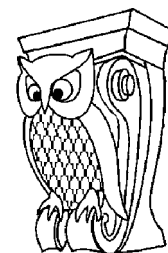




Сравнение радиочувствительности клеток линии А549 при гамма-облучении на установке «Рокус-М» и канале № 3 реактора ИБР-2



А. В. Агапов, М. В. Булавин, В. Н. Гаевский, А. В. Галушко, М. Д. Индюкова,
Г. В. Мицын, А. В. Рзянина[✉], С. С. Углова, В. Р. Ямурзин

Объединенный институт ядерных исследований, Россия, 141980, г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, д. 6

Агапов Алексей Валериевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник сектора радиационной медицины и биологии научно экспериментального отдела новых ускорителей Лаборатории ядерных проблем, agapov@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4471-753X>, AuthorID: 1327003

Булавин Максим Викторович, кандидат физико-математических наук, заместитель главного инженера установки ИБР-2, Лаборатории нейтронной физики, bulavin85@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9729-3414>

Гаевский Виктор Николаевич, ведущий инженер сектора радиационной медицины и биологии научно экспериментального отдела новых ускорителей Лаборатории ядерных проблем, gaevsky@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1668-9206>, AuthorID: 1326558

Галушко Алексей Викторович, начальник группы Лаборатории нейтронной физики, galushko_av@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2754-0738>

Индюкова Мария Дмитриевна, инженер сектора дозиметрии и прикладных исследований научно экспериментального отдела новых ускорителей, отдела научно-исследовательских работ и инноваций Лаборатории ядерных проблем, mary110@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0003-1462-5669>

Мицын Геннадий Валентинович, кандидат технических наук, начальник сектора радиационной медицины и биологии научно-экспериментального отдела новых ускорителей Лаборатории ядерных проблем, mysin@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0000-1201-159X>, AuthorID: 97171

Рзянина Анна Владимировна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник сектора радиационной медицины и биологии научно-экспериментального отдела новых ускорителей Лаборатории ядерных проблем, rzanina@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5418-4642>, AuthorID: 97169

Углова Светлана Сергеевна, старший инженер сектора радиационной медицины и биологии научно экспериментального отдела новых ускорителей Лаборатории ядерных проблем, uglova@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4954-1156>, AuthorID: 1327100

Ямурзин Владик Рафикович, инженер Лаборатории нейтронной физики, yamurzin.v@nf.jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6212-8960>, AuthorID: 1327589

Аннотация. *Цели работы:* получение данных по выживаемости и образованию микроядер в клетках карциномы легкого А549 после воздействия наведенного γ -излучения на облучательной установке канала № 3 ИБР-2 (Объединенный институт ядерных исследований, Дубна) при заглушенном реакторе; проведение сравнения результатов с аналогичными данными, полученными на γ -терапевтической установке «Рокус-М» с источником ^{60}Co . *Материалы и методы.* Клетки карциномы легкого человека А549 подвергались γ -облучению на установке «Рокус-М» и канале № 3 реактора ИБР-2 при заглушенном реакторе. Проведены измерения характеристик радиационного поля от наведенного γ -излучения и анализ выживаемости и образования микроядер в клетках карциномы легкого А549 в данных условиях. *Результаты.* Получены данные о характеристиках радиационного поля от наведенного γ -излучения облучательной установке канала № 3 ИБР-2 при заглушенном реакторе и степени его влияния на радиочувствительность клеток А549. Проведено сравнение выявленных показателей радиочувствительности с ранее полученными данными для γ -терапевтической установки «Рокус-М». *Выводы:* Канал № 3 ИБР-2 при заглушенном реакторе можно использовать как альтернативный источник γ -излучения для биофизических экспериментов, поскольку в экспериментах не обнаружено статистически значимых различий между частотой образования микроядер и выживаемостью клеток при облучении на установках «Рокус-М» и ИБР-2.

Ключевые слова: клетки карциномы легкого человека А549, радиочувствительность, микроядерный тест, γ -излучение

Благодарности: Авторы выражают благодарность М. О. Петровой (Объединенный институт ядерных исследований, Лаборатория нейтронной физики) за предоставленные данные, касающиеся плотности потока нейтронов.

Для цитирования: Агапов А. В., Булавин М. В., Гаевский В. Н., Галушко А. В., Индюкова М. Д., Мицын Г. В., Рзянина А. В., Углова С. С., Ямурзин В. Р. Сравнение радиочувствительности клеток линии А549 при гамма-облучении на установке «Рокус-М» и канале № 3 реактора ИБР-2 // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2026. Т. 26, вып. 2. С. 149–157. <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-149-157>, EDN: MORDBK

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)



Article

Comparison of the radiosensitivity of A549 cells under gamma irradiation at the Rokus-M facility and at the channel No. 3 of the IBR-2 reactor

A. V. Agapov, M. V. Bulavin, V. N. Gayevsky, A. V. Galushko, M. D. Indyukova, G. V. Mytsin, A. V. Rzyanina[✉], S. S. Uglova, V. R. Yamurzin

Joint Institute for Nuclear Research, 6 Joliot-Curie St., Dubna 141980, Russia

Alexey V. Agapov, agapov@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0003-4471-753X>, AuthorID: 1327003

Maksim V. Bulavin, bulavin85@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9729-3414>

Viktor N. Gayevsky, gaevsky@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0005-1668-9206>, AuthorID: 1326558

Alexey V. Galushko, galushko_av@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-2754-0738>

Maria D. Indyukova, mary110@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0003-1462-5669>

Gennady V. Mytsin, mytsin@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0000-1201-159X>, AuthorID: 97171

Anna V. Rzyanina, rzjanina@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-5418-4642>, AuthorID: 97169

Svetlana S. Uglova, uglova@jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0000-4954-1156>, AuthorID: 1327100

Vladik R. Yamurzin, yamurzin.v@nf.jinr.ru, <https://orcid.org/0009-0005-6212-8960>, AuthorID: 1327589

Abstract. Background and Objectives: The objectives of the study were to obtain data on survival and micronuclei formation in A549 lung carcinoma cells after exposure to induced γ -radiation at the IBR-2 channel No. 3 irradiation facility (Joint Institute for Nuclear Research, Dubna) with the reactor shut down and to compare the results with similar data obtained at the Rokus-M γ -therapeutic facility with a ^{60}Co source.

Materials and Methods: Human lung carcinoma A549 cells were exposed to γ -irradiation at the Rokus-M facility and channel No. 3 of the IBR-2 reactor with the reactor shut down. The radiation field characteristics from induced γ -radiation were measured, and survival and micronuclei formation in A549 lung carcinoma cells under these conditions were analyzed. **Results:** Data have been obtained on the characteristics of the radiation field from induced γ -radiation in the IBR-2 channel No. 3 irradiation unit with the reactor shut down and the extent of its influence on the radiosensitivity of A549 cells. A comparison of the identified radiosensitivity indices has been conducted with previously obtained data for the Rokus-M γ -therapeutic unit. **Conclusions:** Channel No. 3 of the IBR-2 with the reactor shut down can be used as an alternative γ -radiation source for biophysical experiments, since no statistically significant differences have been found between the frequency of micronuclei formation and cell survival during irradiation on the Rokus-M and IBR-2 units.

Keywords: radiosensitivity of human lung carcinoma cells A549, micronucleus test, gamma radiation

Acknowledgements: The authors express their gratitude to Mariya O. Petrova (Joint Institute for Nuclear Research, Laboratory of Neutron Physics) for providing data on the neutron flux density.

For citation: Agapov A. V., Bulavin M. V., Gayevsky V. N., Galushko A. V., Indyukova M. D., Mytsin G. V., Rzyanina A. V., Uglova S. S., Yamurzin V. R. Comparison of the radiosensitivity of A549 cells under gamma irradiation at the Rokus-M facility and at the channel No. 3 of the IBR-2 reactor. *Izvestiya of Saratov University. Physics*, 2026, vol. 26, iss. 2, pp. 149–157 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2026-26-2-149-157>, EDN: MORDBK

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

В экспериментальной радиобиологии особенно важна возможность иметь калиброванные источники ионизирующего излучения с определённой интенсивностью, низкой погрешностью и заранее известным значением относительной биологической эффективности (ОБЭ). Таковым является γ -излучение, которое на сегодняшний день служит эталоном при оценке ОБЭ излучений с различными значениями линейной передачи энергии (ЛПЭ). Для γ -излучения накоплено большое количество данных о связи радиобиологических эффектов и дозы излучения.

С целью поиска альтернативных установок «Рокус-М» с источником ^{60}Co (ЛЭМЗ «Равенство», г. Санкт-Петербург) иных источников γ -излучения нами проводились измерения характеристик радиационного поля от наведенного γ -излучения на облучательной установке кана-

ла № 3 ИБР-2 Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ при заглушенном реакторе, а также и изучалась радиочувствительность клеток карциномы легкого человека А549 к этому излучению, в том числе в контексте сравнения с ранее полученными данными на установке «Рокус-М» с источником ^{60}Co .

1. Материалы и методы

1.1. γ -облучение на канале № 3 реактора ИБР-2

Схема канала № 3 реактора ИБР-2, в котором клетки подвергались воздействию γ -излучения, показана на рис. 1. Заштрихованные элементы на схеме являются биологической защитой от излучения [1].

В ближней к активной зоне стене защиты в направлении 3-го канала имеется отверстие прямоугольного сечения размерами 200 мм × 400 мм для вывода пучка нейтронов. Во второй стене

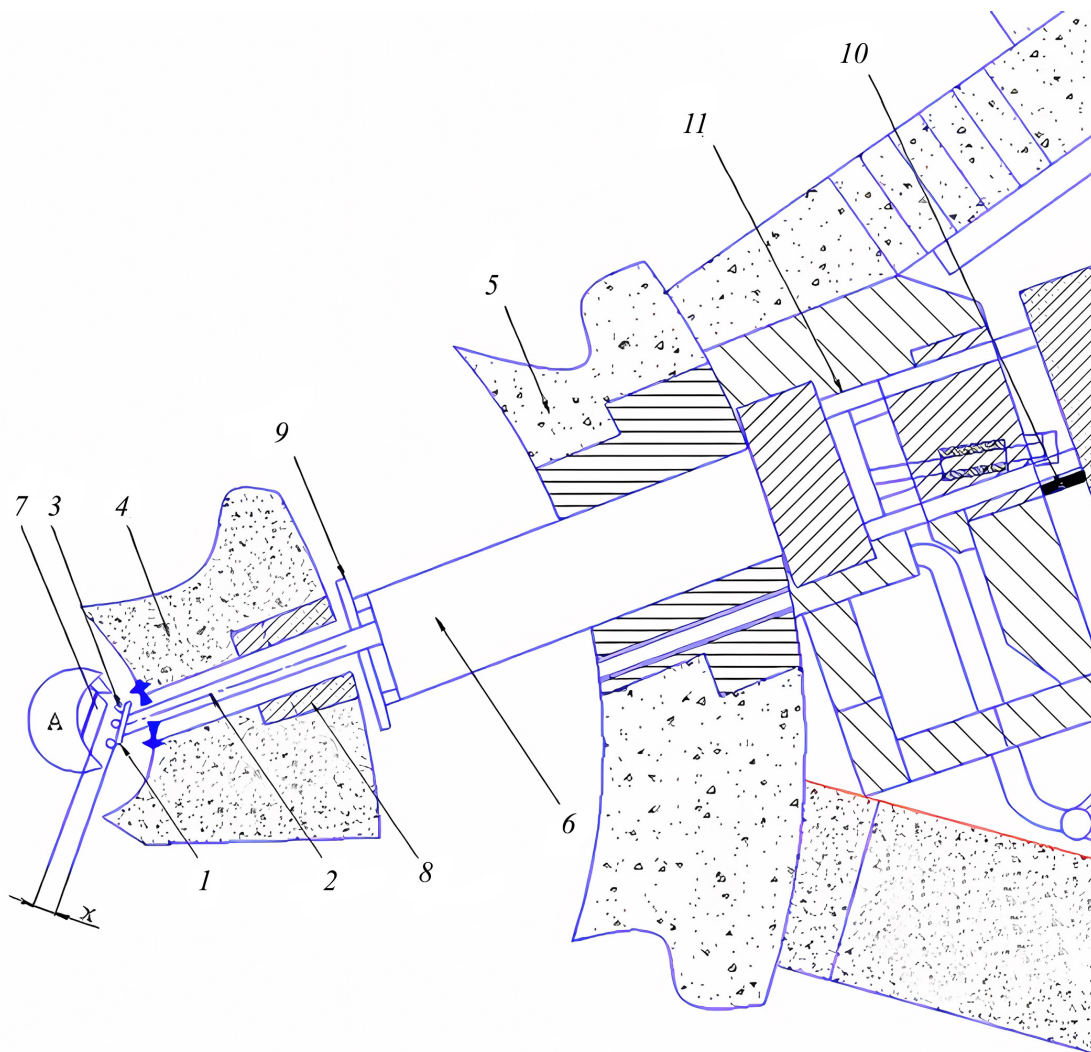


Рис. 1. Схема облучательной установки (в разрезе): А – активная зона реактора ИБР-2; 1 – стенд для облучения образцов и проведения дозиметрии; 2 – транспортный двутавр; 3 – образцы для облучения; 4 – первая биологическая защита; 5 – вторая биологическая защита; 6 – массивная часть облучательной установки; 7 – водяной замедлитель; 8 – шибер биологической защиты; 9, 10 – аварийные упоры, 11 – рельсовый путь. Заштрихованные элементы – биологическая защита от излучения [1]

Fig. 1. Layout of the irradiation unit: А – an active zone of the IBR-2 reactor; 1 – a stand for irradiating samples and conducting dosimetry; 2 – a transport H-beam; 3 – samples for irradiation; 4 – the first biological shielding; 5 – the second biological shielding; 6 – a massive part of the irradiation unit; 7 – a water moderator; 8 – the biological shielding gate; 9, 10 – emergency stops, 11 – the rail track. The shaded elements in the diagram are biological radiation shielding [1]

биологической защиты в зоне 3-го канала предусмотрено круглое отверстие диаметром 800 мм для ввода облучательной установки в кольцевой коридор.

Головная часть облучательной установки представляет собой горизонтально расположенный заполненный водой стальной цилиндрический бак диаметром 800 мм с закрепленным на ближнем к активной зоне торце транспортным двутавром шириной 100 мм, высотой 82 мм и длиной 2.7 м. Установка перемещается по рельсовому пути при помощи механизма

с электроприводом, что обеспечивает установку облучаемых образцов, закрепляемых на торце двутавра, на определенном расстоянии от водяной защиты реактора, которое выбирается в соответствие с требуемым интегральным флюенсом нейтронов (при активном реакторе) или гамма-квантов, но не ближе, чем 40 мм от поверхности замедлителя. Облучательная установка имеет биологическую защиту от ионизирующего излучения [1].

Непосредственным источником γ -излучения в данном исследовании в основном является ак-



тивированная в процессе работы реактора *стальная оболочка биологической защиты реактора*, при этом сам реактор был заглушен. К сожалению, непосредственно измерить энергетический спектр испускаемых квантов не представлялось возможным, поэтому эффективная энергия излучения была оценена по кривой ослабления дозы от толщины для различных веществ, о чем будет сказано далее.

Для измерения и контроля дозы во время облучения использовался клинический дозиметр PTW UNIDOS-E (PTW-Freiburg, Германия) [2] с плоскопараллельной ионизационной камерой Markus (PTW-Freiburg, Германия) [3], что позволяло измерять накопленную дозу или мощность дозы с погрешностью не хуже 5%. Для крепления камеры и облучаемых образцов на торце двутавра устанавливался стенд, изготовленный на 3D принтере из пластика ABS.

1.2. γ -облучение на установке «Рокус-М»

На установке «Рокус-М» клетки подвергались воздействию γ -излучения ^{60}Co со средней энергией квантов 1.25 МэВ и мощностью поглощенной дозы 0.48 Гр/мин. Процедура облучения проводилась при параметрах: расстояние источник – поверхность (РИП) 75 см, коллиматор 10×10 см. Поглощенную дозу измеряли тем же дозиметром при толщине замедлителя из оргстекла перед камерой, эквивалентной 4.5 мм воды в максимуме глубинно-дозового распределения. Ошибка в определении поглощенной дозы также не превышала 5%.

1.3. Клеточная культура

Клетки карциномы легкого человека линии A549 [4–6] (ООО «Биолот», г. С.-Петербург) культивировали либо в чашках Петри, либо в культуральных флаконах в зависимости от задачи эксперимента. Клетки инкубировали в стандартных условиях (37°C , 5% CO_2). Для культивирования использовалась питательная среда Игла MEM (НПП «ПанЭко», г. Москва) с добавлением 10% эмбриональной телячьей сыворотки (2 ммоль/л), раствора L-глутамин – пенициллина – стрептомицина, 50 ед./мл (НПП «ПанЭко», г. Москва).

1.4. Определение клоногенной выживаемости клеток

Клетки дважды промывали фосфатно-солевым буфером (ФСБ), снимали с культурального флакона с помощью раствора трипсин-

версена, ресуспендировали в эппендорфы и облучали γ -излучением в дозе 0, 0.5, 1, 2, 3 и 4.5 Гр на установках «Рокус-М» и канала № 3 ИБР-2 по показаниям клинического дозиметра. Затем клетки высевали в культуральные флаконы из расчета 50 клеток/мл среды. Клетки культивировали в стандартных условиях (среда Игла MEM с добавлением 10% эмбриональной телячьей сыворотки, 37°C , 5% CO_2) в течение времени, необходимого для формирования колоний. Далее клетки промывали ФСБ и окрашивали смесью метанола и кристаллического фиолетового в течение 30 мин при комнатной температуре. Для определения выживаемости клеток через 12–14 дней после посева подсчитывалось количество выросших колоний, где каждая колония считалась представляющей выжившую клетку, способную к пролиферации [7–9].

Эффективность посева (ЭП) определялась отношением числа выросших колоний к числу посеянных клеток:

$$\text{ЭП} = \frac{\text{Число выросших колоний}}{\text{Число посеянных клеток}} \cdot 100\%. \quad (1)$$

Показатель выживаемости (S-survival) определялся отношением ЭП облученных клеток к ЭП контрольных клеток:

$$S = \frac{\text{ЭП облученных клеток}}{\text{ЭП контрольных клеток}} \cdot 100\%. \quad (2)$$

1.5. Микроядерный тест с блокированием цитокинеза

Микроядерный тест с блокированием цитокинеза является классическим методом оценки генотоксичности факторов окружающей среды (как химической, так и физической природы) и служит для выявления потенциально опасных генотоксических соединений.

Микроядра (МЯ) обнаруживаются в клетках на стадии интерфазы и представляют собой небольшого размера цитоплазматические тельца, содержащие часть хромосомы (центрические/ацентрические фрагменты) или целую хромосому, не способные интегрировать в дочерние ядра и расположенные в непосредственной близости от ядра клетки (или связанные с ним посредством хроматиновых мостиков). Частота образования микроядер позволяет количественно оценить цитогенетические нарушения, которые формируют микроядра, содержащие отставшие фрагменты хромосом или целые хромосомы [10–13].



Клетки карциномы легкого человека А549 выращивали на покровных стеклах в чашках Петри. При достижении клетками 70–80% моно-слоя клетки подвергались γ -облучению в дозе 0, 0.5, 1, 2 Гр на установках «Рокус-М» и канала № 3 ИБР-2. В течение 30 мин после облучения в питательную среду для блокировки цитокинеза добавляли цитохалазин В (3 мкл/мл). Клетки фиксировали через 24 ч после добавления цитохалазина В. Среду удаляли, дважды промывали 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. Микроядра считали только в бинуклеарных клетках. Для каждой дозы просчитывалось не менее 1000 бинуклеарных клеток, эксперименты проводились в трех повторах.

1.6. Статистический анализ

Статистическую обработку данных проводили с помощью программы GraphPad Prism и Microsoft Excel. Количественные данные проверяли на нормальность распределения с использованием критерия Шапиро–Уилка. Для выявления статистических различий данных применяли критерий Стьюдента для независимых выборок. Данные представлены в виде средних значений как минимум трех экспериментов, выполненных в трех повторах, \pm стандартное отклонение. В качестве критического уровня значимости использовали значение $p < 0.05$.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Результаты измерения характеристик радиационного поля от наведенного γ -излучения

Одной из важных характеристик излучения является ослабление мощности дозы с увеличением расстояния от водяного замедлителя до торца двутавра, где фиксируется детектор (ионизационная камера дозиметра) и облучаемый образец. Результаты измерения этой зависимости представлены на рис. 2.

Из данных измерений следует, что эффективный фокус, т. е. точка, откуда выходит излучение (при условии его убывания обратно пропорционально квадрату расстояния), находится на глубине около 50–60 см от внешней поверхности водяной защиты. Это следует учитывать при облучении образцов значительной (более 10 см) протяженности.

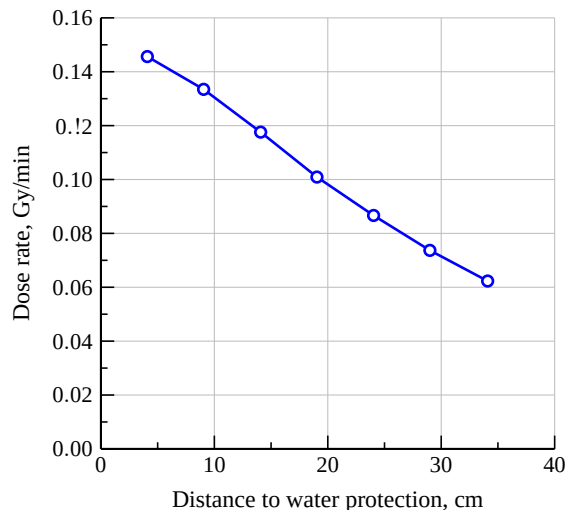


Рис. 2. Зависимость мощности дозы от расстояния между детектором и внешней поверхностью водяной защиты
Fig. 2. Dependence of the dose rate on the distance between the detector and the outer surface of the water shielding

Для оценки эффективной (средней) по спектру энергии γ -квантов были проведены измерения ослабления мощности дозы от толщины различных материалов, устанавливаемых перед детектором (сам детектор оставался на месте). Измерения были проведены для органического стекла, модельного воска и свинца. В качестве примера на рис. 3 приведена кривая ослабления мощности излучения для оргстекла РММА (polymethylmethacrylate, произведено в компании «Пласт.ру», г. Москва).

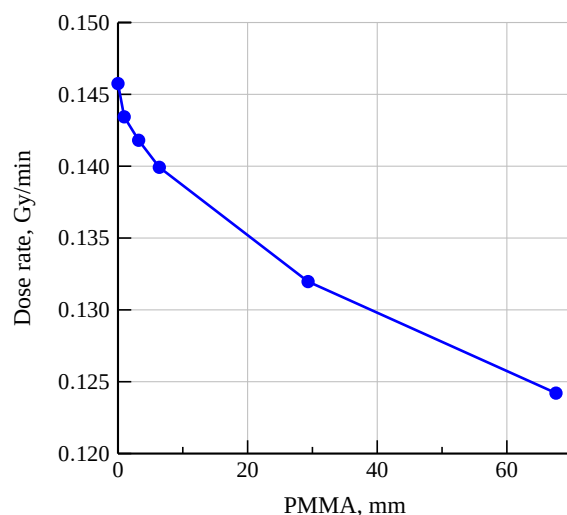


Рис. 3. Зависимость ослабления мощности дозы от толщины оргстекла РММА, устанавливаемого перед детектором

Fig. 3. Dependence of the dose rate attenuation on the thickness of the acrylic plastic PMMA installed in front of the detector



Из построенной кривой видно, что при малых толщинах заметный вклад в дозу вносит относительно низкоэнергетическая компонента излучения, которая резко убывает с толщиной замедлителя. Поэтому во всех последующих облучениях и измерениях перед детектором и образцом устанавливался замедлитель из оргстекла толщиной 1.5 см, который отсекал влияние этой «мягкой» компоненты.

Для того чтобы убедиться в том, что γ -кванты приходят в детектор именно напрямую со стороны водяной защиты, а не являются рассеянными в каких-то иных рядом расположенных конструкциях, детектор был окружен со всех сторон (кроме рабочей) листовым свинцом толщиной 2 мм. Показания детектора остались при этом неизменными в пределах погрешности измерений (около 3–5%).

Так как суммарный энергетический спектр излучения не известен, то методом Монте-Карло была произведена оценка некоторой эффективной или средней его энергии. В процессе симуляции энергия монохроматических γ -квантов подгонялась таким образом, чтобы значение половинного ослабления дозы максимально соответствовало измеренной для разных веществ величине. Были получены следующие значения: для свинца 4–5 МэВ, для оргстекла 7–8 МэВ, для воска 9–10 МэВ. Такой большой разброс полученных значений можно объяснить существенным отличием в величине эффективного заряда атомов вещества замедлителей, учитывая, по всей видимости, достаточно широкий энергетический спектр излучения.

Также было оценено среднее время периода полураспада излучающих изотопов, дающих вклад в общую дозу. Для этого измерения мощности дозы, осуществленные примерно в одинаковых условиях за 1.5 года, были аппроксимированы экспоненциальной зависимостью (рис. 4). В результате для среднего периода полураспада было получено значение, равное примерно 290 дней.

Несмотря на то, что реактор во время проведения экспериментов был заглушен, какой-то нейтронный фон в точке облучения все равно присутствовал. Для его измерения в позицию образца был установлен спутник НАА, а именно золотая фольга толщиной 50 нм. Интегральная плотность нейтронного потока составила около 10^2 нейтрон/(см²·с), что не может дать какого-либо заметного вклада в общую мощность дозы.

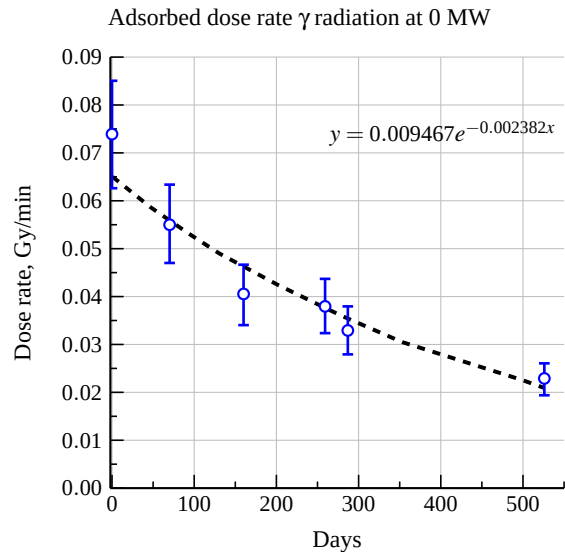


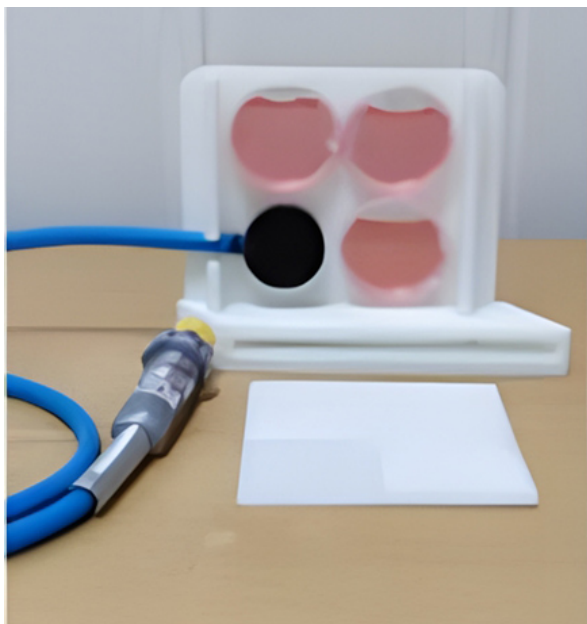
Рис. 4. Зависимость уменьшения мощности дозы от времени при заглушенном реакторе

Fig. 4. Dependence of the dose rate decrease on time when the reactor is shut down

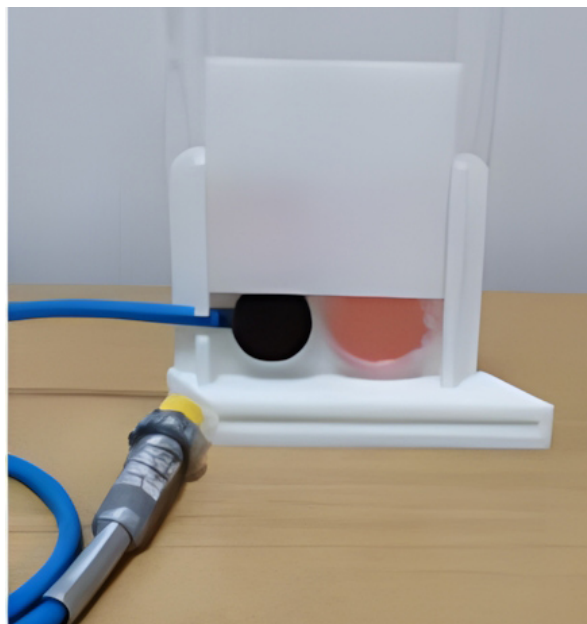
2.2. Исследование выживаемости и образования микроядер в клетках карциномы легкого A549

Для проведения эксперимента по исследованию выживаемости и образования микроядер в клетках карциномы легкого A549 после воздействия наведенного γ -излучения на облучательной установке канала № 3 ИБР-2 при заглушенном реакторе был разработан и изготовлен на 3D принтере стенд для установки и облучения образцов, а также крепления детектора дозиметра (рис. 5). Стенд состоит из держателя с отверстиями для трех образцов лабораторной посуды и «гнезда» для детектора. На время облучения образцы с детектором закрываются задвигающейся крышкой, что позволяет избежать случайного их выпадения из держателя. Со стороны облучения установлена пластина из оргстекла, поглощающая мягкую компоненту излучения.

Процесс монтажа стенда на облучательной установке канала № 3 реактора ИБР-2 показан на рис. 6. На рис. 7 представлены результаты измерения выживаемости клеток A549 в зависимости от дозы γ -излучения. Кривая выживаемости, выявленная на облучательной установке канала № 3 ИБР-2, близка по своим значениям к кривой, полученной ранее на γ -установке «Рокус-М». Не обнаружено статистически значимых различий между наклонами кривых выживаемости, полученных на двух установках (p -value = 0.720, при критическом уровне значимости $p < 0.05$).



a/a



б/б

Рис. 5. Стенд для облучения образцов и проведения дозиметрии (цвет онлайн)
 Fig. 5. Stand for irradiation of samples and dosimetry (color online)



Рис. 6. Монтрование стенда для облучения на установке канала № 3 реактора ИБР-2 (цвет онлайн)
 Fig. 6. Mounting of the irradiation stand at the installation of channel № 3 of the IBR-2 reactor (color online)

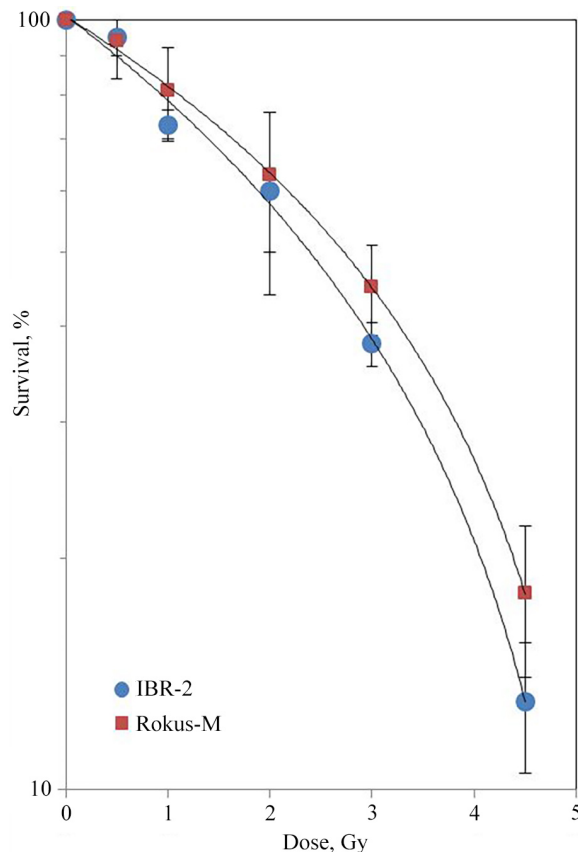


Рис. 7. Выживаемость клеток А549 в зависимости от дозы γ -излучения, измеренная на двух установках (цвет онлайн)
 Fig. 7. Survival rate of A549 cells depending on the dose of gamma radiation, measured on the two facilities (color online)



Аналогичная тенденция наблюдалась для процесса образования микроядер в клетках A549 после облучения. Частота образования микроядер при облучении на ИБР-2 несколько выше, чем при облучении на установке «Рокус-М» (рис. 8). Однако не было выявлено статистически значимых различий между частотой образования микроядер при облучении на установках «Рокус-М» и ИБР-2 (p -value = 0.948 при критическом уровне значимости $p < 0.05$).

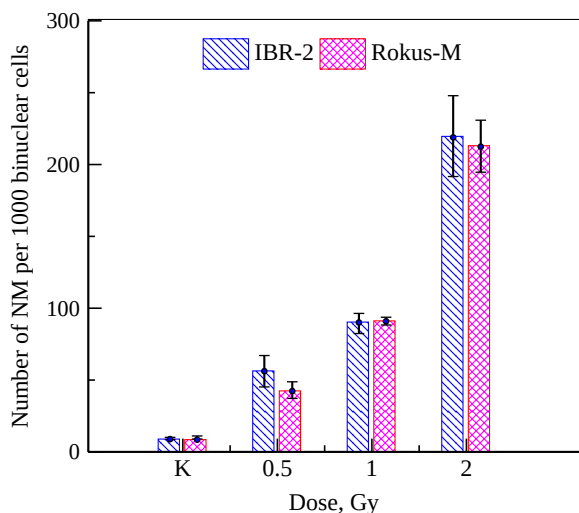


Рис. 8. Частота образования микроядер в клетках A549 в зависимости от дозы γ -излучения, измеренная на двух установках

Fig. 8. The frequency of micronucleus formation in A549 cells as a function of the gamma radiation dose, measured on the two facilities

Выводы

Представлены результаты исследования радиочувствительности клеток A549 на облучательной установке канала № 3 ИБР-2 при заглушенном реакторе и их сравнения с ранее полученными данными для γ -терапевтической установки «Рокус-М». Оценена клоногенная выживаемость и проведён микроядерный тест с блокированием цитокинеза на клетках линии A549. В результате проведенных экспериментов не обнаружено статистически значимых различий между частотой образования микроядер (p -value = 0.948) и выживаемостью клеток (p -value = 0.720) при облучении на установках «Рокус-М» и ИБР-2 при критическом уровне значимости $p < 0.05$. Таким образом, канал № 3 ИБР-2 при заглушенном реакторе можно использовать как альтернативный источник γ -излучения для биофизических экспериментов.

Как уже говорилось, данные эксперименты проводились в основном с целью поиска альтернативных установок «Рокус-М» источников γ -излучения. Для биофизических исследований немаловажными факторами являются время и условия проведения эксперимента. При планировании экспериментов для облучения на канале № 3 реактора ИБР-2 следует учитывать, что время подготовки (установка образца, коммуникация с инженерным персоналом, доставка образца до точки облучения) составляет около 20–30 минут на одно облучение, что не совсем удобно при работе с клеточными культурами. Тем не менее, при этом имеется возможность облучать относительно большие биологические объекты, например лабораторных животных, растения, когда однородность дозы по объему не является определяющим фактором.

Список литературы / References

1. Shabalin E. P., Verkhoglyadov A. E., Bulavin M. V., Rogov A. D., Kulagin E. N., Kulikov S. A. Spectrum and density of neutron flux in the irradiation beam line no. 3 of the IBR-2 reactor. *Phys. Part. Nuclei Lett.*, 2015, vol. 12, pp. 336–343. <https://doi.org/10.1134/S154747711502020X>
2. *PTW Dosimetry Company*. Available at: <https://www.ptwdosimetry.com> (accessed February 12, 2026).
3. *Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy. Technical Reports Series No. 398*. Vienna, IAEA, 2000. 229 p.
4. Foster K. A., Oster C. G., Mayer M. M., Avery M. L., Audus K. L. Characterization of the A549 cell line as a type II pulmonary epithelial cell model for drug metabolism. *Experimental Cell Research*, 1998, vol. 243, iss. 2, pp. 359–366. <https://doi.org/10.1006/excr.1998.4172>
5. Giard D. J., Aaronson S. A., Todaro G. J., Arnstein P., Kersey J. H., Dosik H., Parks W. P. *In vitro* cultivation of human tumors: Establishment of cell lines derived from a series of solid tumors. *Journal of the National Cancer Institute*, 1973, vol. 51, no. 5, pp. 1417–1423. <https://doi.org/10.1093/jnci/51.5.1417>
6. Moreira A. S., Silva A. C., Sousa M. F. Q., Whirterc A. H., Ahlenc G., Lundgren M., Coroadinha A. S., Alves P. M., Peixoto C., Carrondo M. J. T. Establishing suspension cell cultures for improved manufacturing of oncolytic adenovirus. *Biotechnology Journal*, 2020, vol. 15, no. 4, art. 1900411. <https://doi.org/10.1002/biot.201900411>
7. Puck T. T., Marcus P. I. Action of x-rays on mammalian cells. *J. Exp. Med.*, 1956, vol. 103, no. 5, pp. 653–666. <https://doi.org/10.1084/jem.103.5.653>
8. Buch K., Peters T., Nawroth T., Sanger M., Schmidberger H., Langguth P. Determination of cell survival after irradiation via clonogenic assay versus multiple



- MTT Assay – A comparative study. *Radiation Oncology*, 2012, vol. 7, art. 1. <https://doi.org/10.1186/1748-717X-7-1>
9. Oike T., Hirota Yu., Darwis N. D. M., Shibata A., Ohno T. Comparison of clonogenic survival data obtained by pre- and post-irradiation methods. *J. Pers. Med.*, 2020, vol. 10, iss. 4, art. 171. <https://doi.org/10.3390/jpm10040171>
10. Fenech M. Cytokinesis-block micronucleus cytome assay. *Nature Protocols*, 2007, vol. 2, no. 5, pp. 1084–1104. <https://doi.org/10.1038/nprot.2007.77>
11. Zvereva D. E. Application of micronucleus test for evaluation of genotoxic properties of drugs. *Vestnik soveta molodykh uchenykh i spetsialistov Chelyabinskoy oblasti*, 2019, vol. 1, no. 2 (25), pp. 10–20 (in Russian). EDN: BTGCFM
12. Vral A., Fenech M., Thierens H. The micronucleus assay as a biological dosimeter of *in vivo* ionising radiation exposure. *Mutagenesis*, 2011, vol. 26, iss. 1, pp. 11–17. <https://doi.org/10.1093/mutage/geq078>
13. Ryabchenko N. I., Antoshchina M. M., Nasonova V. A., Fesenko E. V. Analysis of chromosome aberrations and micronucleus in the descendants of chinese hamster cells, irradiated at various doses and intensities of γ -radiation. *Radiatsiya i risk (Byulleten' Natsional'nogo radiatsionno-epidemiologicheskogo registra [Radiation and Risk (Bulletin of the National radiation-epidemiological registry)]*, 2006, vol. 15, no. 1–2, pp. 114–120 (in Russian).

Поступила в редакцию 30.01.2026; одобрена после рецензирования 11.03.2026; принята к публикации 07.04.2026; опубликована 30.06.2026

The article was submitted 30.01.2026; approved after reviewing 11.03.2026; accepted for publication 07.04.2026; published 30.06.2026