

P19-2026-6

А. В. Агапов<sup>1</sup>, В. Н. Гаевский<sup>1</sup>, И. С. Гордеев<sup>1</sup>,  
Д. В. Давыдов<sup>1</sup>, Н. В. Ломакин<sup>1</sup>, Г. В. Мицын<sup>1</sup>,  
Е. Е. Павлик<sup>1</sup>, А. В. Рзянина<sup>1,\*</sup>,  
М. А. Стукалова<sup>1</sup>, С. С. Углова<sup>1</sup>

СРАВНЕНИЕ ЧАСТОТЫ ОБРАЗОВАНИЯ  
МИКРОЯДЕР В КЛЕТКАХ А 549  
ПОД ДЕЙСТВИЕМ РЕНТГЕНОВСКОГО  
И  $\gamma$ -ИЗЛУЧЕНИЯ

---

<sup>1</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

\* E-mail: rzjanina@mail.ru



Агапов А. В. и др.

P19-2026-6

Сравнение частоты образования микроядер в клетках А 549 под действием рентгеновского и  $\gamma$ -излучения

Проведены эксперименты по получению калибровочных кривых индукции микроядер в клетках линии А 549 в зависимости от дозы рентгеновского излучения на установке SARRP Лаборатории радиационной биологии ОИЯИ и сравнение результатов с полученными ранее дозовыми зависимостями на  $\gamma$ -терапевтической установке «Рокус-М» с радиоактивным источником  $^{60}\text{Co}$ . Проанализированы возможные причины различий результатов, полученных на двух установках.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзепелова ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2026

Agapov A. V. et al.

P19-2026-6

Comparison of the Frequency of Micronucleus Induction in A 549 Cells under the Action of X-Ray and Gamma Radiation

Experiments were carried out to obtain calibration curves of micronucleus induction in the A 549 cells depending on the dose of X-ray radiation at the SARRP facility of the JINR Laboratory of Radiation Biology and to compare the results with previously obtained dose dependences at the “Rokus-M” gamma-therapeutic facility with the  $^{60}\text{Co}$  radioactive source. The possible reasons for the differences in the results obtained at the two installations are analyzed.

The investigation has been performed at the Dzheleпов Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2026

## ВВЕДЕНИЕ

В связи с выводом из эксплуатации фазотрона Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ и  $\gamma$ -терапевтической установки «Рокус-М» с источником  $^{60}\text{Co}$  появилась необходимость в поиске альтернативных источников ионизирующего излучения для проведения радиобиологических экспериментов. Это связано с тем, что для радиобиологии прежде всего представляет интерес возможность иметь калиброванные пучки с определенной интенсивностью, низкой погрешностью и заранее известным значением относительной биологической эффективности (ОБЭ).

Поэтому возникла необходимость в исследовании образования цитогенетических повреждений в клетках млекопитающих в зависимости от дозы облучения на рентгеновской установке SARRP производства компании Xstrahl (Великобритания), установленной в Лаборатории радиационной биологии (ЛРБ) ОИЯИ [11], и сравнении результатов с полученными ранее аналогичными данными на  $\gamma$ -установке «Рокус-М». Необходимость проведения таких исследований определяется тем, что рентгеновское излучение с энергией фотонов 200 кэВ, а также  $\gamma$ -излучение от  $^{60}\text{Co}$  являются на сегодняшний день «эталоном» при изучении биологического действия других видов ионизирующего излучения. Полученные калибровочные данные будут полезны для дальнейших радиобиологических исследований на базовых установках ОИЯИ, в особенности на прикладных пучках ускоренных ионов комплекса НИСА.

В радиационной биологии микроядерный тест с блокированием цитокинеза является классическим методом оценки генотоксичности при облучении клеток ионизирующим излучением [1]. Микроядра (МЯ) представляют собой небольшие цитоплазматические тельца, содержащие часть хромосомы (центрические/acentрические фрагменты) или целую хромосому, не способные интегрироваться в дочерние ядра и расположенные в непосредственной близости от ядра клетки. Микроядра обнаруживаются в клетках на стадии интерфазы. Они являются частью ядерного хроматина и способны к формированию собственных мембран, но при этом значительно меньше основного ядра клетки по размерам. Определение частоты образования микроядер позволяет количественно оценить цитогенетические нарушения, возникающие под действием ионизирующего излучения. Микроядерный тест используется во многих исследованиях цитогенетического и гистологического характера на клетках различного типа (лимфоцитах, фибробластах, эпителиальных клетках и др.) [2–5]. Анализ успешно применяется для биомониторинга *in vivo* и *in vitro* различных генотоксикантов, включая ионизирующее излучение.

Кривая доза–эффект в микроядерном тесте описывается линейно-квадратичной зависимостью для излучения с низкой ЛПЭ и линейной зависимостью для излучения с высоким значением ЛПЭ [6–9]. Однако экспериментальные данные, полученные в различных лабораториях, демонстрируют значительные различия [10]. Интерпретация дозы с использованием калибровочной кривой, полученной в других источниках, может привести к

трудностям в объяснении результатов экспериментов. Поэтому необходимо тщательно подходить к построению собственных калибровочных кривых на определенных лабораторных установках с учетом технического различия оборудования.

Целью представленной работы является получение калибровочных кривых индукции микроядер в клетках линии А 549 в зависимости от дозы рентгеновского излучения установки SARRP Лаборатории радиационной биологии ОИЯИ и сравнение результатов с полученными ранее дозовыми зависимостями на  $\gamma$ -терапевтической установке «Рокус-М».

## МЕТОДЫ

*Клеточная культура:* Клетки карциномы легкого человека А 549 культивировали в стандартных условиях (37°C, 5% CO<sub>2</sub>). Для культивирования использовалась питательная среда Игла MEM с добавлением 10% эмбриональной телячьей сыворотки, 2 ммоль/л L-глутамина, пенициллина — стрептомицин (50 ед./мл).

*Облучение на установке SARRP.* Монослой клеток линии А 549 выращивали на покровных стеклах в чашках Петри и облучали на рентгеновской установке SARRP ЛРБ ОИЯИ [11] при различных качествах пучка:

- $Q_1$ :  $U = 220$  кВ, фильтр 0,15 мм Cu ( $HVL_1 = 0,688$  мм Cu,  $h_i = 0,425$ ),
- $Q_2$ :  $U = 130$  кВ, фильтр 1,0 мм Al ( $HVL_1 = 2,904$  мм Al,  $h_i = 0,5$ ).

Чашки Петри размещались на полке из PMMA (рис. 1) на расстоянии источник–поверхность (SSD), равном 33 см. Размер поля на уровне SSD составлял 10 × 10 см. Равномерность поля в пределах 10 × 10 см была не хуже 10%, в пределах 5 × 5 см — не хуже 5% (определено по радиохромной пленке Gafchromic EBT 3). На полке нанесена разметка по границам поля для позиционирования образцов.

Абсолютное значение дозы на поверхности полки определялось при помощи ионизационной камеры PTW 30010 [12] и дозиметра Unidos E T10010 [13]. Для этого камера располагалась на центральной оси пучка в месте позиционирования образцов. Измерялся заряд ( $M_{raw}$ ), собранный



Рис. 1. Размещение чашек Петри в установке при облучении образцов

камерой за 60 с. Производилось 10 независимых измерений, для каждого измерения определялась поправка на температуру и давление:

$$k_{TP} = \frac{T + 273,2}{T_{\text{ref}} + 273,2} \frac{P_{\text{ref}}}{P},$$

где референсные значения температуры и давления:  $T_{\text{ref}} (^{\circ}\text{C}) = 20,4$ ,  $P_{\text{ref}} (\text{гПа}) = 999$ , а значения температуры ( $T$ ) и давления ( $P$ ) на момент измерения определялись в области облучения при помощи поверенного термогигрометра ИВА-6 [14]. На основании измерений определялось среднее значение и применялись дополнительные поправки:

$$M = \overline{(M_{\text{raw}} k_{TP})} k_{\text{ion}} k_{\text{pol}} k_{\text{elec}},$$

где  $k_{\text{ion}} = 0,997$  — поправка на неполную эффективность сбора ионов, поправки на влияние изменения полярности напряжения  $k_{\text{pol}}$  и  $k_{\text{elec}}$  равны 1.

Полученное скорректированное показание ( $M$ ) домножалось на поправку качества излучения ( $k_Q$ ) и калибровочный коэффициент ( $N_{D,W}$ ) для данной ионизационной камеры:

$$D_{W,Q} = k_Q N_{D,W} M,$$

где  $N_{D,W} (\text{Гр/кЛ}) = 5,39076 \cdot 10^7$  (калибровка PTW Calibration Lab, Freiburg, Германия). Значения поправочного множителя  $k_Q$  для каждого используемого качества излучения составили 1,000 для  $Q1$  и 1,019 для  $Q2$ . Время экспозиции устанавливалось на основании проведенных измерений. Дополнительные поправки на возможное ослабление или увеличение дозы при использовании разного типа контейнеров не вводились.

*γ-облучение:* Клетки подвергали воздействию  $\gamma$ -излучения  $^{60}\text{Co}$  на установке «Рокус-М» со средней энергией излучения 1,25 МэВ и мощностью поглощенной дозы 0,48 Гр/мин. Процедура облучения проводилась в стандартных условиях с РИП (расстояние источник–поверхность) 75 см. Поглощенную дозу измеряли с помощью клинического дозиметра PTW UNIDOS-E [15] и плоскопараллельной ионизационной камеры Markus [16] при толщине замедлителя из оргстекла, эквивалентной 4,5 мм воды в максимуме глубинно-дозного распределения. Ошибка в определении поглощенной дозы не превышала 5%.

*Микроядерный тест* с блокированием цитокинеза на клетках A 549 [1]. Клетки карциномы легкого человека A 549 выращивали на покровных стеклах в чашках Петри до достижения клетками 70–80% монослоя. В течение 30 мин после облучения в питательную среду для блокировки цитокинеза добавляли цитохалазин В (3 мкл/мл) не менее чем на 24 ч до фиксации клеток. Затем среду удаляли, дважды промывали фосфатно-солевым буфером (ФСБ), фиксировали смесью метанол–уксусная кислота (3:1), промывали ФСБ, красили акридиновым оранжевым и вновь промывали ФСБ. Окрашенные стекла подсушивали и монтировали препараты на предметных стеклах. Определялось количество микроядер на 1000 бинуклеарных клеток. Микроядра считали только в бинуклеарных клетках. Для каждой дозы просчитывалось не менее 1000 бинуклеарных клеток, эксперименты проводились в трех повторах.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Существует общепринятое мнение, что в каждой лаборатории должны быть построены свои калибровочные кривые доза–эффект для устранения межлабораторных различий. Так как существуют различия в квалификации и навыках специалистов, непосредственно проводящих эксперименты, а также в технических характеристиках оборудования. Ввиду сказанного выше нами были получены калибровочные кривые доза–эффект для новой рентгеновской установки SARRP ЛРБ ОИЯИ, которую планируется использовать для дальнейших радиобиологических исследований в большой степени в качестве референсного источника излучения.

На рис. 2 приведены результаты микроядерного теста на клетках линии А 549, облученных рентгеновским излучением с максимальной энергией фотонов 220 и 130 кэВ и сравнение этих результатов с полученными ранее данными на  $\gamma$ -установке «Рокус-М» ( $^{60}\text{Co}$ ).

В таблице приведены данные о количестве микроядер на 1000 бинуклеарных клеток (БН), статистические ошибки представлены в таблице стандартным отклонением ( $\sigma$ ).

Из рис. 2 видно, что наблюдается значимое отличие в индукции микроядер в клетках А 549 между рентгеновским излучением и  $\gamma$ -излучением. По литературным данным, спонтанный уровень микроядер в клетках млекопитающих варьирует от 10 до 40 на 1000 бинуклеарных клеток [17]. В нашей работе спонтанный уровень микроядер без облучения составил порядка 20 микроядер на 1000 бинуклеаров. Из данных таблицы можно заключить, что рентгеновское излучение индуцирует бóльшую частоту образования цитогенетических повреждений при одинаковом уровне доз, чем  $\gamma$ -излучение от  $^{60}\text{Co}$ . А именно: 0,5 Гр  $\gamma$ -излучения индуцирует

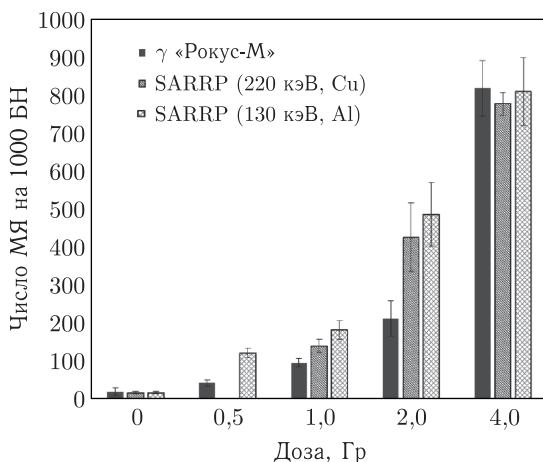


Рис. 2. Сравнение индукции образования микроядер в клетках А 549 при облучении рентгеновским излучением 130 и 220 кэВ, а также  $\gamma$ -излучением  $^{60}\text{Co}$

Таблица. Число микроядер (МЯ) на 1000 бинуклеарных клеток (БН) для разного излучения

Доза, Гр	« $\gamma$ -Рокус-М»		SARRP (220 кэВ, Cu)		SARRP (130 кэВ, Al)	
	Число МЯ на 1000 БН	$\sigma$	Число МЯ на 1000 БН	$\sigma$	Число МЯ на 1000 БН	$\sigma$
0	19	10	16	3	16	3
0,5	42	8	—	—	121	13
1	95	11	140	18	182	24
2	212	46	426	90	486	84
4	819	73	778	30	810	90

( $42 \pm 8$ ) микроядер на 1000 бинуклеаров, а рентгеновского излучения 130 кэВ —  $121 \pm 13$ ; 1 Гр  $\gamma$ -излучения индуцирует в среднем ( $95 \pm 11$ ) микроядер, а при облучении рентгеном 220 кэВ образуется ( $140 \pm 18$ ) МЯ и ( $182 \pm 24$ ) МЯ при 130-кэВ рентгеновском излучении. Аналогичная тенденция соблюдается и при дозе 2 Гр: ( $212 \pm 46$ ) МЯ на 1000 БН для  $\gamma$ -излучения, ( $426 \pm 90$ ) МЯ для рентгеновского излучения 220 кэВ и ( $486 \pm 84$ ) МЯ для рентгена 130 кэВ. Несколько другая картина наблюдается при дозе 4 Гр, здесь уровень микроядер практически одинаковый. По-видимому, это связано с тем, что при облучении  $\gamma$ -излучением в такой дозе на результат значительно влияет задержка деления клеток: в образцах падает количество двуядерных клеток, и становится труднее набрать нужное количество бинуклеаров.

То есть с понижением энергии фотонов растет индукция цитогенетических повреждений в клетках. Следует отметить, что полученные нами данные согласуются с опубликованными результатами других лабораторий как по выходу микроядер в клетках млекопитающих при  $\gamma$ -облучении [18–21], так и при полученных дозовых зависимостях рентгеновского облучения [22–24].

Согласно рекомендациям Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ/ICRP) до 2003 г. было принято считать, что значения ОБЭ и взвешивающего коэффициента фотонов любых энергий равно 1. Однако в редакции этого документа от 2003 г. [25] указывается, что накопилось достаточно много данных, которые свидетельствуют о том, что фотоны разных энергий вызывают различные эффекты при одном уровне доз [27–33], хотя значение взвешивающего коэффициента по-прежнему было рекомендовано считать равным 1. В частности, в работе [26] приводится обзор экспериментальных данных различных лабораторий и сравниваются характеристики биологического действия фотонов разных энергий по отношению к  $\gamma$ -излучению  $^{60}\text{Co}$ .

Например, благодаря проведенным в работе [26] расчетам методом Монте-Карло было установлено, что для фотонов низких энергий (в диапазоне 1–100 кэВ) не выполняется предположение о наличии линейной зависимости между числом актов ионизации, произведенных в некотором объеме и поглощенной дозой в том же объеме. Возможно, этим фактом

могут объясняться наблюдаемые в экспериментах отклонения значений ОБЭ низкоэнергетических фотонов от единицы. Высокая чувствительность средней энергии ионизации к энергии первичного пучка в области 1–100 кэВ позволяет объяснять большой разброс экспериментальных измерений ОБЭ фотонного излучения в данной области энергий. Коэффициент ОБЭ оказывается крайне чувствительным к спектральному составу фотонного излучения, который точно измерить современными детекторами крайне сложно, а следовательно, невозможно учесть на все 100 %.

Второй проблемой, возникающей при облучении биологических образцов рентгеновским излучением, являются неопределенности в установлении точного значения поглощенной в облучаемых образцах дозы. Виной тому — сильная зависимость эффективности взаимодействия рентгеновских фотонов с атомами среды в зависимости от ее эффективного заряда. Например, в нашем случае, когда тонкий монослой клеток нанесен непосредственно на стекло, вклад в дозу дает не только ионизация, возникающая непосредственно в клетках, но и вторичные электроны и фотоны, образовавшиеся в стекле и прошедшие через монослой клеток. А так как плотность и эффективный заряд атомов стекла существенно выше, то и доза, переданная облученным клеткам, будет гораздо больше, чем предполагалось. Так, проведенные в работе [34] расчеты методом Монте-Карло показали, что при использовании подложки из стекла это увеличение поглощенной клетками дозы может достигать до 2 раз в зависимости от энергетического спектра излучения. Поэтому применение материалов с высоким значением эффективного заряда в качестве контейнера или подложки для нанесения монослоя клеток при облучении рентгеновскими лучами крайне не рекомендуется.

Количественно учесть этот эффект практически невозможно, так как он в сильной степени зависит от энергетического спектра излучения, измерить который с большой точностью не представляется возможным. Это еще раз говорит о необходимости проведения калибровочных измерений для каждого конкретного аппарата и для различных условий облучения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом наших исследований стало получение калибровочных данных о дозовой зависимости индукции микроядер в клетках линии А 549 при облучении рентгеновским излучением с максимальной энергией фотонов 220 и 130 кэВ установки SARRP Лаборатории радиационной биологии ОИЯИ. Обнаружено отличие частоты образования микроядер по сравнению с полученными ранее результатами на  $\gamma$ -установке «Рокус-М» с источником  $^{60}\text{Co}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Fenech M.* Cytokinesis-Block Micronucleus Assay Evolves into a “Cytome” Assay of Chromosomal Instability, Mitotic Dysfunction and Cell Death // *Mutat. Res.* 2006. V. 600. P. 58–66.

2. *Калаев В. Н., Буторина А. К., Кудрявцева О. Л.* Частота встречаемости клеток с микроядрами в плоском эпителии, полученном из соскобов с шейки матки женщин детородного возраста при различных физиологических состояниях, в норме и при воспалении // *Естествознание и гуманизм.* 2006. Т. 3, № 2. С. 22–23.
3. *Ревазова Ю. А., Зыкова И. Е., Юрченко В. В., Подольная М. А., Кривцова Е. К.* Использование микроядерного теста на эпителии слизистой оболочки щеки человека // *Гигиена и санитария.* 2008. № 6. С. 53–56.
4. *Moore F., Urda G., Krishna G., Theiss J.* An *In Vivo/In Vitro* Method for Assessing Micronucleus and Chromosome Aberration Induction in Rat Bone Marrow and Spleen. 2. Studies with Chlorambucil and Mitomycin C // *Mutat. Res.* 1995. V. 335, No. 2. P. 201–206.
5. *Voitovich A., Afonin V., Krupnova E., Trusova V., Dromashko E.* The Level of Aberrant Cells in Various Tissues of Bank Vole Depending on Doses and Radionuclide Balance in Organism // *Tsitol. Genet.* 2003. V. 37, No. 4. P. 10–15.
6. *Fenech J., Morley A. A.* Cytokinesis-Block Micronucleus Method in Human Lymphocytes: Effect of *In Vivo* Ageing and Low-Dose X-Irradiation // *Mutat. Res.* 1986. V. 161. P. 193–198.
7. *Prosser J. S., Moquet J. E., Lloyd D. C., Edwards A. A.* Radiation Induction of Micronuclei in Human Lymphocytes // *Mutat. Res.* 1988. V. 199. P. 37–45.
8. *Littlefield L. G., Sayer A. M., Frome E. L.* Comparisons of Dose–Response Parameters for Radiation-Induced Acentric Fragments and Micronuclei Observed in Cytokinesis-Arrested Lymphocytes // *Mutagenesis.* 1989. V. 4. P. 265–270.
9. *Thierens H. et al.* Inter-Laboratory Comparison of Cytogenetic End-Points for the Biomonitoring of Radiological Workers // *Int. J. Radiat. Biol.* 1999. V. 75. P. 23–30.
10. *Bauchinger M., Braselmann H.* Use of Micronuclei in Biological Dosimetry of Absorbed Radiation Dose. Chromosome Aberrations // *Basic and Applied Aspects.* Berlin: Springer-Verlag, 1989. P. 202–211.
11. <https://www.atomic-energy.ru/news/2022/03/31/123310>.
12. <https://www.rpdinc.com/ptw-30010-farmer-chamber-8698.html>.
13. [http://www.teambest.com/CNMC\\_docs/radPhysics/electrometers/CNMC\\_T10010.pdf](http://www.teambest.com/CNMC_docs/radPhysics/electrometers/CNMC_T10010.pdf).
14. <https://gazoanalit.ru/catalog/termogigrometry/termogigrometry-iva-6/>.
15. Официальный сайт PTW The Dosimetry Company.  
URL: <https://www.ptwdosimetry.com/>
16. International Atomic Energy Agency, Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy // *Techn. Rep. Ser. IAEA, Vienna.* 2000. No. 398.
17. *Fenech M.* The *In Vitro* Micronucleus Technique // *Mutat. Res.* 2000. V. 455. P. 81–95.
18. *Колубаева С. Н.* Хромосомные aberrации, микроядра и апоптоз в лимфоцитах при радиационных воздействиях и других патологических состояниях. Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Обнинск, 2010. 34 с.
19. *Михайлова Г. Ф.* Винуклеарный микроядерный метод: оценка возможности биологической индикации и дозиметрии радиационного поражения. Автореф. дис. ... кандидата биол. наук. Обнинск, 2010. 32 с.
20. *McNamee J. P., Flegal F. N., Greene H. B. et al.* Validation of the Cytokinesis-Block Micronucleus (CBMN) Assay for Use as a Triage Biological Dosimetry Tool // *Rad. Prot. Dosim.* 2009. V. 135, No. 4. P. 232–242.

21. Vral A., Fenech M., Thierens H. The Micronucleus Assay as a Biological Dosimeter of *In Vivo* Ionizing Radiation Exposure // *Mutagenesis*. 2011. V. 26, No. 1. P. 11–17.
22. Pejchal J., Vasilieva V., Hristozova M., Vilasová Z., Vávrová J., Alyakov M., Tichý A., Zárýbnická L., Šinkorová Z., Tambor V., Kubelková K., Dresler J. Cytokinesis-Block Micronucleus (CBMN) Assay/CBMN Cytome Assay in Human Lymphocytes after *In Vitro* Irradiation and Its Use in Biodosimetry // *Mil. Med. Sci. Lett.* 2011. V. 80. P. 28–37.
23. Bertsche U. Micronucleus Induction in Mammalian Cell Cultures Treated with Ionizing Radiations // *Radiat. Environ. Biophys.* 1985. V. 24. P. 27–44.
24. Plamadeala C., Wojcik A., Creanga D. Micronuclei versus Chromosomal Aberrations Induced by X-Ray in Radiosensitive Mammalian Cells // *Iran. J. Public Health*. 2015. V. 44, No. 3. P. 325–331.
25. ICRP, 2003. Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor ( $Q$ ), and Radiation Weighting Factor ( $w_R$ ). ICRP Publication 92. Ann. ICRP 33 (4).
26. Белоусов А. В., Бурый В. Е., Матусова Т. В., Черняев А. П. Относительная биологическая эффективность фотонов низких энергий // *Медицинская физика*. 2012. № 3. С. 86–95.
27. Goodhead D. T. The Relevance of Dose for Low-Energy Beta Emitters // *J. Radiol. Prot.* 2009. V. 29. P. 321–333.
28. Nikjoo H., Goodhead D. T. Track Structure Analysis Illustrating the Prominent Role of Low Energy Electrons in Radiobiological Effects of Low-LET Radiations // *Phys. Med. Biol.* 1991. V. 36. P. 229–238.
29. Mestres M., Benkhaled L., Caballín M. R., Barrios L., Ribas M., Barquinero J. F. Induction of Incomplete and Complex Chromosome Aberrations by 30 kVp X Rays // *Radiat. Res.* 2011. V. 175, No. 2. P. 201–207.
30. Schmid E., Krumrey M., Ulm G., Roos H., Regulla D. The Maximum Low-Dose RBE of 17.4 and 40 keV Monochromatic X Rays for the Induction of Dicentric Chromosomes in Human Peripheral Lymphocytes // *Radiat. Res.* 2003. V. 160, No. 5. P. 499–504.
31. Beyreuther E., Dörr W., Lehnert A., Lessmann E., Pawelke J. Relative Biological Effectiveness of 25 and 10 kV X-Rays for the Induction of Chromosomal Aberrations in Two Human Mammary Epithelial Cell Lines // *Radiat. Environ. Biophys.* 2009. V. 48. P. 333–340.
32. Hill M. A. The Variation in Biological Effectiveness of X-Rays and Gamma Rays with Energy // *Radiat. Prot. Dosim.* 2004. V. 112, No. 4. P. 471–481.
33. Schmid E., Regulla D., Kramer H.-M., Harder D. The Effect of 29 kV X Rays on the Dose Response of Chromosome Aberrations in Human Lymphocytes // *Radiat. Res.* 2002. V. 158, No. 6. P. 771–777.
34. Gordeev I. S. Microdosimetry-Based Characterization of X-Ray Irradiators and Dose Enhancement Factor Study for Cell Monolayer Irradiation // *Radiat. Phys. Chem.* 2026. V 238. 113182.

Received on February 3, 2026.

Редактор *М. И. Зарубина*

Подписано в печать 27.02.2026.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 0,68. Уч.-изд. л. 0,88. Тираж 115 экз. Заказ № 61262.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)  
[publish.jinr.ru](http://publish.jinr.ru)