

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ПЛАНИРОВАНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ РАКА ПИЩЕВОДА НА УСКОРИТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОНОВ CLINAC iX И HALCYON

И.М. Лебеденко^{1,2}, Ю.А. Кудашкина^{1,2}, И.А. Гладилина^{1,3}, М.В. Черных¹

¹ Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава России; Россия, 115478, Москва, Каширское шоссе, 24.

² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ; Россия, 115409, Москва, Каширское шоссе, 31.

³ Российский национальный исследовательский медицинский университет им. Н.И. Пирогова Минздрава России; Россия, 117997, Москва, ул. Островитянова, 1.

Контакты: Лебеденко Ирина Матвеевна, imlebedenko@mail.ru

Реферат

Цель: Сопоставить качество планирования облучения больных раком пищевода на ускорителях электронов Clinac iX (Varian) с внешним гантри и тоннельного типа Halcyon (Varian) с встроенным гантри, сопоставить количественные показатели планов облучения для алгоритмов систем планирования (СП) различных версий.

Материал и методы: Проведена лучевая терапия 90 пациентам раком пищевода. Сопоставлены количественные характеристики планов облучения 35 пациентов раком только средней трети пищевода. Для этого использованы индексы гомогенности и конформности дозы в пределах мишени, гистограммы доза—объем и дозовые нагрузки на критические органы для технологий 3D CRT, IMRT, RapidArc. Сравнение проведено для двух моделей ускорителей Clinac iX (Varian) и Halcyon (Varian). Сопоставлены результаты расчетов планов облучения с использованием различных версий и алгоритмов расчета СП.

Результаты: Сопоставление количественных характеристик планов облучения позволило обозначить технологию IMRT как предпочтительную при лечении рака пищевода на ускорителях обоих типов, с внешним и с встроенным гантри. При этом влияние алгоритмов расчета и версий СП на показатели индексов гомогенности, конформности и дозовые нагрузки на критические органы не выражено, а результаты расчетов сопоставимы в пределах погрешности.

Ключевые слова: лучевая терапия, рак пищевода, линейные ускорители электронов, планирование облучения, количественная оценка

Для цитирования: Лебеденко И.М., Кудашкина Ю.А., Гладилина И.А., Черных М.В. Сравнительные оценки качества планирования облучения рака пищевода на ускорителях электронов Clinac iX и Halcyon. Онкологический журнал: лучевая диагностика, лучевая терапия. 2023;6(4):77-86.

DOI: 10.37174/2587-7593-2023-6-4-77-86

Введение

Одним из факторов, существенно влияющих на результат лучевой терапии (ЛТ) онкологических больных, является выбор терапевтической установки. Современные ускорители могут отличаться конструктивно, располагать различными наборами качества пучков тормозного излучения, скоростными режимами реализации одних и тех же технологий облучения. Кроме того, ускорители одного и того же производителя могут отличаться версиями систем планирования (СП). Совокупность указанных факторов при планировании и реализации планов облучения влияет на характер дозового распределения в мишени и в критических органах.

Общие сведения о раке пищевода

Рак пищевода (РП) представляет собой серьезную глобальную проблему здравоохранения. В 2020 г. в мире было зарегистрировано 604 тыс. новых случаев РП и более 544 тыс. случаев смерти от этого заболевания [1]. В Российской Федерации в 2021 г. впервые было диагностировано 7779 новых случаев РП. Среднегодовой темп прироста составил 7,92 %, а кумулятивный риск развития этого заболевания — 0,38 % [2, 3]. Заболеваемость РП демонстрирует широкие географические различия с 60-кратной разницей между регионами с высокой и низкой заболеваемостью [4]. Район с самой высокой заболеваемостью, называемый «поясом рака

пищевода», простирается от северного Ирана через Среднюю Азию до Северного Китая. Другие страны с высокой заболеваемостью РП включают Южную и Восточную Африку и Северную Францию [5]. В Российской Федерации максимальная заболеваемость наблюдается в Якутии, Туве (до 10 на 100 тыс. в год), а наиболее низкие — на Северном Кавказе (4 на 100 тыс. в год) [2, 3].

Плоскоклеточный РП является наиболее распространенным гистологическим типом в Восточной Европе, Азии и России, а аденокарцинома пищевода доминирует в Северной Америке и Западной Европе. Плоскоклеточный рак и аденокарцинома пищевода различаются по своей этиологии, патологии, локализации опухоли, терапии и прогнозу. В отличие от аденокарциномы, плоскоклеточный РП чаще диагностируется в шейном и грудном отделах пищевода, аденокарцинома — в абдоминальном отделе пищевода и пищеводно-желудочном переходе. Плоскоклеточный РП имеет склонность к раннему лимфогенному метастазированию и связан с неблагоприятным прогнозом заболевания [6].

Различают следующие анатомические отделы пищевода. Шейный отдел распространяется от глотки до яремной вырезки грудины — 15–20 см от резцов; верхне-грудной отдел — от яремной вырезки грудины до нижнего края дуги непарной вены — границы 20–25 см от резцов; средне-грудной отдел — от нижнего края дуги непарной вены до нижнего края нижней легочной вены — границы 25–30 см от резцов; нижне-грудной отдел — от нижнего края нижней легочной вены до пищеводного отверстия диафрагмы — границы 35–40 см от резцов и абдо-

минальный отдел — от пищеводного отверстия диафрагмы до пищеводно-желудочного перехода — границы 40–45 см от резцов (рис. 1) [7, 8]. Эндоскопические границы являются условными и могут варьировать в зависимости от конституциональных особенностей пациента. Локализация опухоли устанавливается относительно эпицентра роста опухоли, однако при планировании лечения учитывается верхняя и нижняя границы опухоли. Опухоли чаще локализуются в средне-грудном отделе пищевода и составляют 60 % от всех злокачественных новообразований пищевода. Лучевая терапия (ЛТ) — один из важнейших компонентов в комплексном лечении рака пищевода. ЛТ рака пищевода осложнена близостью к нему критических органов, что требует тщательного их оконтуривания, а также педантичной перепроверки гистограмм доза—объем (ГДО) на предмет соответствия ограничениям с целью минимизации возможных осложнений [9, 10].

Материал и методы

Оконтуривание мишени

В табл. 1 приведены стандарты оконтуривания облучаемых объемов GTV, CTV, PTV [10, 11] на этапе подготовки больных к расчету дозового распределения. Определяемый объем мишени (GTV) включает первичную опухоль с вовлеченными л/у и регистрируется по данным компьютерной томографии (КТ), позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) и магнитно-резонансной томографии (МРТ).

Клинический объем мишени (CTV) определяет макроскопический объем опухоли и некоторую микроскопическую область в 3–5 см выше и ниже зоны поражения и 0,5–1 см по окружности пищевода. На вовлеченные л/у добавляется 0,5–1,0 см. Объем CTV, заходящий на нормальные структуры, может быть уменьшен вручную в соответствии с анатомическими границами критических органов, но не менее, чем на 0,5 см. И, наоборот, объем CTV может быть увеличен, если есть данные, подтверждающие местную распространенность процесса. Позвонки включаются в облучаемый объем CTV в случае их поражения. При условии облучения планируемого объема PTV под контролем визуализации к CTV добавляется 0,5 см, при отсутствии 1–1,5 см. Предписания дозы в мишени и ограничения дозы на критических органах включает следующие позиции [10, 12, 13]:

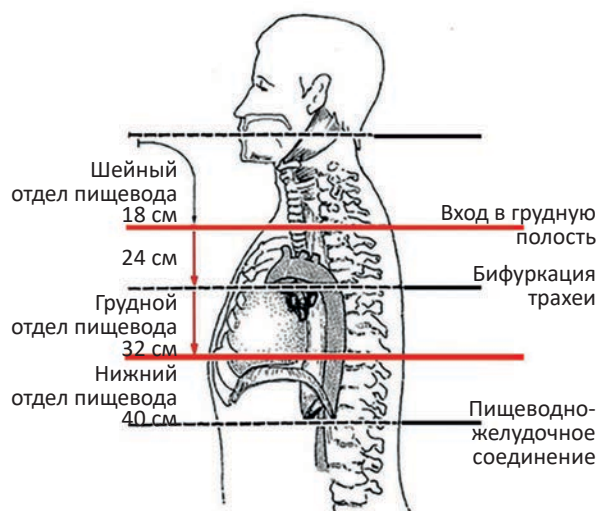


Рис. 1. Строение и отделы пищевода

Fig. 1. Structure and divisions of the esophagus

Таблица 1

Стандарты оконтуривания облучаемых объемов GTV, CTV, PTV [10, 11]**Irradiated volume contouring standards GTV, CTV, PTV [10, 11]**

Объем	Описание объемов
GTV	Включает первичную опухоль, определяемую по данным КТ, ПЭТ и УЗ-эндоскопии, и вовлеченные лимфоузлы
CTV	Включает первичную опухоль плюс 3–5 см в продольном направлении (выше и ниже) и по 0,5–1 см по окружности; на вовлеченные лимфоузлы — по 0,5–1 см во всех направлениях. CTV, заходящий на нормальные структуры, может быть уменьшен вручную в соответствии с анатомическими границами критических органов (но не менее 0,5 см) и, наоборот, увеличен, если есть данные, подтверждающие местную распространенность процесса. Из CTV исключаются тела позвонков. Включаются, только если имеется вовлечение их в процесс
PTV	Включает при условии ежедневной IGRT зону 0,5 см к CTV, без IGRT включает зону 1–1,5 см

Таблица 2

Наиболее часто используемые режимы фракционирования дозы при раке пищевода**The most commonly used dose fractionation regimens for esophageal cancer**

Отдел пищевода	Радикальное лечение
Верхний отдел пищевода (выше карины)	СД = 50,4 Гр (при опухолях шейного отдела пищевода — до 60–66 Гр) при РД = 2 Гр
Дистальный отдел пищевода (ниже карины)	СД = 50,4 Гр при РД = 2 Гр

- объем PTV должен быть покрыт минимум 95 % изодозой;
- максимальная доза на спинной мозг должна быть менее 45 Гр;
- доза, приходящаяся на 20 % от общего объема почек, не должна превышать 33 % от общей дозы ($V_{20} < 33 \%$);
- средняя доза на оба легких должна быть менее 20 Гр. Доза, приходящаяся на 20 % от общего объема легких, не должна превышать 30 % от общей дозы ($V_{20} \leq 30 \%$);
- доза, приходящаяся на 30 % от общего объема сердца, не должна превышать 45 % от общей дозы ($V_{30} \leq 45 \%$). Средняя доза должна быть менее 26 Гр. Доза, приходящаяся на 25 % от общего объема сердца, не должна превышать 10 % от общей дозы ($V_{25} \leq 10 \%$);
- средняя доза на пищевод на всем протяжении должна быть менее 34 Гр;
- доза, приходящаяся на 70 % от общего объема пищевода, должна быть менее 20 % от общей дозы ($V_{70} < 20 \%$);
- доза, приходящаяся на 50 % от общего объема пищевода, должна быть менее 40 % от общей дозы ($V_{50} < 40 \%$).

Наиболее часто используемые режимы фракционирования при облучении пищевода приведены в табл. 2.

Характеристики ускорителей и СП

Планы облучения больных подготовлены на СП Eclipse версий 8.6 и 16.2 и реализованы на ускорителях Clinac iX и Halcyon. Облучение осуществлялось с номинальной энергией фотонного излучения 6 МэВ на ускорителе Halcyon (технологии IMRT и Rapid Arc) и 6 и 18 МэВ на ускорителе Clinac iX (IMRT, 3D CRT и Rapid Arc). Технологии, реализуемые на ускорителях, приведены в табл. 3. Общим для версий СП Eclipse 8.6 и 16.2 является использование модуля «умной» сегментации и возможность загрузки изображений и восстановления 3D модели из 2D снимков. В версии 16.2 расширен расчет фиксированных мониторинговых единиц, что позволяет вводить предопределенные значения мониторинговых единиц для каждого поля. Возможность утверждения структур во избежание их случайного изменения, после того как они были оконтурены и подтверждены, увеличивает точность планирования.

Таблица 3

Технологии ЛТ, применяемые на ускорителях Clinac iX и Halcyon**Technologies used on Clinac iX and Halcyon accelerators**

Ускоритель	Реализуемые технологии ЛТ
Halcyon (Varian)	RapidArc, IMRT, IGRT
Clinac iX (Varian)	IMRT, RapidArc, 3D-CRT, IGRT

Алгоритмы расчета дозы AAA (Anisotropic Analytical Algorithm), и Acuros XB являются отдельно лицензированными функциями в СП Eclipse. Модель источника фотонов, используемая в алгоритмах, настраивается в конфигурации пучка излучения. Это позволяет более точно рассчитывать дозу облучения для каждого пациента. Во время планирования облучения в СП Eclipse разрешение сетки расчета дозы может быть выбрано в диапазоне от 1 до 5 мм для AAA и от 1 до 3 мм для Acuros. Это также позволяет повысить точность расчет дозы и улучшить результаты лечения пациентов. Для обоих алгоритмов при планировании дистанционного облучения полностью поддерживается использование средств формирования пучка, таких, как блоки, физические клинья, динамические клинья, компенсаторы, лучевая терапия с модуляцией интенсивности (IMRT) с динамическим многолепестковым коллиматором (МЛК). Кроме того, алгоритмы при расчете дозы учитывают устройства фиксации пациента, болюсы. AAA и Acuros обрабатывают все пиксели вне тела, в том числе в контурных структурах, как воздух, за исключением болюсов и устройств фиксации пациента. В алгоритмах AAA и Acuros в СП Eclipse для расчета дозы можно настроить следующие параметры: расчетную сетку, коррекцию неоднородности, нормализацию поля и угловое разрешение при расчетах по технологии RapidArc. Однако такой режим, как автоматическое определение материала высокой плотности, доступен только для алгоритма Acuros и не работает в AAA [14–18].

Характеристика клинического материала

В отделении радиотерапии проведено лечение 90 больным местнораспространенным неоперабельным раком пищевода. Медиана возраста составила 65 лет. Возрастной диапазон —

Таблица 4

Распределение пациентов по локализации опухоли и ускорителям Halcyon и Clinac iX**Distribution of patients by tumor location and accelerators Halcyon and Clinac iX**

Ускори- тель	Отделы			Всего
	Шейный	Верхне- и средне- грудной	Нижне- и средне- грудной	
Clinac iX	6	50	11	67
Halcyon	12	21	3	36

от 51 до 89 лет. Среди больных преобладали мужчины. Соотношение мужчин и женщин составило 3:2. У всех пациентов диагностирован плоскоклеточный рак различной степени дифференцировки. Общее состояние больных оценивалось по шкале ECOG и соответствовало 1–2 баллам. Больным проводилась лучевая терапия на линейных ускорителях электронов. Больные были распределены на 2 группы. Первая группа состояла из 67 пациентов и проходила лечение на традиционных ускорителях с внешним гантри с 2018 по 2022 гг. Вторая группа включала 23 пациента, которые проходили лечение на ускорителях туннельного типа с 2022 по 2023 гг. В табл. 4 сведены данные о локализации опухоли и распределении пациентов на ускорителях. Сопоставлены количественные характеристики планов облучения 35 пациентов раком только средней трети пищевода.

Лучевая терапия выполнялась в классическом режиме фракционирования РД 2 Гр, СД 50,4 Гр, 5 раз в неделю. При локализации опухоли в шейном отделе пищевода СД увеличивали до 60–66 Гр. Одновременно с лучевой терапией проводили еженедельную химиотерапию. Применяли следующие режимы химиотерапии: паклитаксел 50 мг/м² + карбоплатин АUC2, паклитаксел 50 мг/м² + цисплатин 25 мг/м², паклитаксел 50 мг/м² + карбоплатин АUC5.

Расчет индексов гомогенности и конформности

Расчет индексов гомогенности и конформности осуществлялся по гистограммам доза—объем. С целью сопоставления различных количественных характеристик для анализируемой группы рассчитано более 100 планов облучения. Индекс гомогенности *HI* — понятие, характеризующее равномерность распределения дозы внутри объема V_{Π} . Согласно докладу МКРЕ 83 [11] для ЛТ с модуляцией интенсивности (IMRT),

3D конформной ЛТ (3D CRT) и ЛТ с модуляцией интенсивности в ротационном режиме (Rapid Arc на ускорителях компании Varian), величина HI определяется следующим образом:

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

Доза вблизи минимума $D_{\text{near-min}}$ или $D_{98\%}$ представляет собой дозу, близкую к минимальной, которую получает 98 % объема мишени. Доза вблизи максимума $D_{\text{near-max}}$ или $D_{2\%}$ по определению есть доза, близкая к максимальной, которую получает 2 % объема мишени. Медианная доза $D_{50\%}$ определяется как доза, которую получает 50 % объема мишени. Величина $D_{50\%}$ вводится как нормировочная. Если $HI = 0$, то распределение дозы в объеме полностью однородно. Индекс конформности CI показывает степень, в которой область высокой дозы совпадает с объемом мишени $V_{\text{П}}$. В соответствии с рекомендациями доклада МКРЕ 83, CI определяется как:

$$CI = \frac{V_{95\%}}{V_{\text{П}}}, \quad (2)$$

где $V_{95\%}$ — объем, покрытый 95 % изодозой. В идеальной ситуации, когда объем облучения полностью совпадает с объемом мишени, $CI = 1$ [11]. В работе также использовано понятие дифференциальной дозы. Дифференциальная или модальная доза D_{dif} — это доза, значение которой наиболее часто встречается в данном объеме критического органа.

Результаты

Сопоставление количественных показателей планов облучения больных на ускорителе Clinac iX по технологиям IMRT и 3DCRT

В исследуемую группу были отобраны 20 пациентов с опухолями средней трети пищево-

да, которые проходили лечение по технологии IMRT и 12 пациентов, леченных по технологии 3D CRT, только на ускорителе Clinac iX. Для обеих групп оценены индексы HI и CI . Выборку сведений о пациентах объединяет одинаковое расположение опухоли и средний облучаемый объем до 500 см³. На рис. 2, 3 представлены графики рассчитанных по гистограммам доза-объем индексов гомогенности и конформности, отражающих равномерность распределения дозы и дозовое покрытие опухоли для CTV, при двух технологиях облучения. Оценены дозовые нагрузки на прилегающие критические органы. Значения индекса HI для технологий 3D-CRT и IMRT для обеих групп 20 и 12 пациентов укладывается в толерантные значения $HI \leq 0,12$. Значения индекса CI для CTV для 3DCRT и IMRT для тех же групп пациентов максимально приближены к 1, то есть к идеальному значению.

Таким образом, для планов облучения средней трети пищевода у 20 пациентов, проходивших лечение на ускорителе Clinac iX по технологии IMRT, среднее значение индекса гомогенности для CTV составило $HI = 0,12 \pm 0,04$, значение индекса конформности составило $CI = 0,94 \pm 0,03$. Среднее значение индекса HI для планов облучения средней трети пищевода у 12 пациентов по технологии 3D-CRT составило $HI = 0,13 \pm 0,03$, значение индекса конформности составило $CI = 0,95 \pm 0,02$. Из представленных графиков видно, что все значения индексов близки к идеальным.

Для оценки дозовой нагрузки на органы риска группы больных по гистограммам доза-объем рассчитывались значения модальной, то есть, наиболее часто встречающейся, дозы D_{dif} , близкой к максимальной $D_{2\%}$, и среднего значения дозы D_{mean} (табл. 5). При анализе

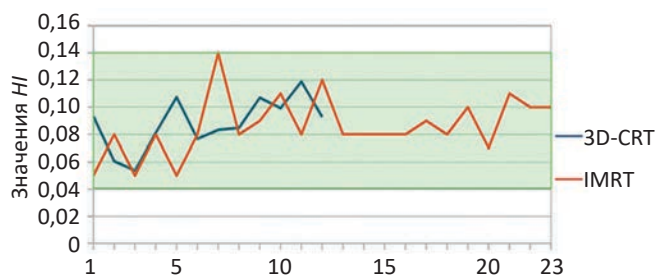


Рис. 2. Значения индекса HI для CTV при технологиях облучения 3D-CRT, IMRT. Версия 8.6

Fig. 2. HI index values for CTV for irradiation technologies 3D-CRT, IMRT. V 8.6

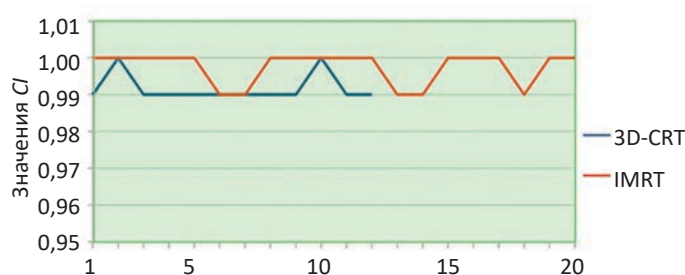


Рис. 3. Значения индекса CI для CTV при технологиях облучения 3D-CRT, IMRT. Версия 8.6

Fig. 3. CI index values for CTV for 3D-CRT, IMRT irradiation technologies. V 8.6

Таблица 5

Рассчитанные средние значения доз D_{dif} , $D_2\%$ и D_{mean} для критических органов и средние квадратические отклонения для группы (20+12) пациентов

Calculated mean doses D_{dif} , $D_2\%$ and D_{mean} for critical organs and standard deviations for a group (20+12) of patients

Технологии	Сердце			Спинной мозг			Легкие		
Дозы	D_{dif} , Гр	$D_2\%$, Гр	D_{mean} , Гр	D_{dif} , Гр	$D_2\%$, Гр	D_{mean} , Гр	D_{dif} , Гр	$D_2\%$, Гр	D_{mean} , Гр
IMRT	6,19 ± 6,06	42,97 ± 6,71	13,14 ± 4,36	0,49 ± 0,95	29,14 ± 7,26	9,79 ± 4,56	6,11 ± 6,12	36,58 ± 4,47	12,95 ± 2,44
3DCRT	9,36 ± 12,23	45,66 ± 2,26	17,39 ± 5,56	7,69 ± 17,45	38,41 ± 7,79	19,83 ± 10,27	1,59 ± 0,93	43,12 ± 3,69	13,62 ± 2,25

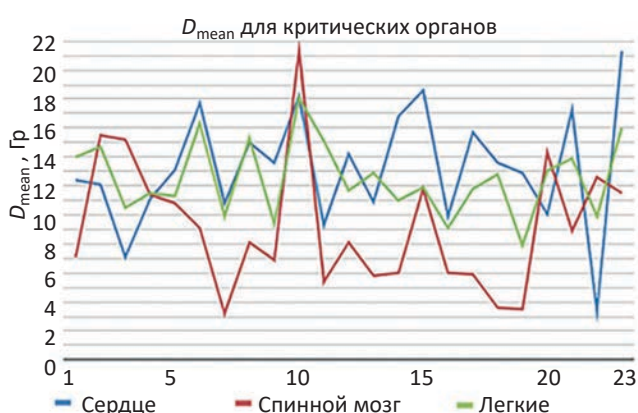


Рис. 4. Значения средней дозы на органы риска

Fig. 4. Values of the average dose to organs at risk

планов и сопоставлении значений дозовой нагрузки на критические органы для обеих технологий облучения показано соответствие доз допускам и протоколам лечения. Тем не менее, средние значения доз D_{mean} и максимальные $D_2\%$ существенно меньше для технологии IMRT, которой мы и будем отдавать предпочтение в дальнейшем.

Сопоставление количественных показателей планов облучения больных по технологии IMRT для двух алгоритмов расчета СП

Проанализированы количественные показатели планов облучения для 20 пациентов по технологии IMRT раком средней трети пищевода общим объемом до 500 см³. Планы облучения рассчитаны в системе планирования Eclipse 8.6 и 16.2 версий.

Версия 8.6. Графики значений индексов гомогенности и конформности для CTV представлены на рис. 2-3. Из графиков видно, что для 99 % случаев планов значения индекса гомо-

генности HI для CTV попадают в толерантный интервал от 0,04 до 0,12. Значения индекса конформности CI для CTV для 100 % случаев попадают в необходимый интервал от 0,99 до 1,0. На рис. 4 приведены значения средних доз на критические органы: сердце, легкие, спинной мозг.

Версия 16.2. Планы облучения 20 пациентов, пролеченных по технологии IMRT на ускорителе Clinac iX, и рассчитанные в СП версии Eclipse 8.6 по алгоритму AAA, были перенесены и пересчитаны также для ускорителя Clinac iX в СП версии Eclipse 16.2 по алгоритмам AAA и Acuros. Группа из 23 пациентов сократилась до 20 вследствие невозможности реализации планов в более новой системе из-за технических характеристик ускорителя (энергия, размер поля, разворот стола и др.). На рис. 5-6 приведены графики индексов гомогенности и конформности для двух алгоритмов расчета. Можно отметить частоту (в 45 % случаев) совпадений значений индексов HI , рассчитанных на один и тот же ускоритель Clinac iX с использованием алгоритмов Acuros и AAA обеих версий, и высокую частоту (в 80 % случаев) совпадений значений индексов конформности CI . Важно учитывать то, что каждый из этих алгоритмов имеет свои особенности, и при правильном выборе алгоритма и учете параметров конкретного случая лечения возможно достижение наилучших результатов. Средние значения индексов HI и CI , отображены в табл. 6.

Оценены и сопоставлены дозовые нагрузки на критические органы при использовании алгоритмов Eclipse 8.6 и 16.2 при расчете планов облучения на Clinac iX, которые отличаются в пределах 2,2 % для сердца, 0,59 % — для спинного мозга, 0,23 % — для легких и 3,9 % — для пищевода, что подтверждает состоятельность каждого алгоритма.

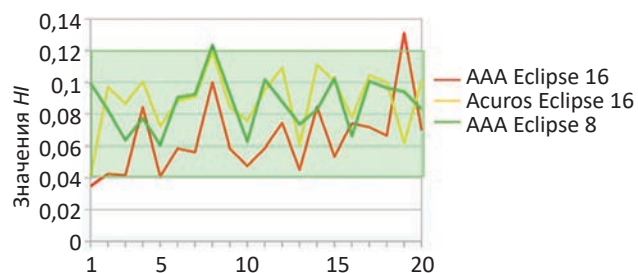


Рис. 5. Значения индексов гомогенности HI для CTV при расчете планов облучения различными алгоритмами (ускоритель Clinac iX)

Fig. 5 Values of homogeneity indices HI for CTV when calculating irradiation plans by different algorithms (Clinac iX)

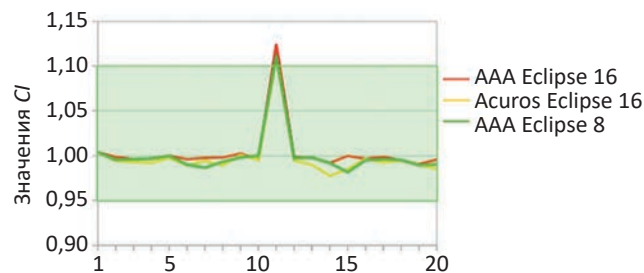


Рис. 6. Значения индексов конформности CI для CTV при расчете планов облучения различными алгоритмами (ускоритель Clinac iX)

Fig. 6. Values of conformity indices CI for CTV when calculating plans by different algorithms (Clinac iX)

Таблица 6

Значения индексов HI и CI для CTV при расчете планов по различным алгоритмам

Values of HI and CI indices for CTV when calculating plans using various algorithms

Алгоритм / Ускоритель / Версия СП	HI	CI
AAA, Clinac iX, Eclipse 8.6	$0,12 \pm 0,04$	$0,94 \pm 0,03$
AAA, Clinac iX, Eclipse 16.2	$0,13 \pm 0,03$	$0,94 \pm 0,04$
Acuros, Clinac iX, Eclipse 16.2	$0,14 \pm 0,03$	$0,94 \pm 0,04$

Сопоставление количественных показателей планирования облучения с использованием алгоритма AAA на двух разных ускорителях

Сопоставлены количественные показатели планирования облучения тех же 20 пациентов с использованием одного алгоритма AAA на ускорителе с внешним гантри и тоннельного типа. На рис. 7, 8 приведены значения индексов гомогенности HI и конформности CI для CTV при расчете планов по алгоритму AAA на ускорителях Clinac iX и Halcyon. При анализе индексов гомогенности и конформности для CTV, рас-

считанных по планам для алгоритма AAA для двух ускорителей, можно отметить отсутствие абсолютного совпадения значений указанных параметров. Это можно объяснить различными геометриями и конфигурациями ускорителей. Тем не менее, сохраняется тенденция поведения количественных характеристик и диапазоны их размещения на графиках. Отметим также, что средние значения индексов HI и CI составляют для AAA Eclipse 8.6 Clinac iX $HI = 0,12 \pm 0,04$, $CI = 0,94 \pm 0,03$ и для AAA Eclipse 16.2 Halcyon $HI = 0,11 \pm 0,04$, $CI = 0,94 \pm 0,04$ (табл. 7).

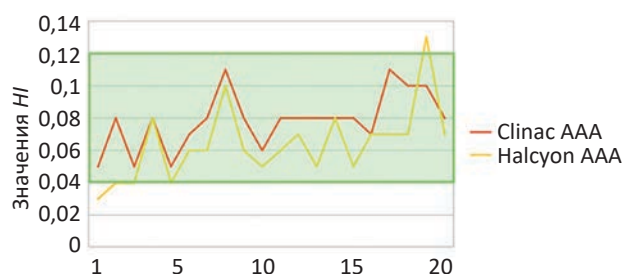


Рис. 7. Значения индекса гомогенности HI для CTV при расчете планов по алгоритму AAA на двух разных ускорителях Clinac iX и Halcyon

Fig. 7. Values of the homogeneity index HI for CTV when calculating plans using the AAA algorithm on two different accelerators Clinac iX and Halcyon

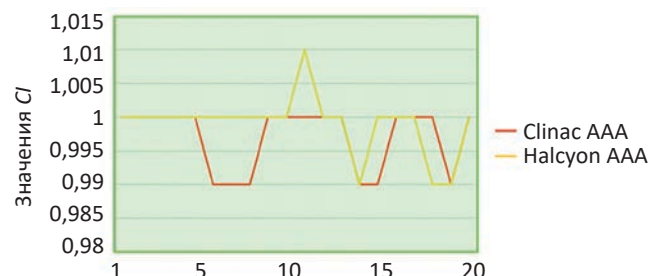


Рис. 8. Значения индекса конформности CI для CTV при расчете планов по алгоритму AAA на двух разных ускорителях Clinac iX и Halcyon

Fig. 8. Values of the conformity index CI for CTV when calculating plans according to the AAA algorithm on two different accelerators Clinac iX and Halcyon

Таблица 7

Средние значения индексов HI , CI для CTV при расчете планов по алгоритму AAA на разные типы ускорителей

Average values of HI , CI indices for CTV when calculating plans according to the AAA algorithm for different types of accelerators

Алгоритм / Ускоритель / Версия СП	HI	CI
AAA, Clinac iX, Eclipse 8.6	$0,12 \pm 0,04$	$0,94 \pm 0,03$
AAA, Halcyon, Eclipse 16.2	$0,11 \pm 0,04$	$0,96 \pm 0,04$

Выводы

1. При сопоставлении значений дозовой нагрузки на критические органы для технологий облучения 3DCRT и IMRT показано, что средние значения доз D_{mean} и максимальные D_2 % существенно меньше для технологии IMRT. При этом значения индексов гомогенности HI и конформности CI для CTV сопоставимы и принимают значения для технологии IMRT $HI = 0,12 \pm 0,04$, $CI = 0,94 \pm 0,03$. Для технологии 3D-CRT $HI = 0,13 \pm 0,03$, $CI = 0,95 \pm 0,02$. На основании вышесказанного выбираем для облучения рака средней трети пищевода технологию IMRT.

2. Сопоставлены количественные показатели планов облучения для CTV больных по технологии IMRT по разным версиям и алгоритмам расчета для одного и того же ускорителя Clinac iX. Можно отметить немалую частоту (в 45 % случаев пациентов) совпадений значений индексов HI , рассчитанных с использованием алгоритмов Асигос и AAA обеих версий. Также отметим высокую частоту (в 80 % случаев) совпадений значений индексов конформности CI .

3. Сопоставлены дозовые нагрузки на критические органы при использовании алгоритмов Eclipse 8.6 и 16.2 при расчете планов облучения на Clinac iX, которые раз между собой в пределах 2,2 % для сердца, 0,59 % — для спинного мозга, 0,23 % — для легких и 3,9 % — для пищевода, что подтверждает состоятельность каждого алгоритма расчета.

4. При анализе индексов гомогенности и конформности для CTV, рассчитанных по планам с использованием только алгоритма AAA для обоих ускорителей, можно отметить отсутствие абсолютного совпадения значений указанных параметров. Тем не менее, сохраняется тенденция поведения количественных характеристик и диапазоны их размещения на графиках. Кроме этого, средние значения индексов HI и CI принима-

ют сопоставимые значения для AAA Eclipse 8.6 Clinac iX $HI = 0,12 \pm 0,04$, $CI = 0,94 \pm 0,03$ и для AAA Eclipse 16.2 Halcyon $HI = 0,11 \pm 0,04$, $CI = 0,94 \pm 0,04$.

Таким образом, сопоставление количественных характеристик планов облучения позволило обозначить технологию IMRT как предпочтительную при лечении рака пищевода на ускорителях обоих типов с внешним и с встроенным гантри. При этом влияние алгоритмов расчета и версий СП на показатели индексов гомогенности, конформности и дозовые нагрузки на критические органы не выражено, а результаты расчетов сопоставимы в пределах погрешности.

Список литературы / References

1. Ajani JA, D'Amico TA, Bentrem DJ, et al. Esophageal and Esophagogastric Junction Cancers, Version 2.2023, NCCN Clinical Practice Guidelines in Oncology. J Natl Compr Canc Netw. 2023 Apr;21(4):393-422. DOI: 10.6004/jnccn.2023.0019.
2. Злокачественные новообразования в России в 2020 г. Заболеваемость и смертность. Под ред. Каприна А.Д., Старинского В.В., Шахзадовой А.О. МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2021. 252 с. [Malignant neoplasms in Russia in 2020 (morbidity and mortality). Eds. Kaprin AD, Starinsky VV, Shakhzadova AO. Moscow. 2021. 252 p. (In Russian)].
3. Каприн АД, Старинский ВВ, Петрова ГВ. Состояние онкологической помощи населению России в 2018 г. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России; 2019. [Kaprin AD, Starinsky VV, Petrova GV. The state of oncological care to the population of Russia in 2018. Moscow, 2019 (In Russian)].
4. Corley DA, Buffler PA. Oesophageal and gastric cardia adenocarcinomas: analysis of regional variation using the Cancer Incidence in Five Continents database. Int J Epidemiol. 2001;30:1415-25. DOI: 10.1093/ije/30.6.1415.
5. Pickens A, Orringer MB. Geographical distribution and racial disparity in esophageal cancer. Ann Thorac Surg. 2003; 76:1367-69. DOI: 10.1016/s0003-4975(03)01202-5.
6. Siewert JR, Ott K. Are squamous and adenocarcinomas of the esophagus the same disease? Semin Radiat Oncol. 2007;17:38-44. DOI: 10.1016/j.semradonc.2006.09.007.
7. Полушкина НН. Диагностический справочник гастроэнтеролога. М.: АСТ. 2007; 670 с. [Polushkina NN.

- Diagnostic Reference Book of a Gastroenterologist. M.: AST. 2007; 670 pp. (In Russian)].
8. Трякин АА, Бесова НС, Волков НМ, и др. Практические рекомендации по лекарственному лечению рака пищевода и пищеводно-желудочного перехода. 2018; 262 с. [Tryakin AA, Besova NS, Volkov NM, et al. Practical recommendations for drug treatment of cancer of the esophagus and esophagogastric junction. 2018; 262 p. (In Russian)]. DOI: 10.18 027/2224-5057-2018-8-3s2-260-272.
 9. Lee NY, Riaz N, Lu JJ. Target volume delineation for conformal and intensity-modulated radiation therapy. Medical Radiology/Radiation Oncology. 2016; 541. DOI: 10.1007/978-3-319-05726-2.
 10. Wu AJ, Bosch WR, Chang DT, et al. Expert Consensus Contouring Guidelines for Intensity Modulated Radiation Therapy in Esophageal and Gastroesophageal Junction Cancer. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2015 Jul 15;92(4):911-20. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2015.03.030.
 11. ICRU Report No. 83. Journal of the ICRU. 2010;10(1):40-2.
 12. Bentzen SM, Constine LS, Deasy JO, et al. Quantitative Analyses of Normal Tissue Effects in the Clinic (QUANTEC): an introduction to the scientific issues. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2010 Mar 1;76(3 Suppl):S3-9. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2009.09.040.
 13. Митин Т, Денгына Н, Панкратов А, Черных М. Краткие методические рекомендации по лучевой терапии рака пищевода. RUSSCO. М. 2016;20 с. [Mitin T, Dengina N, Pankratov A, Chernykh M. Brief Guidelines for Radiation Therapy of Esophageal Cancer. М. 2016; 20 p. (In Russian)]. DOI: 10.18027/2224-5057-2016-4s2-222-233.
 14. Jeraj R, Keall P. The effect of statistical uncertainty on inverse treatment planning based on Monte Carlo dose calculation. Phys Med Biol. 2000 Dec;45(12):3601-13. DOI: 10.1088/0031-9155/45/12/307.
 15. Ahnesjö A, Aspradakis MM. Dose calculations for external photon beams in radiotherapy. Phys Med Biol. 1999;44:99-155. DOI: 10.1088/0031-9155/44/11/201.
 16. Liu HH, Mackie TR, McCullough EC. Calculating dose distributions and wedge factors for photon treatment fields with dynamic wedges based on convolution/superposition method. Med Phys. 1998;25:56-63. DOI: 10.1118/1.598173.
 17. Mackie TR, Olivera GH, Reckwerdt PJ, Shepard DM. Convolution/superposition photon dose algorithm in General Practice of Radiation Oncology Physics in the 21st Century. AAPM. 2000;39-56.
 18. Mackie TR, Reckwerdt PJ, Olivera GH, et al. The convolution algorithm in IMRT in "3-D Conformal and Intensity Modulated Radiation Therapy" Advanced Medical. 2001:179-90. On line ISSN:1361-6560.

Вклад авторов

Статья подготовлена с равным участием авторов.

Authors' contributions

Article was prepared with equal participation of the authors.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests. Not declared.

Финансирование. Исследование проведено без спонсорской поддержки.

Financing. The study had no sponsorship.

Информированное согласие. Пациенты подписали информированное согласие на участие в исследовании.

Informed consent. Patients signed informed consent to participate in the study.

Соответствие принципам этики. Одобрение этического комитета не требовалось.

Ethical compliance. Ethical committee approval was not necessary.

Сведения об авторе, ответственном за связь с редакцией

Ирина Матвеевна Лебеденко — д.б.н., с.н.с. службы медико-физического сопровождения отделения радиотерапии Научно-исследовательского института клинической онкологии (НИИКО) ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России, профессор кафедры Медицинская физика НИЯУ МИФИ, SPIN-код 4088-5974, Author ID: 365 939.

Сведения об остальных авторах статьи

Ирина Анатольевна Гладилина — д.м.н., в.н.с. отделения радиотерапии Научно-исследовательского института клинической онкологии (НИИКО) ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России, профессор кафедры «Российского национального исследовательского медицинского университета им. Н.И. Пирогова»; SPIN-код: 1477-9565, AuthorID: 902224, 0152@mail.ru.

Марина Васильевна Черных — к.м.н., заведующая отделением радиотерапии Научно-исследовательского института клинической онкологии (НИИКО) ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России; SPIN-код: 4152-3432; dr.chernich@mail.ru.

Юлия Александровна Кудашкина — медицинский физик службы медико-физического сопровождения Отделения радиотерапии Научно-исследовательского института клинической онкологии (НИИКО) ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина» Минздрава России.

MEDICAL PHYSICS

Comparative Evaluation of the Quality of Irradiation Planning for Esophageal Cancer at the Clinical Accelerators Clinac iX and Halcyon

I.M. Lebedenko^{1,2}, Yu.A. Kudashkina^{1,2}, I.A. Gladilina^{1,3}, M.V. Chernykh¹

¹ N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology;
24 Kashirskoye Shosse, Moscow, Russia 115478; imlebedenko@mail.ru.

² National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute); 31 Kashirskoye Highway, Moscow, Russia 115409.

³ N.I. Pirogov Russian National Research Medical University;
1 Ostrovityanova str., Moscow, 117997, Russia.

Abstract

Purpose: To compare the quality of irradiation planning for patients with esophageal cancer using Clinac iX (Varian) electron accelerators with external gantry and Halcyon (Varian). Compare quantitative indicators of irradiation plans for different algorithms and versions.

Material and methods: A comparative assessment of the quality of irradiation planning for 90 patients with cancer of the esophagus was carried out using the indices of dose homogeneity and conformity within the target according to the data of dose-volume histograms and dose loads on critical organs. The comparison was carried out for two models of accelerators Clinac iX (Varian) with an external gantry and tunnel type Halcyon (Varian). The results of calculations of irradiation plans using different versions and algorithms for calculating planning systems are compared.

Results: A comparison of the quantitative characteristics of the exposure plans made it possible to designate the IMRT technology as the preferred one in the treatment of esophageal cancer using accelerators of both types, with external and built-in gantry. At the same time, the influence of calculation algorithms and versions of the SP on the indices of homogeneity, conformity and dose loads on critical organs is not expressed, and the calculation results are comparable within the error.

Key words: radiotherapy, esophageal cancer, linear electron accelerators, radiation planning, quantification

For citation: Lebedenko IM, Kudashkina YuA, Gladilina IA, Chernykh MV. Comparative Evaluation of the Quality of Irradiation Planning for Esophageal Cancer at the Clinical Accelerators Clinac iX and Halcyon. Journal of Oncology: Diagnostic Radiology and Radiotherapy. 2023;6(4):77-86. (In Russian).

DOI: 10.37174/2587-7593-2023-6-4-77-86

Information about the authors:

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

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

Chernykh M.V. <https://orcid.org/0000-0003-4944-4035>