

СРАВНЕНИЕ ПЛАНОВ ТОТАЛЬНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ТЕЛА И ТАРГЕТНОГО ОБЛУЧЕНИЯ КОСТНОГО МОЗГА И ЛИМФОИДНОЙ СИСТЕМЫ У ДЕТЕЙ С ОНКОГЕМАТОЛОГИЧЕСКИМИ ЗАБОЛЕВАНИЯМИ

А.А. Логинова^{1,2}, А.О. Лисовская¹, Ф.Я. Канестри¹, Ю.М. Воеводина¹, А.В. Нечеснюк¹

¹ Национальный медицинский исследовательский центр детской гематологии, онкологии и иммунологии им. Дмитрия Рогачева Минздрава РФ, Москва

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцина

COMPARISON OF TOTAL BODY IRRADIATION AND TARGETED BONE MARROW AND LYMPHOID SYSTEM IRRADIATION PLANS IN CHILDREN WITH ONCOHEMATOLOGICAL DISEASES

A.A. Loginova^{1,2}, A.O. Lisovskaya¹, F.Y. Kanestry¹, U.M. Voevodina¹, A.V. Nechesnyuk¹

¹ Dmitry Rogachev National Research Center of Pediatric Hematology, Oncology and Immunology, Moscow, Russia

² D. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Реферат

Актуальность: Тотальное облучение тела (ТОТ) является стандартной опцией при лечении пациентов с острыми лейкозами и применяется в качестве этапа кондиционирования перед аллогенной трансплантацией костного мозга. Однако проблемой остается достаточно высокая вероятность рецидива и токсичность терапии. Внедрение новых методик облучения позволяет надеяться на то, что роль лучевой терапии в кондиционировании может быть по-новому определена и расширена.

Цель: Физико-дозиметрическое обоснование метода таргетного облучения костного мозга и лимфоидной системы (ТОКЛ), и его сравнение с уже внедренным в практику методом конформного ТОТ в условиях одного центра.

Материал и методы: Дозиметрической оценке подверглись лечебные планы шести пациентов детского возраста с острым миелобластным лейкозом, получивших ТОКЛ. В качестве группы сравнения использовались ранее опубликованные данные 143 пациентов с острым лимфобластным лейкозом, получивших ТОТ в том же центре. Использовалась методика спирального облучения на аппарате TomoTherapy (Accuray, США). Облучение дважды в день, 6 фракций. Для планов ТОТ мишенью облучения суммарной дозой 12 Гр было выбрано все тело, при этом объем каждого легкого, получающего 8 Гр, не должен был превышать 40 %, а минимальная доза в легких должна была составлять не менее 6 Гр, средняя доза в почках должна быть менее 8 Гр. Для планов ТОКЛ в качестве цели планирования была поставлена задача эскалации суммарной дозы в костном мозге (RTV_1500) до 15 Гр и конформным облучением стандартными дозами 12 Гр клинически важных мишеней (RTV_1200 включает лимфатические узлы, центральную нервную систему, яички) с максимально возможным снижением дозы во всех органах риска.

Результаты: Цель эскалации дозы в костном мозге при ТОКЛ была достигнута, среднее значение суммарной дозы в RTV_1500 составило $14,9 \pm 0,1$ Гр, не менее 95 % RTV_1500 получило дозу $14,1 \pm 0,4$ Гр, среднее значение дозы ребрах, сегментированных на уровне легких, составило $14,3 \pm 0,4$ Гр, среднее значение дозы в RTV_1200 составило $12,7 \pm 0,1$ Гр. В планах ТОКЛ было до-

стигнуто более существенное снижение средних доз в органах риска по сравнению с планами TOT: от 5 % до 33 % в зависимости от их анатомического расположения, за исключением хрусталиков глаза, средняя доза в которых увеличилась на 13 %. Все индивидуальные лечебные планы показали удовлетворительные результаты дозиметрической проверки.

Заключение: Несмотря на успешную эскалацию дозы в костном мозге, средняя доза в большинстве органов риска в планах ТОКЛ была существенно ниже по сравнению с планами TOT. Рассмотренный метод ТОКЛ технически реализуем на аппарате TomoTherapy, обеспечивая требуемую эскалацию дозы в костном мозге и облучение остальных клинически важных мишеней стандартной предписанной дозой при одновременном снижении дозы в органах риска у детей с онкогематологическими заболеваниями.

Ключевые слова: острый лейкоз, тотальное облучение тела, таргетное облучение костного мозга и лимфатической системы, эскалация дозы, дети

Abstract

Background: Total body irradiation (TBI) is a standard option in the treatment of patients with acute leukemia and is used in conditioning regimens before allogeneic bone marrow transplantation. However, the problem remains a fairly high probability of relapse and toxicity of therapy. The introduction of new irradiation techniques allows us to hope that the role of radiotherapy in conditioning can be redefined and expanded.

Purpose: To provide dosimetric feasibility for the method of targeted irradiation of the bone marrow and lymphoid system (TMLI) and compare it with the already introduced into practice method of conformal TBI in a single center.

Material and methods: The treatment plans of six pediatric patients with acute myeloid leukemia who received TMLI were evaluated dosimetrically. Previously published data on 143 patients with acute lymphoblastic leukemia who received TBI at the same center were used as a comparison group. The spiral irradiation technique was used on the TomoTherapy device (Accuray, USA). Irradiation was twice a day, 6 fractions. For the TBI plans, the whole body was chosen as the target for irradiation with a dose of 12 Gy, but the volume of each lung receiving 8 Gy should not exceed 40 % and $D_{min} < 6$ Gy, the average dose in the kidneys should be < 8 Gy. For the TMLI plans, the planning goal was to escalate the dose to the bone marrow (PTV_1500) to 15 Gy and conformal irradiation with standard doses of 12 Gy to clinically important targets (PTV_1200 includes lymph nodes, central nervous system, testes) with the maximum possible dose reduction in all organs at risk.

Results: The goal of dose escalation in the bone marrow in TMLI was achieved, the average dose in PTV_1500 was 14.9 ± 0.1 Gy, at least 95 % of PTV_1500 received a dose of 14.1 ± 0.4 Gy, the average dose in the ribs segmented at the lung level was 14.3 ± 0.4 Gy, the average dose in PTV_1200 was 12.7 ± 0.1 Gy. In comparison to TBI the average dose in the organs at risk for TMLI was reduced by 5 % to 33 % depending on their anatomical location, with the exception of the lenses of the eye, the average dose in which increased by 13 %. All individual treatment plans showed satisfactory results of dosimetric verification.

Conclusion: Despite successful dose escalation in the bone marrow, the average dose in most organs at risk in the TMLI plans was significantly lower compared to the TBI plans. The TMLI method is technically feasible using TomoTherapy device, provides the required dose escalation in the bone marrow, irradiation of the clinically important targets with the standard prescribed dose while simultaneously reducing the dose in organs at risk in children with oncohematological diseases.

Key words: TBI, TMLI, bone marrow, dose escalation, children

E-mail: aloginovaa@gmail.com

<https://doi.org/10.52775/1810-200X-2025-106-2-72-78>

Введение

Тотальное облучение тела (TOT) применяется в качестве этапа кондиционирования перед аллогенной трансплантацией костного мозга при лечении пациентов высокого риска с

острыми лейкозами [1]. Однако проблемой остается достаточно высокая вероятность рецидива заболевания. Показано, что для достижения лучшего клинического эффекта требуется эскалация дозы TOT, при этом увеличивается смертность от лучевой токсичности [2].

Внедрение современных методик лучевой терапии, появление нового радиотерапевтического оборудования привело к тому, что все больше центров меняют свой подход к технологии TOT и переходят от традиционных способов TOT к методам конформного ротационного облучения. Эти методы позволяют улучшить однородность облучения мишени, обеспечить лучший контроль поглощенной дозы в теле пациента и предоставляют больше свободы для персонализации терапии – снижения дозы в органах риска.

В течение последнего десятилетия несколько отделений в мире успешно сделали следующий шаг к более целенаправленному облучению костного мозга/лимфоидной ткани [3, 4]. В то время, как методы конформного ротационного TOT в первую очередь направлены на контроль и ограниченное снижение дозы в некоторых органах риска, то методы тотального облучения костного мозга и лимфоидной системы в первую очередь направлены на эскалацию дозы в мишени и при этом на максимальное снижение дозы практически во всех органах, где это доступно.

Таким образом, роль лучевой терапии в кондиционировании пациентов детского возраста также может быть определена по-новому. В частности, мы разработали метод селективного (таргетного) облучения с эскалацией дозы в костном мозге и конформным облучением стандартными дозами клинически важных мишеней (лимфатических узлов, центральной нервной системы, яичек) с максимально возможным снижением дозы во всех органах риска. В настоящее время в литературе отсутствует общепринятая терминология, соответствующая данному виду тотального облучения. На наш взгляд, наибольшее описательное соответствие имеет следующая формулировка: таргетное облучение костного мозга и лимфоидной системы (ТОКЛ).

Практически все новые методы облучения развиваются изолированно, и поэтому решения о предписании дозы, способам облучения, достижимости целей планирования существенно отличаются между центрами. Целью данной работы является физико-дозиметрическое обоснование метода ТОКЛ, разработанного для применения у педиатрических пациентов с острыми лейкозами и его сравнение с уже внедренным в практику методом конформного TOT в условиях одного и того же центра [5].

Материал и методы

Методика облучения: Для реализации планов ТОКЛ и TOT использовалась методика лучевой терапии с модуляцией интенсивности в режиме спирального облучения на аппарате Hi-Art TomoTherapy 4.5 (Accuray Inc., Калифорния, США). Подробное описание материалов и методов создания, дозиметрической проверки и реализации лечебных планов TOT представлено в публикации [5].

Характеристика пациентов: В данной работе дозиметрической оценке подверглись лечебные планы ТОКЛ пациентов с острым миелобластным лейкозом, созданные за период с июля по ноябрь 2023 г. Всего 6 пациентов ростом от 104 до 167 см, возраст от 4 до 16 лет. В качестве группы сравнения выступали планы 157 пациентов, получивших TOT с использованием TomoTherapy, результаты опубликованы в статье Loginova et al. [5]. После лучевой терапии проводилась химиотерапия и аллогенная трансплантация гемопоэтических стволовых клеток.

Иммобилизация пациентов: для иммобилизации всего тела в положении лежа на спине использовались вакуумные матрасы с жесткими креплениями к кушетке и фиксацией головы с помощью термопластичных масок производства Elekta (UK, Crawley). Руки и кисти пациента располагались как можно ближе к телу, чтобы улучшить однородность распределения дозы при спиральном облучении и максимизировать объем тела в поле зрения мегавольтной компьютерной томографии аппарата TomoTherapy.

Симуляция на компьютерном томографе: Изображения при компьютерной томографии (КТ) пациентов были получены в режиме свободного дыхания с толщиной среза 5 мм с использованием напряжения рентгеновской трубки 120 кВ и максимально возможным полем зрения 65 см. Изображения для пациентов ростом более 115 см были получены с помощью двух сканирований, проведенных в противоположных направлениях, чтобы преодолеть ограничения по протяженности мишеней для установки TomoTherapy. Первое сканирование включало верхнюю часть тела до колен в положении пациента лежа на спине головой вперед. Второе сканирование нижней части тела начиналось с кончиков стоп до таза в положении пациента на спине ногами вперед по отношению к гантри. Перекрытие областей сканирования

необходимо для выполнения регистрации изображения и контроля дозы в области стыковки полей. В области стыковки были размещены рентгеноконтрастные метки, чтобы обеспечить контроль при регистрации изображений верхней и нижней частей тела.

Оконтуривание: Оконтуривание выполнялось в системе MIM Maestro™ (MIM Software Inc., США) с использованием предварительно разработанных полуавтоматических рабочих потоков. Ребра были оконтурены как дополнительный целевой объем в пределах мишеней для лучшего контроля резкого градиента дозы в области, прилегающей к легким.

Предписание дозы для планов ТОКЛ:

PTV_1200 (лимфатическая, центральная нервная системы и яички у пациентов мужского пола с отступом 5 мм) – суммарная доза (СД) 12,0 Гр; PTV_1500 (весь скелет за исключением верхней и нижней челюсти с отступом 5 мм) – СД 15,0 Гр, облучение дважды в день, всего 6 фракций. Доза в органах риска (хрусталики глаза, щитовидная железа, легкие, сердце, почки, печень, кишечник, мочевой пузырь) должна быть максимально снижена.

Предписание дозы для планов ТОТ:

PTV_1200 (все тело с отступом внутрь 3 мм, за исключением легких, почек и хрусталиков) – СД 12,0 Гр, облучение дважды в день, всего 6 фракций. СД в органах риска предписывалась следующим образом: в легких V8 <40 % (то есть объем каждого легкого, получающего 8 Гр, не должен был превышать 40 % от всего объема легкого) с минимальной дозой не менее 6 Гр. Средняя доза в почках должна быть <8 Гр. Доза в хрусталиках глаза должна быть максимально снижена при сохранении покрытия мишени 95 % от предписанной дозы в прилегающих к глазам областях.

Расчет дозы: Планы ТОТ и ТОКЛ были созданы с использованием системы планирования non-Volo TomoTherapy 4.5 (Accuray Inc., Саннивейл, Калифорния, США) в геометрии спирального облучения без опции TomoEdge.

Мы использовали предварительно сформированные шаблоны планов. Сначала выполнялись 300–350 итераций оптимизации в фоновом режиме. Вместе с первоначальным расчетом бимлетов этот процесс производится без участия персонала и занимает до 6 часов, затем проводится 50–100 итераций с активным участием планировщика.

Используемая версия системы планирования не позволяет выполнять регистрацию

изображений и оптимизацию дозы нижней части тела на основе распределения дозы верхней части тела. Расчеты дозы проводились независимо друг от друга на каждой серии изображений. Таким образом, при оптимизации дозы в нижней части тела отсутствует возможность компенсировать возможные отклонения заданного градиента в области стыковки верхней части тела. По этой причине для достижения однородности облучения зоны стыковки в пределах 90–120 % мы использовали заранее определенный отступ между PTV [5–7]. Размер отступа зависит от параметров оптимизации дозиметрического плана. В данной работе его значение составило 6 см, ширина радиационного поля 5 см, значение pitch 0,287 для верхней части тела и 0,43 для нижней, коэффициент модуляции 3,7 для верхней части тела и 1,8 для нижней. После окончания планирования проводилось совмещение изображений КТ верхней и нижней частей тела и суммирование соответствующих распределений дозы с использованием внешнего программного обеспечения MIM Maestro™ (MIM Software Inc., США). Таким образом мы получали полные КТ-изображения тел пациентов и распределения дозы. Дополнительно для оценки распределения дозы оконтуривали объем тела пациента, включающий зону стыковки радиационных полей между верхней и нижней частью тела.

Дозиметрическая проверка планов: Процедуры гарантии качества планов включали дозиметрические проверки и независимый расчет дозы в системе MIM SureCalc® MonteCarlo для каждого плана лечения. В качестве входных данных системы независимого расчета дозы MIM SureCalc® MonteCarlo выступали данные, полученные из системы дозиметрического планирования, а именно КТ-изображения, структуры, план и распределение рассчитанной поглощенной дозы в формате DICOM. При этом было выбрано значение статистической неопределенности расчета Монте-Карло 0,5 %. Результаты независимого расчета планов с модуляцией интенсивности оценивались с использованием гамма-критерия 4 %/2 мм, рассчитанного во всем объеме тела пациента с отсечкой по дозе 20 %.

Измерения абсолютной дозы проводились с использованием ионизационных камер (ExtraDIN Chambers, A1SL), 8-канального электрометра (TomoElectrometer) и тканеэквивалентного фантома (Cheese Phantom), предоставленного Accuray Inc. (США). Ионизацион-

ные камеры располагались в четырех точках фантома, две из которых соответствовали расположению органов риска, а две другие – области мишени.

Анализ дозиметрических параметров лечебных планов: Сравнение результатов дозиметрического планирования ТОКЛ с внедренным в рутинную клиническую практику методом конформного ТОТ проводилось путем анализа гистограмм доза–объем. В качестве сравниваемых параметров были выбраны значения средних и минимальных доз в объемах мишеней и органов риска. Для мишеней при выполнении ТОКЛ также оценивалось, какой дозой покрывается как минимум 90 % объема мишеней: PTV_1500, PTV_1200, а также отдельно выделенного объема ребер, сегментированного на уровне легких. Для сравнения результатов был выбран U-критерий Манна–Уитни – непараметрический статистический критерий, используемый для сравнения двух выборок, независимых по уровню какого-либо признака, измеренного количественно.

Результаты

Для планов ТОКЛ удалось успешно реализовать эскалацию дозы, в данном разделе и везде далее по тексту речь идет о СД. Так, среднее значение дозы в PTV_1500 составило $14,9 \pm 0,1$ Гр, не менее 95 % PTV_1500 получило дозу $14,1 \pm 0,4$ Гр, 90 % PTV_1500 получило дозу не менее чем $14,1 \pm 0,2$ Гр, при этом 90 % PTV_1200 получило дозу не менее чем $11,9 \pm 0,1$ Гр. Среднее значение дозы ребрах, сегментированных на уровне легких, составило $14,3 \pm 0,4$ Гр, среднее значение дозы в PTV_1200 составило $12,7 \pm 0,1$ Гр. На рис. 1 представлено сравнение средних доз в мишенях при использовании ТОТ и ТОКЛ соответственно. В табл. 1 представлены данные о средних дозах в органах риска при выполнении ТОКЛ и ТОТ.

Статистический анализ данных гистограмм доза–объем показал, что нулевая гипотеза о том, что нет статистической разницы между группами ТОКЛ и ТОТ, была отвергнута для всех рассматриваемых переменных, то есть можно утверждать, что значения средних и минимальных доз во всех мишенях и органах риска с вероятностью ошибки 5 % статистически различаются.

На рис. 2 представлено сравнение минимальных доз в основных органах риска при ис-

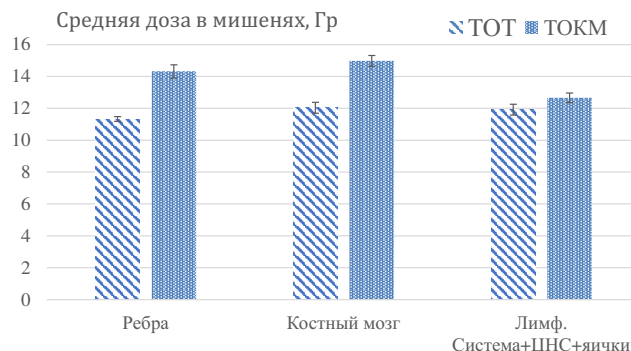


Рис. 1. Сравнение средних доз в мишенях для методов тотального облучения тела (ТОТ) и таргетного облучения костного мозга и лимфоидной системы (ТОКЛ), реализованных на аппарате TomoTherapy

Таблица 1

Сравнение средних доз в органах риска при выполнении таргетного облучения костного мозга и лимфоидной системы (ТОКЛ) и тотального облучения тела (ТОТ)

Орган риска	Средняя доза $\pm$ станд. отклонение, Гр	
	ТОКЛ	ТОТ
Хрусталики глаза	$6,8 \pm 1,1$	$6,0 \pm 0,7$
Щитовидная железа	$10,5 \pm 0,5$	$12,0 \pm 0,7$
Легкое	$6,9 \pm 0,4$	$7,8 \pm 0,1$
Сердце	$9,4 \pm 0,8$	$11,8 \pm 0,5$
Почка правая	$5,1 \pm 0,3$	$7,6 \pm 0,3$
Почка левая	$7,3 \pm 0,3$	$7,6 \pm 0,3$
Печень	$9,5 \pm 0,8$	$12,1 \pm 0,4$
Кишечник	$9,4 \pm 0,7$	$12,0 \pm 0,4$
Мочевой пузырь	$11,1 \pm 1,4$	$12,0 \pm 0,4$

пользовании рассматриваемой методики облучения (ТОКЛ) и уже реализованной методике конформного ТОТ на том же оборудовании [5].

На рис. 3 представлено сравнение распределения доз на примере пациентов при использовании ТОКЛ и конформного ТОТ.

Все индивидуальные лечебные планы показали удовлетворительные результаты дозиметрической проверки. В 100 % случаев измеренная доза находилась в пределах 3 % от расчетного значения. Анализ данных независимого расчета дозы планов ТОКЛ показал, что процент точек, отвечающих гамма-критерию 4 %/2 мм во всех рассмотренных случаях превысил уровень 95 % и составил $98,2 \pm 1,5$ %.

Совмещение изображений верхней и нижней части тела и суммирование дозы после окончания планирования показало, что для всех случаев доза в области стыковки

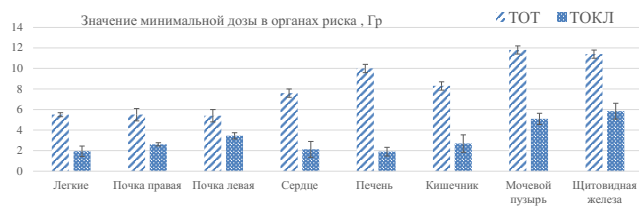


Рис. 2. Сравнение минимальных доз в органах риска для методов тотального облучения тела (TOT) и таргетного облучения костного мозга и лимфоидной системы (ТОКЛ), реализованных при спиральном облучении на аппарате TomoTherapy

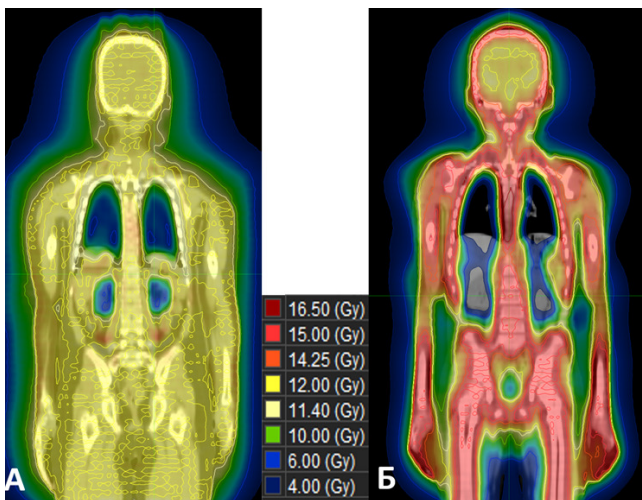


Рис. 3. Сравнение распределений дозы на примере А – тотального облучения тела (TOT) и Б – таргетного облучения костного мозга и лимфоидной системы (ТОКЛ), реализованных при спиральном облучении на аппарате TomoTherapy

находилась в диапазоне между 90–120 % от предписанного значения.

Этап оконтуривания был успешно стандартизирован и автоматизирован. Время, затраченное на оконтуривание одного пациента, получающего TOT (всего 22 структуры, включая вспомогательные) составило 10–20 минут, а на одного пациента, получающего ТОКЛ (всего 42 структуры, включая вспомогательные), составляет 20–30 минут.

Обсуждение

Несмотря на успешную эскалацию дозы в костном мозге, средняя доза в большинстве органов риска в планах ТОКЛ оказалась существенно ниже по сравнению с планами TOT. Значения доз для правой и левой почки пред-

ставлены по отдельности, поскольку в отличие от правой, левая почка анатомически прилегает к селезенке, которая входит в состав лимфатической системы и включена в RTV_1200.

Как средние, так и минимальные дозы в органах риска существенно меньше при выполнении ТОКЛ по сравнению с TOT. Средняя доза в органах риска была в зависимости от их анатомического расположения была снижена от $5 \pm 0,3$ % (левая почка) до $33 \pm 0,3$ % (правая почка), за исключением хрусталиков глаза, средняя доза в которых увеличилась на $13 \pm 0,9$ %. При этом значения максимальных доз практически во всех органах риска при ТОКЛ выше таковых по сравнению с TOT, что обусловлено эскалацией дозы в костном мозге.

Снижение дозы призвано обеспечить более низкие профили токсичности для органов риска у пациентов с острым лейкозом, получающих трансплантацию костного мозга или гемопоэтических стволовых клеток в комбинации с ТОКЛ. При этом вопросы о показаниях лечению и рисках экстрамедуллярных рецидивов у пациентов, получающих ТОКЛ, должны решаться клиницистами. Оценка показаний к проведению терапии и вероятности возможных рецидивов в результате снижения дозы в органах риска не являются задачами данного исследования.

Время, необходимое для полного расчета плана лечения, варьировалось от 4 до 7 часов, в зависимости от размера тела пациента. Использование шаблонов планов ускоряет процесс и сокращает время расчета дозы с участием персонала до 60 мин, что приблизительно соответствует времени, затраченному на планирование TOT в нашем центре [5].

Время непосредственной доставки дозы при ТОКЛ несколько больше, чем при TOT, поскольку оно зависит не только от протяженности мишени, но и от выбранных геометрических параметров плана, значения Pitch, а также коэффициента модуляции плана. В среднем время доставки дозы составило 37 мин, в диапазоне от 27 до 64 минут.

TOT и ТОКЛ – сложные и ресурсоемкие методы, требуют тщательного контроля процедуры укладки пациента, поскольку мишень имеет сложную нерегулярную форму и большую протяженность. На каждом этапе подготовки к облучению необходим постоянный поиск баланса между улучшением качества и затраченным временем на предлучевую подготовку.

Заключение

Современные методы конформного ротационного ТОТ и ТОКЛ направлены на поиск уменьшения острой и поздней токсичности лучевого этапа лечения при сохранении эффективности терапии. Доза в большинстве органов риска в планах ТОКЛ была существенно ниже по сравнению с планами ТОТ. Рассмотренный метод ТОКЛ технически реализуем на аппарате TomoTherapy, обеспечивает требуемую эскалацию дозы в костном мозге, облучение остальных клинически важных мишеней стандартной предписанной дозой при одновременном снижении дозы в органах риска у детей с онкогематологическими заболеваниями.

Список литературы

1. Peters C, Dalle JH, Locatelli F, Poetschger U, Sedlacek P, Buechner J et al. Total body irradiation or chemotherapy conditioning in childhood all: A multinational, randomized, noninferiority phase III study. *J Clin Oncol*. 2021 Feb 1; 39 (4): 295-307. <https://doi.org/10.1200/JCO.20.02529>.
2. Hoeben BAW, Pazos M, Seravalli E, Bosman ME, Losert C, Albert MH et al. ESTRO ACROP and SIOPE recommendations for myeloablative Total Body Irradiation in children. *Radiother Oncol*. 2022 Aug; 173: 119-33. <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2022.05.027>.
3. Parsons D, Lim TY, Teruel JR, Galavis P, Agostinelli S, Liang J et al. Considerations for intensity modulated total body or total marrow and lymphoid irradiation. *Clin Transl Radiat Oncol*. 2023 Sep 9; 43: 100674. <https://doi.org/10.1016/j.ctro.2023.100674>.
4. Haraldsson A, Engellau J, Lenhoff S, Engelholm S, Вдск S, Engström PE. Implementing safe and robust Total Marrow Irradiation using Helical Tomotherapy - A practical guide. *Phys Med*. 2019 Apr; 60: 162-7. <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2019.03.032>.
5. Loginova AA, Tovmasian DA, Lisovskaya AO, Kobyzeva DA, Maschan MA, Chernyaev AP, et al. Optimized Conformal Total Body Irradiation methods with Helical Tomotherapy and Elekta VMAT: Implementation, Imaging, Planning and Dose Delivery for Pediatric Patients. *Front Oncol*. 2022 Mar 10; 12: 785917. <https://doi.org/10.3389/fonc.2022.785917>.
6. Usui K, Isobe A, Hara N, Shikama N, Sasai K, Ogawa K. Appropriate treatment planning method for field joint dose in total body irradiation using helical tomotherapy. *Med Dosim*. 2019 Winter; 44 (4): 344-53. <https://doi.org/10.1016/j.meddos.2018.12.003>.
7. Логинова АА, Товмасын ДА, Черняев АП, Варзарь СМ, Кобызева ДА, Нечеснюк АВ. Методика стыковки полей при тотальном облучении тела с использованием технологии Томотерапии. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2018; 63 (2): 55-61.
Loginova AA, Tovmasyan DA, Chernyaev AP, Varzar' SM, Kobyzeva DA, Nechesnyuk AV. Field Junction Technique for Helical Tomotherapy-Based Total Body Irradiation. *Med Radiol Radiat Safety*. 2018; 63 (2): 55-61. https://doi.org/10.12737/article_5ac622371650f7.48983677 (In Russ).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 18.03.2025. **Принята к публикации:** 10.06.2025.

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: 18.03.2025. **Accepted for publication:** 10.06.2025.