



ОЦЕНКА ДОЗ В КРИТИЧЕСКИХ ОРГАНАХ БОЛЬНЫХ РАКОМ ЛЕГКОГО ПРИ ПЕРЕХОДЕ К РЕЖИМУ ГИПОФРАКЦИОНИРОВАНИЯ

Романов Л.А.¹, Кудашкина Ю.А.^{1,2}, Барт Ю.И.², Лебеденко И.М.^{1,2}✉, Гладилина И.А.^{2,3}, Черных М.В.²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ;

Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31

² Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава России;

Россия, 115478, Москва, Каширское шоссе, 24

³ Кафедра онкологии и лучевой терапии РНИМУ им. Н.И. Пирогова МЗРФ, Россия, Москва

✉ Ирина Матвеевна Лебеденко, imlebedenko@mail.ru, +7985-915-64-63

РЕФЕРАТ

Цель: Оценить дозовые нагрузки при планировании облучения на критические структуры больных раком легкого при переходе от стандартной ЛТ с РД = 2 Гр (30 фракций) к режиму с увеличенной разовой дозой РД = 3 Гр (18 фракций).

Материалы и методы: В исследование включены две группы из 53 пациентов, получавших лучевую терапию с использованием современной методики IMRT (лучевая терапия с модуляцией интенсивности). В группу больных, получавших разовую дозу РД = 2 Гр вошли 35 пациентов, а в группу с РД = 3 Гр — 18 пациентов.

Результаты. Группа с разовой дозой РД = 2 Гр характеризуется более высокой дозой в целевом объеме, а также улучшенными параметрами качества планирования *HI* и *CI*. Дозовые нагрузки на критические органы в группе с РД = 2 Гр (спинной мозг, сердце, легкие, пищевод) несколько выше, чем в группе с РД = 3 Гр, тем не менее, остаются в пределах допустимых значений. Группа с РД = 3 Гр демонстрирует более щадящий профиль дозовой нагрузки на органы риска, что делает данный режим предпочтительным для пациентов с ограниченным соматическим резервом, особенно при кардиопульмонологических нарушениях. Помимо этого, режим РД = 3 Гр применяется в рамках ускоренного курса лечения, что позволяет сократить общую продолжительность терапии.

Ключевые слова: лучевая терапия, рак легкого, количественный анализ, режим гипофракционирования

Для цитирования: Романов Л.А., Кудашкина Ю.А., Барт Ю.И., Лебеденко И.М., Гладилина И.А., Черных М.В. Оценка доз в критических органах больных раком легкого при переходе к режиму гипофракционирования. Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2025;8(4):9-15.

<https://doi.org/10.37174/2587-7593-2025-8-4-9-15>

Journal of Oncology: Diagnostic Radiology and Radiotherapy

ISSN: 2587-7593 (Print) ISSN: 2713-167X (Online)

ЛУЧЕВАЯ ТЕРАПИЯ | RADIOTHERAPY

<https://doi.org/10.37174/2587-7593-2025-8-4-9-15>

ASSESSMENT OF DOSES IN CRITICAL ORGANS OF LUNG CANCER PATIENTS DURING THE TRANSITION TO A HYPOFRACTIONATION REGIME

Leonid A. Romanov¹, Yulia A. Kudashkina^{1,2}, Yulia I. Bart², Irina M. Lebedenko^{1,2}✉, Irina A. Gladilina^{2,3}, Marina V. Chernikh²

¹ National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute). 31 Kashirskoye Highway, Moscow, Russia 115409.

² N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology; 24 Kashirskoye Shosse, Moscow, Russia 115478

³ Department of Oncology and Radiation Therapy, N.I. Pirogov Russian National Research Medical University, Moscow, Russia

✉ Irina M. Lebedenko, imlebedenko@mail.ru

ABSTRACT

Purpose: To evaluate the dose loads during radiation planning for critical structures of lung cancer patients during the transition from standard RT with SD = 2 Gy to a regimen with a single dose of SD = 3 Gy.

Materials and methods: The study included a group of 53 patients who received radiation therapy using the modern IMRT (intensive modulated radiation therapy) technique. The group receiving a single dose of SD = 2 Gy included 35 patients, and the group with SD = 3 Gy included 18 patients.

Results: The group with a single dose of SD = 2 Gy is characterized by a higher dose in the target volume, as well as improved planning quality parameters *HI* and *CI*. The dose loads on critical organs in the group with SD = 2 Gy (spinal cord, heart, lungs, esophagus) are slightly higher than in the group with SD = 3 Gy, however, they remain within acceptable values. The group with SD = 3 Gy demonstrates a more gentle profile of the dose load on the risk organs, which makes this regimen preferable for patients with limited somatic reserve, especially with cardiopulmonary disorders. In addition, the SD = 3 Gy regimen is used as part of an accelerated course of treatment, which reduces the overall duration of therapy.

Keywords: radiotherapy, lung cancer, quantitative analysis, hypofractionation regimen

For citation: Romanov L.A., Kudashkina Yu.A., Bart Yu.I., Lebedenko I.M., Gladilina I.A., Chernikh M.V. Assessment of Doses in Critical Organs of Lung Cancer Patients During the Transition to a Hypofractionation Regime. Journal of Oncology: Diagnostic Radiology and Radiotherapy. 2025;8(4):9-15. (In Russ.).

<https://doi.org/10.37174/2587-7593-2025-8-4-9-15>

Введение

При планировании лучевой терапии (ЛТ) онкологических заболеваний одним из влияющих на результат лечения факторов является выбор разовой дозы облучения. Для разовой дозы РД = 2 Гр суммарная доза составляет 60 Гр. В случае РД = 3 Гр, суммарная изоэффективная доза составляет 54 Гр. Все это влияет на характер распределение дозы в мишени, а также в критических органах.

Гипофракционирование — это режим ЛТ, при котором предполагается использование более высоких разовых доз на каждый сеанс облучения, но с уменьшенным общим количеством сеансов облучения. Преимущества гипофракционированной ЛТ заключаются в уменьшении общего времени лечения за счет меньшего количества сеансов ЛТ, при этом снижаются временные затраты на лечение для пациентов и нагрузка на радиотерапевтическое отделение в целом. С другой стороны, увеличение дозы ЛТ за один сеанс может привести к увеличению побочных эффектов, при этом возрастает риск повреждения здоровых тканей, прилежащих к опухоли.

Критериями выбора оптимальных планов облучения могут быть такие количественные характеристики, как индексы конформности (*CI*), конформности Паддика (*PCI*), гомогенности (*HI*), оценка дозовых нагрузок на критические органы (легкие, сердце, пищевод и спинной мозг).

Цель: оценить дозовые нагрузки на критические структуры и повысить качество лечения больных раком легкого при переходе от стандартной ЛТ к режимам с увеличенными разовыми дозами, то есть от РД = 2 Гр (30 фракций) к РД = 3 Гр (18 фракций).

Материалы и методы

Характеристика клинического материала

В исследование включены две группы пациентов, получавших лучевую терапию с использованием современной методики IMRT (лучевая терапия с модуляцией интенсивности). В группу, получавших разовую дозу РД = 2 Гр вошли 35 пациентов, а в группу с РД = 3 Гр — 18 пациентов. Всего 53. Все пациенты проходили лечение согласно утвержденным протоколам, соответствующим международным рекомендациям по лучевой терапии. Соотношение количества пациентов в группах приведены на рис. 1.

Основные параметры лучевой терапии варьировали между группами. По данным дозиметрического планирования средняя доза в планируемом объеме РТV, охваченном изодозой 98 % (РТV 98 %), составила 56,7 Гр для группы с РД = 2 Гр и 50,1 Гр для группы с РД = 3 Гр. Суммарная доза также была

Соотношение количества пациентов в группах:
с РД = 2 Гр (35 пациентов и 66 %) и
с РД = 3 Гр (18 пациентов и 34 %)

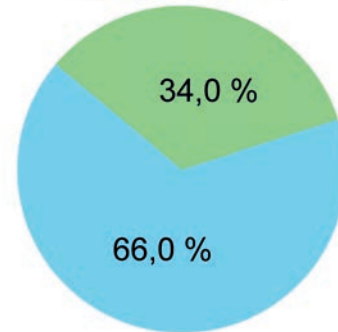


Рис. 1. Соотношение количества пациентов в группах с дозами РД = 2 Гр и 3 Гр

Fig. 1. The ratio of the number of patients in the groups with doses of SD = 2 Gy and 3 Gy

выше в группе с РД = 2 Гр — 60 Гр против 54 Гр в группе с РД = 3 Гр, что полностью соответствовало лечебному протоколу. Важно отметить, что во всех случаях применялась методика IMRT.

Ускорители электронов и системы планирования

Осуществлен анализ планов облучения 53 пациентов, прошедших лечение на ускорителе Varian Clinac iX (Varian, США). Система планирования (СП) облучения больных Eclipse (Varian, США) на указанном ускорителе позволяет интегрировать изображения разных модальностей, объединяя анатомическую точность данных рентгеновской КТ с функциональной информацией ПЭТ и МРТ. Это дает возможность более точно определять границы опухоли (GTV), зоны потенциального микроскопического распространения (CTV), планируемый объем облучения (PTV) и критические структуры. Для обеспечения точного позиционирования и учёта анатомических изменений пациента использована технология наложения изображений (image fusion), которая позволяла интегрировать диагностические и топометрические данные, полученные в разные моменты времени или с использованием различных модальностей (например, КТ). Это осуществлялось в рамках единой координатной системы за счёт применения методов регистрации изображений (image registration), включающих как ручные, так и автоматические алгоритмы совмещения анатомических структур.

Расчет количественных характеристик

Индекс конформности *CI* использовался для количественной оценки степени совпадения области, получающей высокую дозу, с анатомическим объемом мишени РТV. В соответствии с рекомендациями МКРЕ, расчет индекса конформности осуществлялся по следующей формуле (1) [1]:

$$CI = \frac{V_{95\%}}{V_{PTV}} \quad (1)$$

где: $V_{95\%}$ — объем ткани, охваченный изодозой на уровне 95 % от предписанной дозы, V_{PTV} — объем планируемой мишени. При идеальном покрытии мишени высокими дозами значение CI стремится к единице ($CI = 1$), что указывает на полное совпадение изодозы с объемом PTV. Следует отметить, что одним из ограничений данного индекса является его неспособность отражать случаи недооблучения мишени, так как он не учитывает, насколько полноценно внутренняя часть PTV покрыта требуемой дозой. В связи с нечувствительностью CI к недооблучению объема мишени рекомендуется использование усовершенствованного показателя — индекса Паддика (PCI , Paddick Conformity Index). Этот индекс позволяет более точно оценить соответствие формы и объема высокодозной области планируемой мишени и рассчитывается по формуле (2) [1]:

$$PCI = \frac{(V_{PTV,95\%})^2}{V_{PTV} \times V_{95\%}} \quad (2)$$

где $V_{PTV,95\%}$ — объем мишени, охваченный 95 % изодозой, V_{PTV} — общий объем планируемой мишени, $V_{95\%}$ — объем ткани, получившей не менее 95 % от предписанной дозы. Значение PCI стремится к 1 при идеальном совпадении изодозы с контуром PTV, что делает его более информативным по сравнению с традиционным CI , особенно в случаях частичного покрытия мишени или избыточного облучения окружающих тканей.

Индекс гомогенности дозы HI представляет собой важный параметр, характеризующий равномерность распределения дозы в пределах объема мишени (PTV). Для его расчета предложено несколько методик, однако в рамках настоящей работы использована следующая формула [1]:

$$HI = \frac{D_{2\%} - D_{98\%}}{D_{50\%}} \quad (3)$$

где $D_{2\%}$ — доза, покрывающая 2 % объема PTV (близка к максимальной дозе), $D_{98\%}$ — доза, покрывающая 98 % объема PTV (близка к минимальной дозе), $D_{50\%}$ — доза, покрывающая 50 % объема PTV, используется для нормализации. В идеальном случае значение HI стремится к нулю ($HI = 0$), что указывает на полностью равномерное распределение дозы. В этом случае дифференциальная гистограмма доза-объем для PTV приобретает форму дельта-функции. На практике, однако, гистограмма доза-объема представляет собой узкий пик, сосредоточенный около средней дозы, и его форма приближается к распределению Гаусса. Это позволяет использовать стандартное отклонение как дополнительную характеристику распределения дозы

в объеме мишени. Согласно принятым критериям, допустимым считается значение индекса гомогенности не выше 0,12, что свидетельствует о приемлемом уровне равномерности дозового покрытия.

Расчет биологически эквивалентной дозы (BED)

Планирование облучения при гипофракционировании требует применения более точных и биологически обоснованных моделей дозового воздействия, поскольку увеличение дозы на фракцию приводит к непропорциональному росту риска радиационных повреждений нормальных тканей. Для этого используются алгоритмы, основанные на линейно-квадратичной (LQ) модели, которая учитывает радиобиологические особенности тканей и опухолей. Для оценки биологического эффекта применялись следующие расчётные формулы. Биологически эквивалентная доза (BED) рассчитывалась по формуле [2]:

$$BED = n \times d \times \left(1 + \frac{d \times \beta}{\alpha}\right), \quad (4)$$

где n — количество фракций, d — доза на одну фракцию (Гр), α/β — радиобиологический параметр, отражающий чувствительность ткани к фракционированию (типично 10 Гр для опухолей, 3 Гр для нормальных тканей). Формула биологической эквивалентной дозы при $RD = 2$ Гр — фракционирования (EQD_2) приведена ниже:

$$EQD_2 = \frac{BED}{1 + \frac{2\alpha}{\beta}} = n \times d \times \left(\frac{1 + \frac{d}{\alpha/\beta}}{1 + \frac{2}{\alpha/\beta}}\right). \quad (5)$$

Эти формулы позволяют сравнивать различные схемы облучения с точки зрения их биологической эффективности и потенциального риска побочных эффектов, а применение моделей BED и EQD_2 обеспечивает обоснованное сравнение традиционного и гипофракционированного режимов, а также помогает строго соблюдать допустимые дозовые ограничения для критических органов [2].

Критерии анализа дозиметрических параметров

Анализ дозиметрических данных проводился с учётом рекомендаций международных организаций, таких как RTOG (Radiation Therapy Oncology Group), EORTC (European Organisation for Research and Treatment of Cancer), QUANTEC (Quantitative Analyses of Normal Tissue Effects in the Clinic) и AEA (Atomic Energy Agency). Рекомендации обобщают клинический опыт и научные данные, формируя допустимые пределы облучения для различных органов. В дополнение следует отметить, что все используемые в работе протоколы основаны на протоколе Тиммермана (Timmerman, 2021) [3], который представляет собой современный консенсус

по вопросам безопасности и эффективности лучевой терапии.

Так, например, для спинного мозга, попадающего в зону облучения, максимальная доза должна быть $D_{\max} < 50$ Гр. При этом риск миелопатии составляет менее 0,2 %. Средняя доза на пищевод должна быть $D_{\text{mean}} < 34$ Гр; объем, охваченный дозой 35 Гр, должен быть $V_{35} < 50$ %, дозой 50 Гр — должен быть $V_{50} < 40$ %. Средняя доза на сердце должна составлять $D_{\text{mean}} < 26$ Гр, объем, охваченный дозой 30 Гр для снижения риска перикардита, должен быть $V_{30} < 46$ %, для снижения риска долгосрочной сердечной токсичности объем, охваченный дозой 25 Гр должен быть $V_{25} < 10$ %. Средняя доза на легкие для снижения риска пневмонита должна быть $D_{\text{mean}} < 20$ Гр, а объем, охваченный дозой 20 Гр, должен быть $V_{20} < 30$ %.

Клинически значимыми, как уже говорилось выше, считаются также индексы гомогенности *HI* и конформности *CI*. Особое внимание при интерпретации данных уделяется оценке риска побочных эффектов. Например, при облучении легких основными осложнениями являются лучевой пневмонит, поздними — фиброз легких [4], а при воздействии на сердце — ишемическая болезнь [5]. Для пищевода характерно возникновение эзофагита в качестве раннего лучевого повреждения, с последующим формированием стеноза, что значительно снижает качество жизни пациентов [6].

Результаты

Расчет эквивалентных доз

Сопоставлены две схемы облучения по EQD_2 (эквивалентной дозе при 2 Гр/фракцию) с использованием линейно-квадратичной модели. Для опухоли принято $\alpha/\beta = 10$ Гр (типично для быстро пролиферирующих тканей). Входные параметры и результаты расчета биологически эквивалентных доз для различных режимов фракционирования с использованием линейно-квадратичной модели приведены в табл. 1.

Таблица 1. Входные параметры и результаты расчета биологически эквивалентных доз для различных режимов фракционирования с использованием линейно-квадратичной модели

Table 1. Input parameters and calculation results of biologically equivalent doses for different fractionation modes using a linear-quadratic model

№ п/п	α/β Гр	Схема облучения	EQD_2 , Гр
Опухоль			
1	10	2 Гр × 30 фр	60,0
2	10	3 Гр × 18 фр	58,5
Нормальные ткани			
3	3	2 Гр × 30 фр	60
4	3	3 Гр × 18 фр	64,7

Проведенный расчёт биологически эквивалентной дозы по модели EQD_2 демонстрирует важные особенности режимов гипофракционирования при сравнении с традиционными схемами. При использовании режима 3 Гр × 18 фракций общая физическая доза составляет 54 Гр, что ниже, чем в стандартной схеме 2 Гр × 30 фракций = 60 Гр. Однако, с точки зрения радиобиологического эффекта, биологически эквивалентная доза на опухоль при $\alpha/\beta = 10$ снижается незначительно — с 60 Гр до 58,5 Гр. Это означает, что эффект облучения опухоли при гипофракционировании сохраняется практически на прежнем уровне.

В то же время для нормальных тканей (при $\alpha/\beta = 3$) наблюдается противоположная картина: EQD_2 возрастает с 60 Гр до 64,7 Гр. Это связано с тем, что нормальные ткани менее устойчивы к увеличению дозы на фракцию, что отражается в более высоком биологическом эквиваленте при одной и той же или даже меньшей суммарной дозе. Таким образом, режим гипофракционирования создаёт дополнительную нагрузку на критические органы, несмотря на снижение физической дозы. Эти результаты подчёркивают необходимость особенно тщательной оценки дозовых ограничений при переходе к режиму увеличения разовой дозы. Использование моделей *BED* и EQD_2 является обязательным компонентом планирования и позволяет радиотерапевту находить баланс между терапевтической эффективностью и безопасностью облучения.

Результаты оценок доз на критические органы

Анализ дозовых нагрузок на критические органы является ключевым этапом оценки безопасности и эффективности лучевой терапии. Были изучены дозовые показатели для спинного мозга, сердца, легких и пищевода в двух группах пациентов, получивших разовые дозы 2 Гр и 3 Гр.

Спинной мозг

Для группы с РД = 2 Гр среднее значение максимальной дозы на спинной мозг составило 37,5 Гр, для группы с РД = 3 Гр — 32,0 Гр (рис. 2а). Хотя ни в одном из случаев не был превышен критический порог в 45 Гр, значения доз в группе с РД = 2 Гр приближаются к допустимому пределу, что требует особого внимания при планировании облучения.

Сердце ($V_{50\text{Гр}}$)

Для группы с РД = 2 Гр средний объем сердца, получивший 50 Гр, составил 3,5 %, для группы с РД = 3 Гр этот объем составил 2,0 % (рис. 2б). Оба показателя находятся в пределах допустимой нормы (<10 %), однако группа с РД = 2 Гр демонстрирует более высокую нагрузку, что может быть значимо

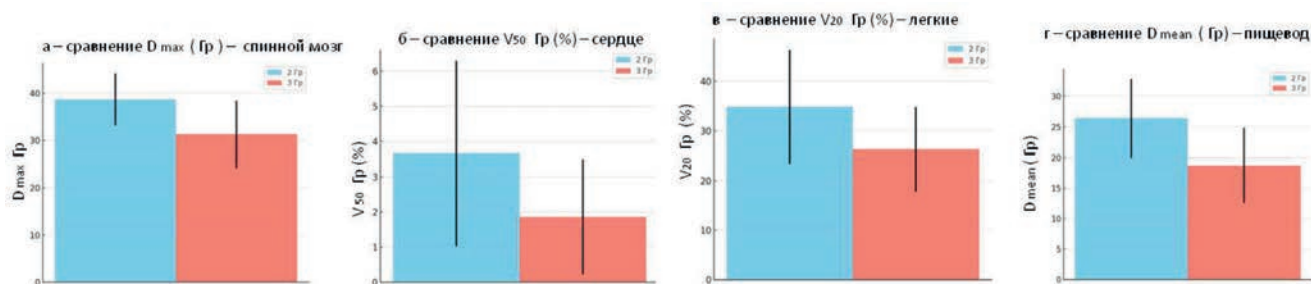


Рис. 2. Сравнение значений доз в критических структурах при переходе от 2 Гр к 3 Гр: а — D_{max} на спинной мозг у пациентов с разовыми дозами РД = 2 Гр и 3 Гр; б — V_{50} в сердце у пациентов с разовыми дозами 2 Гр и 3 Гр; в — V_{20} в легких у пациентов с разовыми дозами 2 Гр и 3 Гр; г — D_{mean} в пищеводе у пациентов с разовыми дозами 2 Гр и 3 Гр

Fig. 2. Comparison of dose values in critical structures during the transition from 2 Gy to 3 Gy: а — D_{max} on the spinal cord in patients with single doses of SD = 2 Gy and 3 Gy; б — V_{50} in the heart in patients with single doses of 2 Gy and 3 Gy; в — V_{20} in the lungs in patients with single doses of 2 Gy and 3 Gy; г — D_{mean} in the esophagus in patients with single doses of 2 Gy and 3 Gy

для пациентов с кардиологическими патологиями в анамнезе. Даже умеренные дозы облучения могут повышать риск отдаленных осложнений, таких как ишемическая болезнь сердца и различные формы аритмии.

Легкие (V_{20} Гр)

Для группа с РД = 2 Гр средний объем легких, получавших 20 Гр, составил 34, 0 % (рис. 2в). Для группы с РД = 3 Гр средний объем легких, получавших 20 Гр, составил 26,0 %. Повышенная нагрузка в группе с РД = 2 Гр (+8 %) увеличивает риск развития лучевых пневмонитов, особенно у пациентов с исходными нарушениями респираторной функции.

Пищевод (D_{mean})

Для группы с РД = 2 Гр средняя доза на пищевод составила 26,0 Гр. Для группы с РД = 3 Гр среднее значение дозы составило 19,0 Гр (рис. 2г). Более высокая доза в группе с 2 Гр (+7 Гр) может коррелировать с повышенным риском эзофагита и ухудшением качества жизни пациентов, особенно при наличии предшествующих заболеваний пищевода.

Таким образом, группа с РД = 2 Гр характеризуется более высокой дозовой нагрузкой на все органы риска по сравнению с группой РД = 3 Гр. Наибольшие различия наблюдаются для легких (V_{20} Гр) и пищевода (D_{mean}), что требует особого внимания при выборе режима облучения. Несмотря на отсутствие превышения критических доз, субпороговые значения в группе 2 Гр могут иметь клиническое значение, особенно у пациентов с сопутствующими патологиями. Для минимизации рисков рекомендуется индивидуализировать планирование терапии, учитывать исходное состояние органов риска, проводить регулярный мониторинг пациентов на всех этапах лечения. Таким образом,

полученные данные подчеркивают важность тщательного дозиметрического планирования и персонализированного подхода к лучевой терапии для снижения риска осложнений.

Результаты оценок индексов гомогенности и конформности

Для количественной оценки качества планирования лучевой терапии использовались индексы гомогенности HI и конформности Паддика PCI , которые отражают равномерность распределения дозы внутри опухоли и степень соответствия распределения формы изодоз целевому объему соответственно.

Индекс гомогенности HI

В группе пациентов с разовой дозой РД = 2 Гр среднее значение HI составило $0,11 \pm 0,16$, что свидетельствует о более равномерном распределении дозы внутри планируемого объема РТВ. В группе с дозой РД = 3 Гр данный показатель оказался выше и составил $0,13 \pm 0,04$, указывая на более выраженные дозовые градиенты (рис. 3, 4). Поскольку меньшее значение HI предпочтительнее, это говорит в пользу группы РД = 2 Гр, где равномерное распределение дозы снижает риск как передозировки, так и недооблучения, повышая вероятность полного контроля опухоли и снижая риск рецидивов.

Индекс конформности PCI

Среднее значение PCI в группе РД = 2 Гр составило $0,86 \pm 0,04$, что выше, чем в группе с РД = 3 Гр, где оно достигло $0,83 \pm 0,04$ (рис. 5, 6). Более высокое значение PCI свидетельствует о том, что изодозные линии в планах этой группы пациентов плотнее охватывают опухоль, что особенно важно при необходимости защиты окружающих критических

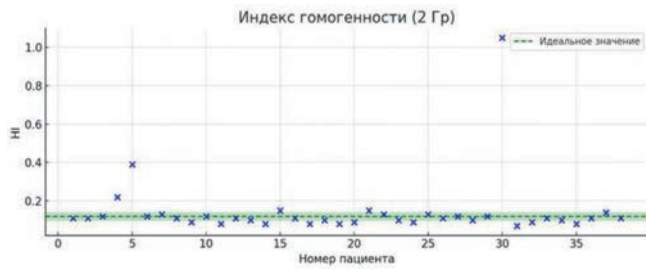
Рис. 3. Индекс гомогенности для фракционирования
РД = 2 Гр

Fig. 3. Homogeneity index for fractionation SD = 2 Gy

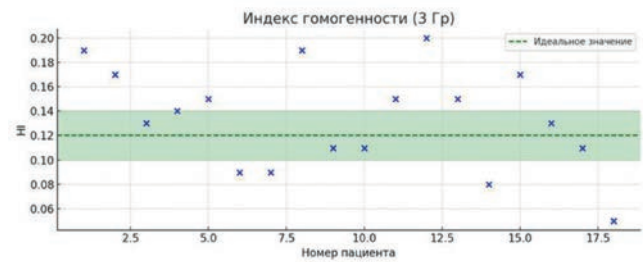
Рис. 4. Индекс гомогенности для фракционирования
РД = 3 Гр

Fig. 4. Homogeneity index for fractionation SD = 3 Gy

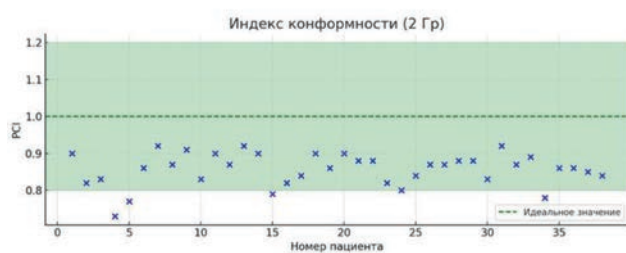
Рис. 5. Индекс конформности для фракционирования
РД = 2 Гр

Fig. 5. The conformity index for fractionation SD = 2 Gy

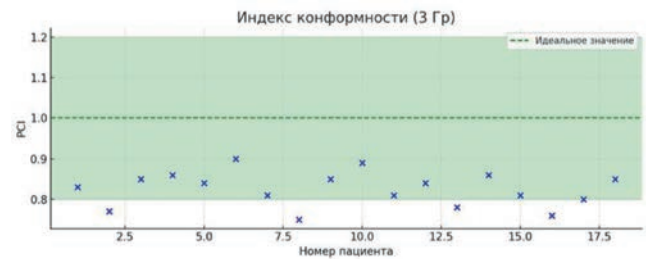
Рис. 6. Индекс конформности для фракционирования
РД = 3 Гр

Fig. 6. Conformity index for RD fractionation = 3 Gy

структур. Хорошая конформность позволяет максимально ограничить дозовую нагрузку на здоровые ткани при сохранении эффективного облучения опухоли.

Таким образом, планы лучевой терапии, выполненные для группы пациентов с РД = 2 Гр, демонстрируют как более высокую гомогенность дозового распределения, так и лучшую конформность. Это особенно критично при облучении опухолей, расположенных вблизи жизненно важных органов, где требуется высокая точность и безопасность лечения.

Выводы

1. Группа с РД = 2 Гр характеризуется более высокой дозой в целевом объеме, а также улучшенными параметрами качества планирования (*HI* и *CI*), что подтверждает высокую точность стандартного режима облучения.

2. Дозовые нагрузки на критические органы в группе с РД = 2 Гр (спинной мозг, сердце, легкие, пищевод) несколько выше, чем в группе с РД = 3 Гр, тем не менее, остаются в пределах допустимых значений. Однако при наличии сопутствующих заболеваний необходим индивидуальный подход и динамическое наблюдение.

3. Группа с РД = 3 Гр демонстрирует более щадящий профиль дозовой нагрузки на органы риска, что делает данный режим предпочтительным для пациентов с ограниченным соматическим резервом, особенно при кардиопульмонологических патологиях. Помимо этого, режим РД = 3 Гр применяется в рамках гипофракционирования, что позволяет сократить общую продолжительность терапии и повысить удобство как для пациента, так и для лечебного учреждения. Такой подход особенно актуален в условиях ограниченного времени, прогрессирующего заболевания или при необходимости быстрой реализации лечебного плана.

4. Выбор режима терапии должен учитывать анатомическую локализацию опухоли, потенциальные риски и общее состояние пациента. Интеграция качественных параметров планирования с клиническими характеристиками пациента позволяет достичь оптимального терапевтического результата и выбрать наилучший режим фракционирования в каждом конкретном случае.

Заключение

Результаты проведенного исследования подчеркивают важность сбалансированного подхода при планировании лучевой терапии. Использование более интенсивного режима для группы с

РД = 2 Гр обеспечивает лучшую точность дозового распределения и более высокий контроль над опухолевым процессом, но сопряжено с потенциальным увеличением нагрузки на критические органы. Режим с меньшей дозовой нагрузкой на критические структуры с РД = 3 Гр обеспечивает более щадящее воздействие на здоровые ткани, что делает его оптимальным для пациентов с высокой степенью коморбидности. В будущем целесообразно проведение дополнительных исследований с включением анализа клинических исходов и токсичности для дальнейшей оптимизации режимов лечения.

Учитывая постоянно совершенствующиеся технологии в области лучевой терапии, становится возможным всё более точно подбирать лечебные планы, соответствующие как биологическим характеристикам опухоли, так и индивидуальным особенностям пациента. Это открывает перспективы для реализации принципов персонализированной онкологии в повседневной клинической практике.

Список литературы / References

1. Лыкова ЕН, Уразова КА. Планирование лучевой терапии пучками тормозных фотонов. М. МГУ. 2019; 108.
Lykova EN, Urazova KA. Introduction to planning of radiation therapy with bremsstrahlung photons. M. MSU. 2019; 108. (In Russ.).
2. Павлов АС, Карякина НФ, Костромина КН и др. Линейно-квадратичная модель в расчетах изоэффективных доз, в оценке противоопухолевого эффекта и лучевых реакций и осложнений при лучевой терапии злокачественных опухолей. М, 2005; 67.
Pavlov AS, Karyakina NF, Kostromina KN, et al. Linear-quadratic model in calculations of isoeffective doses, in the assessment of the antitumor effect and radiation reactions and complications in radiation therapy of malignant tumors. M, 2005; 67. (In Russ.).
3. Timmerman RD. Stereotactic Radiosurgery and Stereotactic Body Radiation Therapy. 2021; 450.
<https://doi.org/10.3389/fonc.2013.00077>
4. <https://medscannet.ru/onco/luchevaya-terapiya/pri-rake-legkih> (Интернет)
5. <https://internist.ru/publications/detail/serdechno-sosudisty-posledstviya-luchevoy-terapii> (Интернет).
6. <https://www.mskcc.org/ru/cancer-care/patient-education/radiation-therapy-abdomen> (Интернет).

Вклад авторов

Л.А. Романов: подбор клинической базы данных в системе планирования, анализ гистограмм доза-объем, построение графиков, коррекция текста статьи

Ю.А. Кудашкина: идея, подбор клинической базы данных, анализ и обработка полученного материала, коррекция текста статьи

И.М. Лебеденко: идея, анализ, компоновка текста рукописи, оформление

Ю.И. Барт: идея, подбор и ведение больных, коррекция текста статьи

М.В. Черных: идея, коррекция текста статьи

И.А. Гладилина: коррекция текста статьи

Authors' contributions

Leonid A. Romanov: selection of a clinical database in the planning system, analysis of dose-volume histograms, plotting graphs, correction of the article text

Yulia A. Kudashkina: idea, selection of a clinical database, analysis and processing of the obtained material, correction of the article text

Irina M. Lebedenko: idea, analysis, layout of the manuscript text, design

Yulia I. Bart: idea, selection and management of patients, correction of the article text

Marina V. Chernikh: idea, correction of the article text

Irina A. Gladilina: correction of the article text.

Information about the authors

Irina M. Lebedenko, <https://orcid.org/0000-0003-0634-7841>

Marina V. Chernikh, <https://orcid.org/0000-0003-4944-4035>

Irina A. Gladilina, <https://orcid.org/0000-0002-2481-0791>

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ (Договор №02.а03.21.0005)
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Соответствие принципам этики. Одобрение этического комитета не требовалось.
Информированное согласие. Пациенты подписали информированное согласие на публикацию данных.

Тип статьи: Оригинальная статья.

Поступила: 01.09.2025.

Принята к публикации: 13.10.2025.

Опубликована online: 26.12.2025.

Financing. The work was carried out with the support of the Program for Enhancement of Competitiveness of NRNU MEPhI (Agreement No. 02.a03.21.0005)
Conflict of interests. Not declared.

Ethical compliance. Ethical committee approval was not necessary.

Informed consent. The patients signed informed consent for the publication of the data.

Article type: Original article.

Received: 01.09.2025.

Accepted for publication: 13.10.2025.

Published online: 26.12.2025.