

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОДВЕДЕНИЯ ДОЗЫ К ОПУХОЛИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ РЕЖИМАХ СТЕРЕОТАКСИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ РАКА ЛЕГКОГО

П.Н. Кечина², Ю.А. Кудашкина¹, И.М. Лебеденко^{1,2}, Ю.И. Барт¹, М.В. Черных¹

¹ НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава России, Москва

² Национальный ядерный университет МИФИ, Москва

QUALITY CONTROL OF DOSE DELIVERY TO THE TUMOR IN VARIOUS REGIMES OF STEREOTACTIC IRRADIATION OF LUNG CANCER

P.N. Kechina², Yu.A. Kudashkina¹, I.M. Lebedenko^{1,2}, Yu.I. Bart¹, M.V. Chernykh¹

¹ N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russia

² National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

Реферат

Цель: Оценить качество планирования облучения больных раком легкого при различных режимах стереотаксического облучения на клинических ускорителях.

Материалы и методы: Проведена оценка качества планирования облучения 39 больных раком легкого на линейном ускорителе Clinac iX с 2023 по 2024 гг. при различных режимах стереотаксического облучения. Пациенты разделены на 3 группы по количеству новообразований в легких: 28 пациентов с одним метастазом, 9 пациентов с двумя метастазами и 2 пациента с тремя. Все планы облучения пациентов выполнены с использованием технологии 3D-CRT.

Результаты: Оценены индексы гомогенности и конформности. Индекс гомогенности принимает наилучшее среднее значение для наименьшей РД=7,5 Гр и равно НІ=0,15±0,04 и ухудшается с увеличением РД=20 Гр до НІ=0,18±0,11. Среднее значение индекса конформности близко к 1 для всех рассматриваемых случаев. Среднее значение индекса Паддика, в свою очередь, наиболее близко к идеальному значению для больших объемов мишени (>40 см³). Проведена оценка дозовой нагрузки на критические органы с использованием гистограмм доза-объем при трех режимах облучения с разовой дозой 7,5, 12 и 20 Гр. Для 92 % случаев дозовые нагрузки на пищевод и сердце при СРЛТ оказываются значительно меньше максимально допустимых. Дозы составляют на пищевод 5,2±4,8 Гр для трех фракций, 4,4±5,3 Гр – для 5; 8,7±8,6 Гр для 8 фракций; на сердце – 14,3±6,7 Гр для трех, 8,7±8,8 Гр для 5 и 7,9±8,8 Гр для 8 фракций. Полученные результаты позволяют положительно оценить существующий протокол отделения для всех режимов облучения.

Заключение: Количественные показатели качества планов свидетельствуют о том, что все режимы облучения с разовой дозой 7,5, 12 и 20 Гр являются приемлемыми для проведения стереотаксического облучения метастаз в легкие.

Ключевые слова: рак легкого, стереотаксическая лучевая терапия, качество планирования, доза в критических структурах

Abstract

Purpose: To evaluate the quality of radiation planning for lung cancer patients using a linear electron accelerator under various stereotactic irradiation regimens.

Materials and methods: The quality of radiation planning was assessed for 39 patients with lung cancer using the Clinac iX linear accelerator from 2023 to 2024 using different stereotactic irradiation modes. The patients were divided into 3 groups based on the number of malignant neoplasms in the lungs: 28 patients with one metastasis, 9 patients with two metastases, and 2 patients with three. All patient plans were made using 3D-CRT technology.

Results: Homogeneity and conformity indices were assessed. The homogeneity index has the best average value for the lowest SD=7.5 Gy and is equal to HI=0.15±0.04 and worsens with increasing SD=20 Gy to HI=0.18±0.11. The average value of the conformity index is close to 1 for all cases considered. The average value of the Paddick index, in turn, is closest to the ideal value for large target volumes (>40 cm³). A quantitative assessment of the dose load on critical organs was made using dose-volume histograms. Dose loads on the esophagus and heart during SRS for 92 % of cases are significantly less than the maximum permissible and amount to 5.2±4.8 Gy for 3 fractions on the esophagus, 4.4±5.3 Gy for 5 fractions, 8.7±8.6 Gy for 8 fractions and 14.3±6.7 Gy for 3 fractions; on the heart – 8.7±8.8 Gy for 5 fractions and 7.9±8.8 Gy for 8 fractions, which allows us to positively evaluate the existing SRS department protocol for all irradiation modes.

Conclusion: Quantitative indicators of the quality of plans indicate that all irradiation regimens with a single dose of 7.5, 12 and 20 Gy are acceptable for stereotactic irradiation of lung metastases.

Key words: lung cancer, stereotactic radiotherapy, planning quality, dose in critical structures

E-mail: imlebedenko@mail.ru

<https://doi.org/10.52775/1810-200X-2025-108-4-24-34>

Введение

Рак легкого представляет собой серьезную проблему здравоохранения и вызывает значительное число случаев смерти во всем мире. Расчетные данные Глобальной обсерватории по онкологическим заболеваниям за 2020 г., выпущенные Международным агентством по изучению рака (МАИР), свидетельствуют о том, что рак легкого остается ведущей причиной смерти от онкологических заболеваний и в 2020 г. стал причиной смерти 1,8 млн. человек (18 %) [1]. Частота метастазирования злокачественных опухолей в легкие варьирует от 1,6 до 55,4 % в зависимости от локализации и гистологической структуры первичной опухоли [2]. Причиной частого поражения легочной ткани при злокачественных новообразованиях различной локализации является хорошо развитая сеть кровеносных и лимфатических сосудов в ткани легкого [3].

Лучевая терапия является одним из основных методов борьбы не только с опухолью, но и с метастазами в легких. Одним из направлений лучевой терапии является стереотаксическая лучевая терапия – метод, основанный на облучении новообразований высокими кратковременными дозами излучения. Этот метод позволяет быстро и максимально точно излечить небольшие опухоли и метастазы даже возле жизненно важных органов [4]. Наиболее

часто СРЛТ используют при неоперабельном раке легкого. Диаметр опухоли не должен превышать 5 см, а критически важные органы должны быть расположены на достаточном расстоянии от опухоли, чтобы не превысить пределы их дозовой толерантности, которые гораздо меньше пределов, принятых для классического фракционирования [5]. Стереотаксическое облучение проводится в различных режимах. Режим гипофракционирования подразумевает разовую дозу в 3 Гр, суммарную дозу в 60 Гр и 5 фракций облучения в неделю. Гибридный режим сочетает в себе гипофракционирование и гиперфракционирование. Пациент получает 2 фракции ежедневно (1 Гр + 1,5 Гр с интервалом 5–6 часов) до суммарной дозы 60–70 Гр. Режимы умеренного гипофракционирования более эффективны. Одним из таких режимов является стереотаксическая радиальная лучевая терапия (СРЛТ). Основная особенность этой технологии дистанционной лучевой терапии заключается в высоких разовых дозах (8–20 Гр) и малых числах фракций (обычно 1–5). Особенности СРЛТ – высокоточное облучение мишени, быстрое падение дозы за пределами мишени, использование большого числа полей.

Цель: оценить качество планирования облучения больных раком легкого на клиническом ускорителе электронов при различных режимах стереотаксического облучения.

Провести анализ полученных данных на их соответствие клиническому внутреннему протоколу МК-3475-867, разработанному в отделении радиотерапии НМИЦ онкологии им. Н.Н.Блохина, с целью его обязательного внедрения в отделениях радиотерапии онкологических диспансеров России.

Материал и методы

Рак легкого – термин, обозначающий группу опухолей различного морфологического строения, происходящих из эпителия бронхов, включая главный бронх, бронхиальных желез или эпителия альвеол [5] (рис. 1). Рак легкого развивается из слизистой оболочки бронхов, бронхиальных слизистых желез бронхиол и легочных альвеол.

Основные понятия и определения

Для анализа плана лечения введены такие величины, как индекс гомогенности (HI) и индекс конформности (CI). Индекс гомогенности дозы (HI) характеризует однородность распределения дозы в пределах объема мишени. Для оценки равномерности распределения дозы использован индекс гомогенности, определяемый по формуле [6]:

$$HI = (D_{2\%} - D_{98\%}) / D_{50\%}, \quad (1)$$

где $D_{2\%}$ – это доза, которую получает 2 % объема опухоли. $D_{98\%}$ – это доза, которую получает 98 % опухоли. $D_{50\%}$ – медианная доза, которую получает 50 % объема опухоли. $D_{50\%}$ используется для нормировки. В идеальном случае, при $HI=0$, дозовое распределение полностью однородное, а дифференциальная гистограмма доза–объем ГДО для PTV имеет форму дельта-функции.

На практике ГДО представляет собой узко распределенный пик вокруг среднего значения дозы, который можно сравнить с гауссовым распределением. Следовательно, доза, доставленная в объем мишени, может оцениваться по стандартному отклонению. Таким образом, в относительном выражении индекс гомогенности должен быть $HI \leq 0,12$.

Индекс конформности (CI) характеризует степень совпадения области высокой дозы с объемом мишени PTV. Согласно рекомендациям МКРЕ индекс конформности рассчитывается следующим образом:

$$CI = V_{95\%} / V_{ptv}, \quad (2)$$

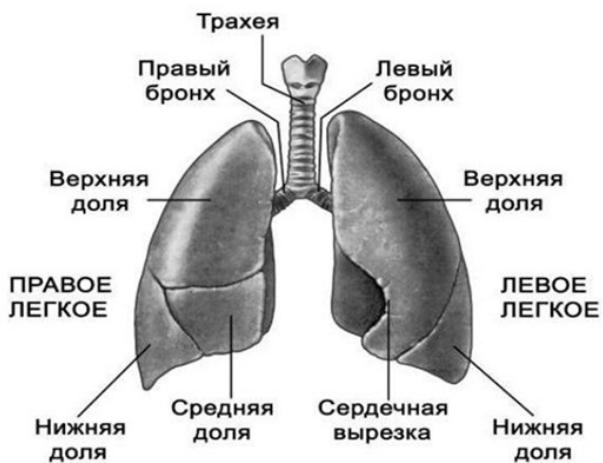


Рис. 1. Анатомическое строение легких

где $V_{95\%}$ – объем, охваченный 95 % изодозой, V_{ptv} – объем мишени. При полном покрытии $CI=1$ [6]. Одним из недостатков индекса конформности является то, что он не учитывает ситуации недооблучения мишени. Ввиду этого, возможно использование улучшенного индекса конформности, который был предложен автором работы [7]. Он носит название индекс Паддика (PCI) и вычисляется по формуле:

$$PCI = (TV_{ptv} / PIV) \times (TV_{ptv} / TV), \quad (3)$$

где PIV (Planning Irradiated Volume) – это объем тканей, получающих предписанную дозу. TV_{ptv} – это объем опухоли, охватываемый предписанной изодозой. Переоблучение здоровых тканей учитывается первым множителем, а недооблучение мишени – вторым. Значение обоих множителей не должно быть меньше 0,9, а сам индекс PCI должен находиться в пределах от 0,85 до 1. Таким образом, индекс Паддика является более точной оценкой конформности распределения дозы. Наиболее часто используемые при планировании облучения понятия: D_{max} – максимальная доза – клинически значимая доза, определяемая в некотором объеме, размеры которого меньше 15 мм. Рекомендуется определять и внутри, и снаружи планируемого объема PTV. D_{min} – минимальная доза в определенном объеме. Средняя доза – доза, рассчитываемая усреднением по большому количеству дискретных точек, находящихся внутри PTV. Горячее пятно – объем, не превышающий по диаметру 15 мм, получающий дозу больше 100 % от дозы, предписанной для PTV. Модальная (дифференциальная) доза –

это доза, наиболее часто встречающаяся в расчетных точках в зоне интереса. Именно она показывает дозу, накопленную в органе в процессе лучевой терапии.

Ускорители и система планирования

Облучение больных раком легкого осуществлялось на линейном ускорителе конвентионального типа Clinac iX (Varian), создающим поля облучения неправильной формы с использованием многолепесткового коллиматора (МЛК), что позволяло минимизировать облучение окружающих здоровых тканей. Данная модель ускорителя, не являясь специализированной для стереотаксического облучения, тем не менее, применяется для этих задач за счет соответствия высоким требованиям геометрических и дозиметрических настроек и наличия рентгеновской трубы, с помощью которой можно проконтролировать положение пациента на столе до начала стереотаксического облучения. Для контроля дыхания во время облучения пациентов раком легкого на ускорителе Varian в режиме реального времени применялась система Real-Time Position Manager (RPM), которая учитывает смещение опухоли во время процедуры лечения и обеспечивает более точное подведение дозы (так называемый гейт). На грудь пациента наносился светоотражающий маркер, движение которого отслеживалось с помощью видеокамеры. В процессе предлучевой подготовки определялась ширина и положение гейта. Когда камера фиксировала положение маркера в заданном гейте, пучок включался, при выходе из гейта – выключался.

Подготовка облучения осуществлялась на системе планирования СП Eclipse, позволяющей создавать планы лечения для облучения фотонами и электронами для разных линейных ускорителей, импортировать планы лечения из других систем, и имеющей возможность подключаться к некоторым системам визуализации. СП Eclipse также включает функционал для сравнения различных рассчитанных планов лучевой терапии. Это позволяет проводить анализ нескольких вариантов лечения и выбирать оптимальный подход на основе заранее заданных критериев – таких, как характер дозового распределения, ожидаемые побочные эффекты и индивидуальные особенности пациента. СП включает следующие возможности: Acuros External Beam – усовершенствованный алгоритм расчета дозы, который учитывает сложные геометрические формы и неоднород-

ности тканей; Rapid Plan – инновационный инструмент, который использует данные о дозе и анатомической структуре пациента из существующих планов для оценки дозового распределения в новых планах; MCO (Multi-Criteria Optimization) – метод оптимизации планов лучевой терапии по множественным критериям, который позволяет учитывать различные аспекты лечения одновременно, включая эффективность воздействия на опухоль и защиту здоровых тканей; Smart Segmentation – опция автоматической сегментации изображений, которая упрощает процесс оконтурирования органов и опухолей, снижая время на подготовку планов лечения и повышая их точность.

Описание клинической группы и технологии облучения

Проанализированы данные 39 больных раком легкого, проходивших лечение на ускорителе Clinac iXc 2023 по 2024 гг. в отделении радиотерапии НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина. Проведена оценка качества планирования облучения больных на линейном ускорителе при различных режимах стереотаксического облучения. Пациенты разделены на 3 группы по количеству новообразований в легких: 28 пациентов с одним метастазом, 9 пациентов с двумя метастазами и 2 пациента с тремя (табл. 1, рис. 2). Для пациентов с несколькими метастазами оценивались как планы лечения для каждого новообразования, так и суммарный план. Все планы пациентов выполнены с использованием технологии 3D-CRT. При такой технологии формируемое поле облучения максимально приближено к форме опухоли, что позволяет увеличить дозу облучения в объеме опухоли и уменьшить дозовую нагрузку на критические органы и окружающие здоровые ткани. Распределение флюенса внутри пучка при этой методике облучения является однородным, следовательно, все пучки направляются в изоцентр аппарата, который совмещается с изоцентром мишени. В связи с гетерогенностью тканей и органов пациентов, а также нерегулярным контуром, доза в объеме мишени получается неоднородной. Таким образом, предельная доза выбирается так, чтобы не превысить максимальную допустимую дозу в «горячем пятне». Также важным критерием является процент объема мишени, покрываемый предписанной дозой [8]. Планирование трехмерной конформной лучевой терапии характеризуется ограниченным числом степеней сво-

Таблица 1

Число пациентов в зависимости от числа метастазов

Количество метастазов	Число пациентов
1	28 (72 %)
2	9 (23 %)
3	2 (5 %)

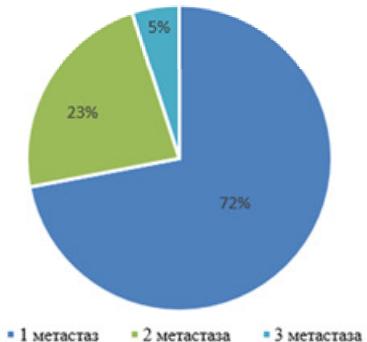


Рис. 2. Число пациентов в зависимости от числа метастазов

Таблица 2

Число планов лечения в зависимости от разовой дозы

Разовая доза	Число планов лечения
7,5	12 (23 %)
12	37 (71 %)
20	3 (6 %)

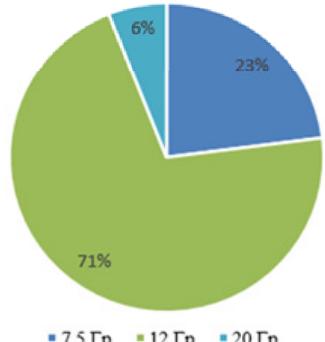


Рис. 3. Число планов лечения в зависимости от разовой дозы

боды. Физики могут выбирать одну из двух энергий пучков фотонов, глубину области накопления дозы, ширину полутени, оптимальное количество и направления пучков, а также их веса, что соответствует времени облучения из каждого направления. Технические возможности 3D-CRT оказываются недостаточными для мишени сложной формы – таких, как опухоли с изогнутыми контурами и внутренними пустотами. Для таких случаев применяется технология облучения с модуляцией интенсивности пучка IMRT.

Соотношение мужчин и женщин с метастазами в легких составляло примерно 1:1 (20 женщин и 19 мужчин). Первоначальным заболеванием у трети пациентов является рак прямой кишки. Курсовая доза для 38 пациентов составляла 60 Гр и для одного – 37,5 Гр. Отличительная особенность СРЛТ заключается в высоких разовых дозах и малых числах фракций. В рассматриваемой клинической группе разовые дозы принимали значения 7,5; 12 и 20 Гр (табл. 2, рис. 3).

Результаты

Проанализированы данные 39 больных раком легкого. На первом этапе осуществлялся расчет индексов гомогенности, конформности для очагов со средними размерами от 4 до

15 см. Также был рассчитан индекс Паддика, который учитывал как переоблучение здоровых тканей, так и недооблучение мишени. Учитывалась дозовая нагрузка на прилежащие критические органы.

Проведен анализ данных на соответствие клиническому протоколу МК-3475-867. Это связано с необходимостью стандартизации процедур подготовки и проведения лучевой терапии для онкологических больных, что позволяет избежать ошибок при проведении процедур и повысить качество лечения онкологических больных. В протокол входят три расчетных параметра:

- ✓ Отношение предписанного объема изодозы к объему PTV ($V_{100\%}/V_{ptv}$).
- ✓ Отношение 50 % объема изодозы к объему PTV ($V_{50\%}/V_{ptv}$).
- ✓ Максимальная доза на расстоянии 2 см от PTV в любом направлении, выраженная в процентах от предписанной дозы, которая в системе планирования Eclipse носит название Ring. Эта область является вспомогательной структурой, создаваемой вокруг мишени для контроля градиента дозы на границе между опухолью и здоровыми тканями. В табл. 3 представлены допустимые и приемлемые значения перечисленных параметров в зависимости от объема PTV.

Объемы PTV варьировались от 3,8 см³ до 147,1 см³. Средний объем составил 20,4 см³ со

Таблица 3

Допустимые и приемлемые значения параметров в зависимости от объема PTV.
Клинический протокол МК-3475-867

Отношение предписанного объема изодозы к объему PTV		Отношение 50 % объема изодозы к объему PTV		Максимальная доза на расстоянии 2 см от PTV в любом направлении, выраженная в процентах от предписанной дозы		Объем PTV, см ³
Допустимое	Приемлемое	Допустимое	Приемлемое	Допустимое	Приемлемое	
<1,2	<1,5	<5,9	<7,5	<50,0	<57,0	1,8
<1,2	<1,5	<5,5	<6,5	<50,0	<57,0	3,8
<1,2	<1,5	<5,1	<6,0	<50,0	<58,0	7,4
<1,2	<1,5	<4,7	<5,8	<50,0	<58,0	13,2
<1,2	<1,5	<4,5	<5,5	<54,0	<63,0	22,0
<1,2	<1,5	<4,3	<5,3	<58,0	<68,0	34,0
<1,2	<1,5	<4,0	<5,0	<62,0	<77,0	50,0
<1,2	<1,5	<3,5	<4,8	<68,0	<88,0	70,0
<1,2	<1,5	<3,3	<4,4	<70,0	<89,0	95,0
<1,2	<1,5	<3,1	<4,0	<73,0	<91,0	126,0
<1,2	<1,5	<2,9	<3,7	<77,0	<94,0	163,0

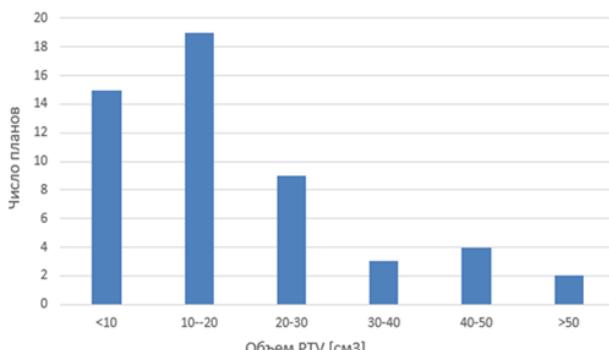


Рис. 4. Распределение объемов

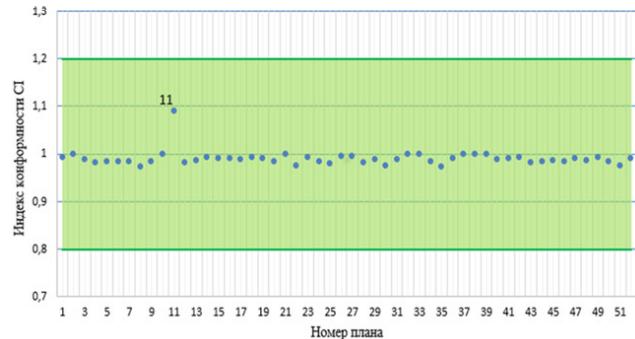


Рис. 5. Значения индекса CI для PTV

стандартным отклонением от среднего 22,3 см³. На рис. 4 представлено распределение объемов PTV по количеству планов. По горизонтальной оси отмечены интервалы различных объемов PTV, по вертикальной – количество планов лечения. На рис. 5, 6 представлены индексы конформности CI и гомогенности HI для PTV. Коридор допустимых значений для HI (рис. 6) взят от 0,1 до 0,14. Это связано с тем, что по данным литературы [6, 9–11] значение индекса гомогенности для малых очагов при стереотаксическом облучении, как правило, превышает диапазон допустимых значений HI≤0,12, что связано, скорее всего, с возможностями алгоритмов и техническими возможностями систем планирования.

По полученным данным индексов конформности и гомогенности для PTV можно сказать, что все значения индексов CI находятся в

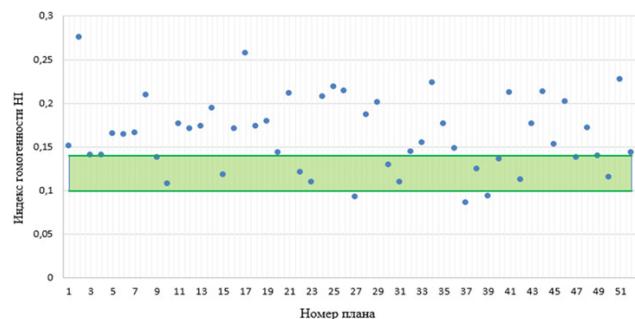


Рис. 6. Значения индекса HI для PTV

допустимых пределах и максимально приближены к 1, то есть к эталонному значению. Индекс в точке 11 сильнее отклоняется от значения CI=1, чем остальные, так как это пациент с двумя близко расположенными метастазами, и сказывается некоторое наложение дозовых распределений. Также некоторые исследовате-

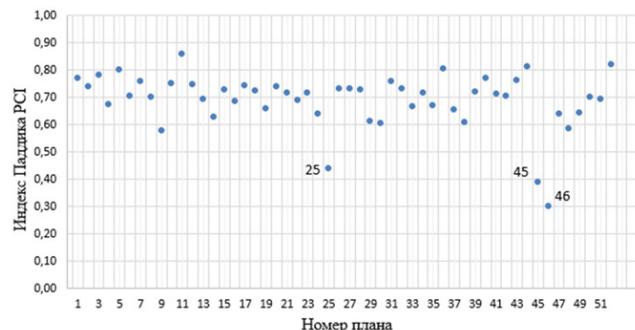


Рис. 7. Значения индекса PCI для PTV

ли отмечают [9, 10], что при сравнении планов с высокой гетерогенностью с планами с гомогенной дозой, индекс конформности CI для планируемого объема лечения увеличивается, что указывает на улучшение соответствия дозы и целевого объема. Как видно из рис. 6, индекс гомогенности не попадает в интервал от 0,1 до 0,14 в 38 случаях (планов) из 52, что составляет 73 %. Это связано с тем, что при планировании облучения малых очагов поражения, расположенных в зоне с ярко выраженной разностью массовых плотностей тканей (метастаз имеет плотность $\rho \approx 1 \text{ г}/\text{см}^3$, а плотность легкого $\rho \approx 0,3 \text{ г}/\text{см}^3$), возможности существующих алгоритмов расчета дозового распределения на границе раздела двух сред ограничены, и погрешность расчета достаточно велика и составляет от $\approx 4\%$ до 7% . Таким образом, при облучении легкого у 39 пациентов среднее значение индекса гомогенности для PTV составило $HI=0,16 \pm 0,04$, а значение индекса конформности – $CI=0,99 \pm 0,03$. Полученные значения сопоставимы с литературными данными [10, 11].

Также была осуществлена оценка индекса Паддика, который является улучшенным индексом конформности и учитывает недооблучение мишени. Допустимые значения индекса Паддика должны находиться в интервале от 0,85 до 1, при этом каждый из множителей не должен быть меньше 0,9. В данной работе рассчитанное среднее значение индекса Паддика составило $PCI=0,69 \pm 0,09$. На рис. 7 представлен индекс Паддика для PTV.

Среднее значение множителя, отвечающего за недооблучение мишени (TV_{PIV}/TV), равно $0,98 \pm 0,06$, что говорит о полном покрытии мишени и эффективности лечения. Переоблучение здоровых тканей, в свою очередь, оказалось равным (TV_{PIV}/PIV) $= 0,70 \pm 0,08$. Дан-

ное значение считается приемлемым, так как чаще всего невозможно избежать переоблучения здоровых тканей при полном покрытии мишени. Таким образом, среднее значение индекса PCI ниже идеального, но считается допустимым из-за полного покрытия мишени и умеренного переоблучения здоровых тканей. Для методики расчета 3D-CRT полученные данные согласуются с литературными сведениями [11, 12]. На рис. 7 видно, что точки 25, 45 и 46 значительно отклоняются от среднего значения. Это пациенты с двумя метастазами, поэтому под определенными углами облучения доза с одной мишени попадает на другую и наоборот. Таким образом, облучение здоровых тканей увеличивается.

При детальном рассмотрении и перепроверке выяснилось, что для планов с двумя близко расположеннымными метастазами, находящимися в одной плоскости, нет возможности оценивать по отдельности два плана. Это связано с тем, что доза с различных направлений одного плана для первого метастаза частично попадает на второй, и план для второго метастаза создается с целью дооблучения. Для рассмотрения таких случаев и расчета индексов создавались суммарные планы, которые учитывают дозу, охватывающую оба метастаза. Такие сложности возникали не со всеми пациентами, для остальных оценка планов проводилась по отдельности. Например, пациент с номером плана 25 (рис. 8) имеет два метастаза, близко расположенных во фронтальной плоскости (расстояние между метастазами 4,67 см). В планах 45, 46 метастазы находятся на одних сагittalных и горизонтальных плоскостях (расстояние между метастазами 7,15 см и 6,52 см). Такое близкое расположение новообразований неизбежно приводит к наложению доз.

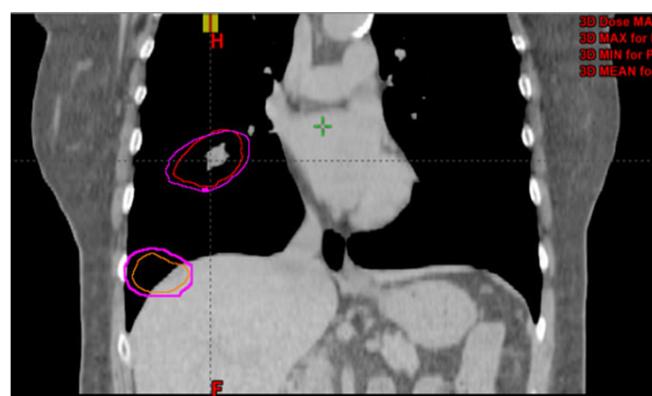


Рис. 8. Расположение двух метастазов в одной плоскости у пациента с номером плана 25

Таблица 4

Индексы гомогенности, конформности и Паддика для различных объемов PTV

PTV, см ³	<10	10–20	20–30	30–40	40–50	>50
HI	0,15±0,05	0,17±0,05	0,18±0,04	0,17±0,02	0,12±0,04	0,16±0,04
CI	0,99±0,03	0,99±0,05	0,986±0,010	0,987±0,010	0,991±0,004	0,986±0,011
PCI	0,65±0,10	0,71±0,09	0,67±0,16	0,712±0,114	0,78±0,05	0,76±0,03

Таблица 5

Индексы гомогенности, конформности и Паддика в зависимости от разовой дозы

Разовая доза, Гр	7,5	12	20
HI	0,15±0,04	0,17±0,04	0,18±0,11
CI	0,99±0,03	0,98±0,03	0,993±0,010
PCI	0,72±0,08	0,68±0,12	0,75±0,04

Таблица 6

Индексы гомогенности, конформности и Паддика в зависимости от количества метастазов

Количество метастаз	1	2	3
HI	0,17±0,05	0,17±0,04	0,14±0,06
CI	0,988±0,010	0,98±0,05	0,997±0,010
PCI	0,73±0,05	0,64±0,16	0,68±0,06

Также была произведена оценка индексов гомогенности, конформности и Паддика в зависимости от объема PTV, разовой дозы и количества метастаз. В табл. 4–6 представлены средние значения данных индексов в зависимости от различных объемов PTV, разовой дозы и количества метастазов.

Анализируя полученные данные для индексов конформности, гомогенности и Паддика, можно отметить, что среднее значение индекса конформности близко к 1 для всех рассматриваемых случаев. Среднее значение индекса Паддика, в свою очередь, наиболее близко к идеальному значению для больших объемов мишени (>40 см³). Это связано с тем, что большие мишени легче покрыть предписанной дозой. Чем больше объем опухоли, тем лучше распределение дозы и, соответственно, конформность облучения. При увеличении числа метастазов индекс Паддика ухудшается из-за усложнения дозового распределения и невозможности идеально подогнать изодозу под все мишени.

Индекс гомогенности принимает наилучшее значение для наименьшей разовой дозы (7,5 Гр) HI=0,15±0,04 и ухудшается с ее увеличением HI=0,18±0,11. Это объясняется тем, что при доставке высоких доз возникает более вы-

сокий градиент, т.е. резкое падение дозы за пределами мишени, что может сказываться на количественном значении HI. Также можно отметить, что среднее значение индекса гомогенности ближе всего к эталонному значению для больших объемов мишени (40–50 см³). В больших мишених неоднородности компенсируются за счет большего числа вокселов и перекрытия пучков широкими полями облучения. В малых мишених HI ухудшается за счет больших градиентов, необходимых для уменьшения дозы на близлежащие здоровые ткани.

Дозовая нагрузка на критические органы оценивалась с помощью гистограмм доза-объем. Оценка проводилась по дозовым ограничениям на здоровые ткани и органы при СРЛТ, разработанным доктором Тиммерманом и его коллегами [13]. Максимальная доза, приходящаяся на определенный объем критического органа, не должна превышать табличного значения и отличается для разного количества фракций. В табл. 7 представлены максимально допустимые дозовые нагрузки, приходящиеся на критические органы в зависимости от количества фракций. В табл. 8 представлены рассчитанные средние дозовые нагрузки на критические органы в зависимости от числа фракций для рассматриваемой группы пациентов.

Таблица 7

Дозовые ограничения на критические органы [13]

Орган	Сердце <15 см ³			Пищевод <5 см ³			Спинной мозг <0,35 см ³		
Число фракций	3	5	8	3	5	8	3	5	8
Макс. доза, Гр	24	32	34,4	27,9	32,5	36,8	15,9	22	26,4

Таблица 8

Средние дозовые нагрузки на критические органы

Орган	Сердце [$<15 \text{ см}^3$]			Пищевод [$<5 \text{ см}^3$]			Спинной мозг [$<0,35 \text{ см}^3$]		
Число фракций	3	5	8	3	5	8	3	5	8
Макс. доза, Гр	14,3 \pm 6,7	8,7 \pm 8,8	7,9 \pm 8,8	5,2 \pm 4,8	4,4 \pm 5,3	8,7 \pm 8,6	11,0 \pm 6,2	11,3 \pm 7,6	16,0 \pm 8,4

Таблица 9

Соответствие планов протоколу МК-3475-867

Процент от нормы	Число пациентов (в процентах)		
	Отношение предписанного объема изодозы к объему PTV	Отношение 50 % объема изодозы к объему PTV	Максимальная доза на расстоянии 2 см от PTV в любом направлении, выраженная в процентах от предписанной дозы
90–100 %	100 %	38 %	73 %
80–89 %	0 %	21 %	15 %
70–79 %	0 %	19 %	10 %
<70 %	0 %	21 %	2 %

При сопоставлении средних значений дозовой нагрузки на критические органы с табличными значениями ограничений (табл. 7, 8) можно сказать, что все параметры дозовой нагрузки для всех режимов стереотаксического облучения для всех органов находятся в допусках в соответствии протоколами лечения. Дозовые нагрузки на пищевод и сердце оказываются значительно меньше максимально допустимых, что позволяет положительно оценить существующий протокол СРЛТ для всех режимов облучения, тем самым снизить количество осложнений в критических органах.

Для каждого пациента были собраны данные, необходимые для оценки качества реализуемого плана лечения по клиническому протоколу МК-3475-867. В табл. 9 представлено, какое число пациентов (в процентах) попадает в нужный интервал для каждого параметра, а какое – не попадает, и как сильно они отклоняются от нормы. Из таблицы видно, что большая часть реализуемых планов соответствует норме для двух параметров: отношения предписанного объема изодозы к объему PTV и максимальной дозы на расстоянии 2 см от PTV. Параметр отношения 50 % объема изодозы к объему PTV в 61 % случаев отклоняется от нормы. Данное отклонение может быть объяснено тем, что легкие имеют низкую массовую плотность ($0,2\text{--}0,3 \text{ г}/\text{см}^3$) по сравнению с плотностью метастазов, которая близка к плотности мышечной ткани ($1 \text{ г}/\text{см}^3$). Это приводит к меньшему ослаблению пучка и, соответственно,

но, более широкому рассеянию дозы за пределами PTV.

Также невозможно полностью избавиться от движения опухоли в процессе дыхания. Даже при использовании методики гейтинг остаточные дыхательные движения во время облучения создают эффект дозового размывания, ухудшая градиент дозы и повышая отношение $V_{50\%}/V_{ptv}$.

По результатам исследования можно сделать вывод, что СРЛТ является перспективным методом лечения рака легкого. Его эффективность определяется объемом опухоли, ее расположением, режимами дозирования и фракционирования ионизирующего излучения. Высокая конформность дозового распределения говорит о точном облучении опухоли с минимальным воздействием на окружающие здоровые ткани. Помимо этого, отсутствие инвазивного вмешательства и короткий курс лечения делают СРЛТ эффективным, безопасным и технологически выгодным методом лечения рака легкого.

Выводы

- Проведена количественная оценка качества планирования стереотаксического облучения метастазов в легкие группы из 39 пациентов. Оценены индексы гомогенности и конформности. Индекс гомогенности принимает наилучшее среднее значение для

- наименьшей РД=7,5 Гр – НІ=0,15±0,04 и ухудшается с увеличением РД=20 Гр до НІ=0,18±0,11. Среднее значение индекса конформности близко к 1 для всех рассматриваемых случаев. Среднее значение индекса Паддика, в свою очередь, наиболее близко к идеальному значению для больших объемов мишени (>40 см 3).
- Произведена количественная оценка величины дозовой нагрузки на критические органы с использованием гистограмм доза-объем. Дозовые нагрузки на пищевод и сердце при СРЛТ для 92 % случаев оказываются значительно меньше максимально допустимых. Для различного количества фракций нагрузки составляют: на пищевод $5,2\pm4,8$ Гр для трех, $4,4\pm5,3$ Гр для 5 фракций, $8,7\pm8,6$ Гр для 8 фракций; на сердце – $14,3\pm6,7$ Гр для 3 фракций, $8,7\pm8,8$ Гр для 5 и $7,9\pm8,8$ Гр для 8 фракций.
 - Количественные показатели качества планов свидетельствуют о том, что все режимы облучения с разовой дозой 7,5, 12 и 20 Гр являются приемлемыми для проведения стереотаксического облучения метастазов в легкие.
 - Полученные значения доз на критические органы позволяют положительно оценить существующий протокол отделения СРЛТ для всех режимов облучения, позволяющий тем самым снизить количество осложнений в критических органах.

Список литературы

- Рак легкого. Всемирная организация здравоохранения URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/lung-cancer>. Lung Cancer. World Health Organization URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/lung-cancer> (In Russ).
- Усманов ББ. Современные тенденции в диагностике и лечении метастатического поражения легких и плевры. Российский онкологический журнал. 2015; 6: 46-50. Usmanov BB. Modern trends in diagnostics and treatment of metastatic lesions of the lungs and pleura. Russian journal of oncology. 2015; 6: 46-50 (In Russ).
- Метастазы в легкие. “Красота и медицина” URL: <https://www.krasotaimedicina.ru/diseases/oncologic/lung-metastases>.
- Metastases to the lungs. “Beauty and Medicine” URL: <https://www.krasotaimedicina.ru/diseases/oncologic/lung-metastases> (In Russ).
- Стереотаксическая лучевая терапия. Институт ядерной медицины URL: https://inuclear.ru/therapy/lushevaya_terapiya/stereotaksicheskaya. Stereotactic radiotherapy. Institute of Nuclear Medicine URL: https://inuclear.ru/therapy/lushevaya_terapiya/stereotaksicheskaya (In Russ).
- Каприн АД, Мардымский ЮС. Терапевтическая радиология. 2019; 704. Kaprin AD, Mardinsky YS. Therapeutic radiology. 2019; 704 (InRuss).
- Лебеденко ИМ, Усманова ЛШ, Межеумова АА. Количественная оценка планов дистанционного облучения больных раком тела матки. Онкологический журнал. 2022;2: 9-17. Lebedenko IM, Usmanova LS, Mezheumova AA. Quantitative assessment of plans for remote irradiation of patients with uterine cancer. Oncological journal. 2022; 2: 9-17 (In Russ). <https://doi.org/10.37174/2587-7593-2022-5-2-9-17>.
- IAN Paddick MSC. A simple scoring ratio to index the conformity of radiosurgical treatment plans. J. Neurosurg (Suppl 3). 2000; 93: 219-22. <https://doi.org/10.3171/jns.2000.93.supplement>.
- Климанов ВА. Дозиметрическое планирование лучевой терапии. Ч. 3. Лучевая терапия пучками с модулированной интенсивностью. Оптимизация облучения. Учебное пособие. М. МИФИ. 2008;176. Klimanov VA. Dosimetric planning of radiation therapy. Part 3. Radiation therapy with intensity-modulated beams. Optimization of irradiation. Textbook. Moscow: MEPhI. 2008; 176 (In Russ).
- Zhigong W, Xingchen P, Yan W, Lianlian Y, et al. Influence of target dose heterogeneity on dose sparing of normal tissue in peripheral lung tumor stereotactic body radiation therapy. Radiation Oncology. 2021; 16. <https://doi.org/10.1186/s13014-021-01891-6>.
- Yaparpalvi R, Garg MK, Shen J, et al. Evaluating which plan quality metrics are appropriate for use in lung SBRT. Br J Radiol. 2018; 91. <https://doi.org/10.1259/bjr.20170393>.
- Fatemeh A, Somayeh T, David P. A retrospective study to establish recommendations for plan

- quality metrics in Lung SBRT. Medical Dosimetry. 2022; 47: 111-6. <https://doi.org/10.1016/j.meddos.2021.10.001>. Epub 2021 Dec 29.
12. Lauzin Y, Henni A, Thureau S, et al. VMAT vs. 3 DCRT : quantitative dosimetric study for the lung cancer. *Physica Medica*. 2018; 56: 49-50. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2018.09.103>.
13. Timmerman R. A story of hypofractionation and the table of the wall. *Radiation oncology, biology, physics*. 2021; 1: 4-21. <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2021.09.027>Review.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 26.09.2025. Принята к публикации: 15.12.2025.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received: 26.09.2025. Accepted for publication: 15.12.2025.