000-0001-6995-5284>, доктор биологических наук, кафедра радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М. В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12, e-mail: shchegl@mail.ru

Shcheglov Aleksey Ivanovich, ORCID:
<https://orcid.org/0000-0001-6995-5284>, Doctor of Biological Sciences, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Soil Science, Department of Radioecology and Ecotoxicology, Leninskie Gory, 1, building 12, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: shchegl@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.