

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА И СРАВНЕНИЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАНОВ КРАНИОСПИНАЛЬНОГО ОБЛУЧЕНИЯ ПО МЕТОДИКЕ VMAT НА УСКОРИТЕЛЯХ VARIAN TRUEBEAM И VARIAN HALCYON

А.Э. Гумбатова¹, А.В. Овсянников¹, И.М. Лебедеенко², И.И. Лузина³

¹ Центр лучевой терапии АО «КЗ1 Сити», Москва

² Национальный медицинский исследовательский центр онкологии им. Н.Н. Блохина Минздрава РФ, Москва

³ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Саратов

Цель: Провести сравнительный анализ дозиметрических характеристик планов краниоспинального облучения (КСО), выполненных по методике VMAT на линейных ускорителях электронов Varian TrueBeam и Halcyon.

Материал и методы: Сравнение дозовых распределений проводилось для группы из 5 пациентов с опухолями центральной нервной системы. Оконтуривание структур и планирование КСО осуществлялось в системе Eclipse версии 15.6. Рассчитаны и оценены следующие дозовые характеристики: индекс гомогенности дозового распределения (HI), индекс конформности (CI), коэффициент покрытия мишени (CO) и лучевые нагрузки на органы риска (хрусталики, пищевод, легкие, сердце, печень, кишечник и почки). Для проверки соответствия распределения дозы, рассчитанного в системе планирования и полученного на ускорителях, была выполнена верификация планов облучения.

Результаты: Для всех планов КСО был выполнен критерий покрытия мишени $D_{95} > 95\%$, получены допустимые значения лучевых нагрузок для критических органов. Индекс гомогенности составил $HI \leq 0,12$ для двух ускорителей. Среднее значение индекса конформности CI для ускорителя TrueBeam составило 1,09, а для ускорителя Halcyon CI – 1,12. Гамма-анализ при выполнении верификации планов КСО показал результаты в пределах допуска как для TrueBeam, так и для Halcyon. Сделаны выводы о преимуществах и недостатках проведения КСО на ускорителях электронов TrueBeam и Halcyon.

Заключение: Лечение пациентов методом КСО на ускорителях Halcyon техникой облучения VMAT возможно проводить так же качественно, как и на ускорителях TrueBeam.

Ключевые слова: дистанционная лучевая терапия, краниоспинальное облучение, TrueBeam, Halcyon, индекс гомогенности, индекс конформности, коэффициент покрытия, критические органы, портальная дозиметрия

DOI: 10.52775/1810-200X-2022-96-4-30-36

Введение

Современная медицина предполагает различные способы лечения онкологических заболеваний. Одним из таких методов лечения является дистанционная лучевая терапия (ЛТ), которая основана на взаимодействии ионизирующего излучения с веществом. В настоящее время наблюдается рост заболеваемости опухолями центральной нервной системы, для которых краниоспинальное облучение (КСО) остается одним из основных способов лечения.

КСО подразумевает облучение всего объема головного и спинного мозга. Данный тип облучения показан в тех случаях, когда есть высокая вероятность распространения метастазов по путям циркуляции спинномозговой жидкости (ликвора). Если облучается весь объем головного мозга и спинномозгового канала, то для взрослого пациента планируемый объем облучения РТV имеет протяженность около 70–85 см. В то время как максимальный размер поля для ускорителя TrueBeam составляет 40×40 см, а для Halcyon – 28×28 см. Это значит, что невозможно осуществить лечение с использованием только одного изоцентра. Необходимо выбирать несколько изоцентров, что является крайне сложным в реализации и имеет много нюансов на всех этапах проведения ЛТ, включая предлучевую подготовку, планирование и процесс лечения.

Основную сложность при проведении КСО представляет необходимость использования наложения полей от разных изоцентров. Чтобы не допустить недооблучения или переоблучения в данных областях, необходимо уделять большое внимание корректности расчета дозы и верификации планов облучения. Немаловажную роль играет анализ и устранение риска возможных неточностей укладки при иммобилизации пациента.

Большой интерес представляет реализация подготовки планов облучения и лечение на ускорителе нового поколения фирмы Varian Halcyon, т.к. во многих клиниках КСО реализуется только на аппаратах С-типа. Поэтому целью данной работы было проведение сравнительного анализа дозиметрических характеристик и выполнение оценки качества планов КСО по методике VMAT для ускорителей Varian TrueBeam и Varian Halcyon.

Материал и методы

Линейные ускорители электронов TrueBeam и Halcyon

Центр лучевой терапии АО “К31 Сити” оборудован двумя высокоэнергетическими линейными ускорителями электронов (ЛУЭ) Varian TrueBeam (версия 2.7) и Varian Halcyon (версия 2.0). ЛУЭ TrueBeam оборудован системой портальной визуализации MV, а также имеет вмонтированную рентгеновскую систему визуализации kV, что позволяет создавать 2D снимки в киловольтном и мегавольтном пучках и выполнять объемную kV компьютерную томографию с конусным пучком излучения (СВСТ). Данный ускоритель предполагает наличие двух пар шторок. Лепестки коллиматора имеют ширину 0,5 см в центре и 1 см по краям в проекции на изоцентр, а максимальный размер поля составляет 40×40 см.

В Центре лучевой терапии АО “К31 Сити” ускоритель Halcyon не оснащен киловольтной визуализацией и предполагает выполнение объемной СВСТ только в мегавольтном пучке (MV СВСТ). Многолепестковый коллиматор (МЛК) в Halcyon, в отличие от TrueBeam, состоит из двух рядов лепестков шириной 1 см в проекции на изоцентр, расположенных в шахматном порядке. Наиболее важной особенностью Halcyon, играющей ключевую роль в планировании КСО, является то, что открытое поле имеет максимальный размер всего 28×28 см.

В силу того, что скорость вращения гантри Halcyon выше, чем на TrueBeam, то время лечения на данном ускорителе меньше. Но процесс ежедневной укладки и иммобилизации пациента на Halcyon, в отличие от TrueBeam, является более трудоемким и затратным по времени. Это связано со следующими особенностями:

- ✓ необходимость использования большего количества изоцентров (в большинстве случаях 3 на TrueBeam и 4–5 на Halcyon);
- ✓ выполнение СВСТ на Halcyon только в мегавольтном пучке, а значит, полученные изображения хуже по качеству. Также важно отметить, что MV СВСТ вносит больший вклад в дозу, чем kV СВСТ, однако данный вклад учитывается при расчете суммарной дозы в системе планирования. Поэтому для КСО всех пациентов выполнялось низкодозное MV СВСТ Low Dose (5 MU вместо 10 MU при

выборе MV CBCT High Quality), что несильно влияет на качество полученных изображений для позиционирования пациента, но уменьшает дополнительную лучевую нагрузку;

- ✓ стол Halcyon обладает только тремя степенями свободы, в то время как у стола TrueBeam 3–6 степеней свободы: помимо VRT, LNG, LAT имеются RTN, PITCH, ROLL (в зависимости от версии TrueBeam и дополнительно приобретенной функции для лечебного стола).

Общая характеристика группы пациентов и предлучевая подготовка

В исследуемую группу были ретроспективно отобраны пять взрослых пациентов, ранее получавших КСО. Во время проведения предлучевой подготовки и лечения важна точная воспроизводимость положения пациента с помощью различных фиксирующих устройств (ФУ). КСО всех пациентов, выбранных для проведения данного исследования, проводилось лежа на спине головой вперед с положением рук вдоль тела с использованием ФУ фирмы Qfix: Portrait с индексированными держателями для рук, индивидуальной термопластичной маски S-типа, подголовника, подколенника, подпяточника. При КТ-разметке с помощью внешних лазеров на теле пациента были нарисованы метки, по которым выполнялась укладка на первой фракции. Сканирование проводилось с толщиной среза 2,5 мм на компьютерном томографе фирмы General Electric, модель Discovery RT.

Особенности планирования КСО на ускорителях TrueBeam и Halcyon

Протяженность общего объема РТВ варьировалась от 67 до 85 см в зависимости от роста пациента. Из-за большой протяженности РТВ в направлении спинномозгового канала и ограниченности размеров поля невозможно осуществить облучение всего объема мишени с одного изоцентра. Учитывая максимальный размер поля на ускорителе TrueBeam, во время планирования КСО взрослых пациентов было достаточно выбрать 3 изоцентра. На Halcyon трех изоцентров в большинстве случаев недостаточно, поэтому облучение реализовывалось, как правило, с четырех, а иногда с пяти изоцентров. Для того, чтобы не учитывать влияние протяженности областей наложения на дозовое распределение, было принято решение вы-

полнять все расчеты с оптимальной длиной области наложения полей 5 см.

Предписанная доза составила 36 Гр за 18 фракций, разовая доза (РД) 2 Гр. При создании дозиметрических планов облучения по методике VMAT была использована номинальная энергия фотонов 6 МэВ без выравнивающего фильтра как для ЛУЭ TrueBeam, так и для Halcyon. Для всех планов облучения была применена нормализация дозового распределения на медианную дозу в мишени, исходя из международного протокола ICRU 83.

Облучение объема головного мозга во всех планах осуществлялось с использованием трех полных арок. Каждому изоцентру спинномозгового канала соответствовали по две полные арки. Стоит отметить, что при использовании полных арок в облучаемый объем попадают руки, поэтому для каждого поля спинномозгового канала были выбраны по два сектора в пределах от 85° до 125° с левой стороны и от 235° до 275° с правой стороны, чтобы избежать прохождения пучка с данных направлений.

В силу того, что в версии Eclipse 15.6 для Halcyon без киловольтной визуализации имеется возможность производить расчет дозы только алгоритмом AAA (Anisotropic Analytical Algorithm), для TrueBeam был выбран аналогичный алгоритм. Изначально планы облучения были рассчитаны со всеми изоцентрами и далее разделены на несколько лечебных планов с одним изоцентром. К каждому плану были добавлены СВСТ, а затем для анализа полученных результатов был создан общий суммарный план облучения, включающий в себя все изоцентры. Органы риска, участвующие в оценке, были следующими: хрусталики, пищевод, легкие, сердце, кишечник, печень и почки.

Дозиметрические характеристики облучения мишени

Для оценки распределения дозы в мишени, согласно протоколу ICRU 83, были выполнены расчет индекса гомогенности (HI) и индекса конформности (CI). Также была проведена оценка покрытия (CO) мишени.

Индекс гомогенности (HI) характеризует однородность дозового распределения:

$$HI = ((D_{2\%} - D_{98\%}) / D_{50\%}) \times 100 \%, \quad (1)$$

где $D_{2\%}$, $D_{50\%}$ и $D_{98\%}$ – дозы, которые получают 2, 50 и 98 % объема мишени РТВ соответственно. В идеальном случае, при $HI=0$, дозовое распределение считается полностью однородным.

План считается оптимальным при значении $HI < 0,12$.

Индекс конформности (CI) рассчитывается как отношение объема ткани, получающей 95 % дозы от предписанной, к всему объему PTV V_{PTV} :

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

где $V_{95\%}$ – объем ткани, получившей 95 % предписанной дозы, а V_{PTV} – объем мишени PTV.

Если же $CI < 1$, то это свидетельствует о недооблучении целевого объема, а индекс конформности больше единицы говорит о переоблучении. Однако данную характеристику нельзя считать универсальной, т.к. она не учитывает насколько объем $V_{95\%}$ соответствует объему V_{PTV} . Чтобы учесть этот фактор, был выбран еще параметр – коэффициент покрытия CO.

Коэффициент покрытия мишени CO – это отношение объема мишени, охватываемого предписанной изодозой $V_{пр}$, ко всему объему мишени V_{PTV} :

$$CO = (V_{пр} / V_{PTV}) \times 100 \%. \quad (3)$$

Результаты и обсуждение

Показатели качества облучения

Примеры полученных дозовых распределений при КСО для одного из пациентов представлены на рис. 1 и 2.

В табл. 1 представлены средние значения индексов гомогенности, конформности и покрытия, а также показан диапазон полученных значений.

Планы для ускорителя Halcyon получились более гетерогенными (индекс гомогенности HI выше) по сравнению с планами для TrueBeam. Это можно объяснить тем, что облучение мишени на аппарате Halcyon происходит

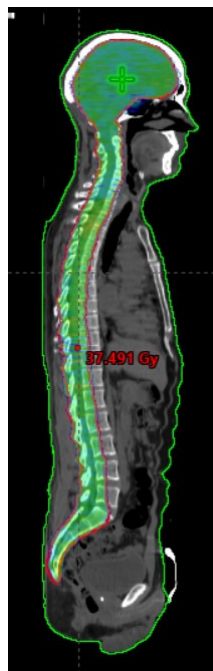


Рис. 1. КСО на ускорителе TrueBeam



Рис. 2. КСО на ускорителе Halcyon

с большего числа изоцентров, формируя таким образом больше участков наложения полей. Интегральная доза в облучаемом объеме является суперпозицией 7–11 полей. В то время как на TrueBeam было достаточно выбора трех изоцентров, которым соответствовало всего 7 полей. Поэтому на TrueBeam получилось создать более однородное распределение дозы.

Показатели дозовых нагрузок на критические органы

Основные показатели лучевых нагрузок на критические органы приведены в табл. 2. Для пищевода, легких, сердца, печени, кишечника и почек оценивались средняя доза, а для хрусталиков – максимальная доза, которая не должна превышать 4 Гр, но в случае расчета планов с модуляцией флюенса допустимым порогом принято 10 Гр. В системе планирования Eclipse предусмотрена функция запрета прохождения пучков через заданные оконтуренные структуры, которая была использована во всех планах облучения для снижения дозовой нагрузки на хрусталики.

Для критических структур, таких как легкие, кишечник и печень, не было отмечено значительных различий в результатах для двух ускорителей. Для пищевода, сердца и почек получено, что средняя доза в планах для ускорителя

Таблица 1

Результаты оценки дозиметрических характеристик

Параметр	TrueBeam	Halcyon
Длина PTV, см	67–85	
$V_{пр}$, см ³	2244–2782	
HI	0,07 [0,05; 0,08]	0,09 [0,07; 0,11]
CI	1,09 [1,07; 1,13]	1,12 [1,07; 1,16]
CO, %	98,9 [98,3; 99,5]	98,7 [97,6; 99,8]

Таблица 2

Результаты оценки дозовых нагрузок на критические органы, Гр

Критические органы	Ограничения	TrueBeam	Halcyon
Левый хрусталик	$D_{\max} < 10$ Гр	8,0 [5,3; 11,2]	10,2 [6,7; 13,6]
Правый хрусталик	$D_{\max} < 10$ Гр	7,0 [5,5; 7,8]	9,9 [5,6; 15,8]
Пищевод	$D_{\text{mean}} < 20$ Гр	18,7 [16,2; 20,0]	17,9 [16,2; 19,6]
Левое легкое	$D_{\text{mean}} < 15$ Гр	8,4 [7,3; 9,4]	8,4 [7,4; 9,3]
Правое легкое	$D_{\text{mean}} < 15$ Гр	8,9 [7,7; 9,7]	9,5 [9,2; 10,0]
Сердце	$D_{\text{mean}} < 15$ Гр	9,7 [8,2; 11,1]	8,8 [7,9; 9,7]
Печень	$D_{\text{mean}} < 20$ Гр	7,4 [6,6; 8,3]	7,9 [7,0; 9,1]
Кишечник	$D_{\text{mean}} < 15$ Гр	10,0 [8,0; 11,8]	10,7 [8,5; 12,9]
Левая почка	$D_{\text{mean}} < 10$ Гр	8,1 [6,5; 9,2]	6,5 [4,5; 7,8]
Правая почка	$D_{\text{mean}} < 10$ Гр	8,4 [6,2; 10,6]	7,0 [6,0; 8,1]

теля Halcyon меньше, чем для ускорителя TrueBeam. Максимальная доза на хрусталики на TrueBeam для всех планов прошла толерантный уровень, а на Halcyon доза оказалась выше из-за учета дозовой нагрузки от MV СВСТ в системе планирования.

При создании планов и выполнении анализа рассчитанных дозиметрических характеристик была отмечена взаимосвязь между поглощенной дозой на хрусталики и покрытием объема головного мозга. Также получено, что чем лучше выполняется критерий максимальной дозы на хрусталики, тем хуже покрытие мишени. Это обосновывает необходимость расчета дозового распределения либо с ущербом покрытия PTV, либо с риском возникновения вторичных постлучевых осложнений, что должно быть согласовано с радиотерапевтом.

Гарантия качества планов облучения

Верификация проводилась методом портальной дозиметрии, верификационные планы были рассчитаны по алгоритму AAA. Результаты рассчитанного и полученного на портальном детекторе карт флюенса оценивались с помощью гамма-анализа, используя критерии из международного протокола TG-218 по гарантии качества планов облучения с модуляцией

флюенса. После верификации планов облучения на ускорителе TrueBeam был проведен гамма-анализ по критерию $\gamma(2\%, 2\text{ мм}) > 95\%$ ($\gamma \leq 1$) как для суммарного плана, так и для областей наложения с пороговым значением 10%. Для Halcyon гамма-анализ был проведен по критерию $\gamma(2\%, 1\text{ мм}) > 95\%$ ($\gamma \leq 1$) для суммарного плана и $\gamma(1\%, 1\text{ мм}) > 95\%$ ($\gamma \leq 1$) для областей наложения с пороговым значением 10%. При выполнении портальной дозиметрии расстояние от источника до детектора составило 154 см на Halcyon и 100 см на TrueBeam.

Верификация плана является непростой задачей, т.к. в случае КСО подразумевает сложную обработку полученных данных. Все поля для спинномозгового канала были сдвинуты на необходимое расстояние относительно изоцентра в головном мозге, формируя заданную область наложения полей. Файлы с прогнозируемой дозой из системы планирования и полученной при портальной дозиметрии были экспортированы в текстовый документ. После этого полям спинномозгового канала вдоль оси Y было задано необходимое смещение (параметр Offset2). Далее был создан новый план, куда были экспортированы преобразованные файлы и создан суммарный план (пример такого плана показан на рис. 3), для которого был проведен гамма-анализ. Результаты портальной дозиметрии

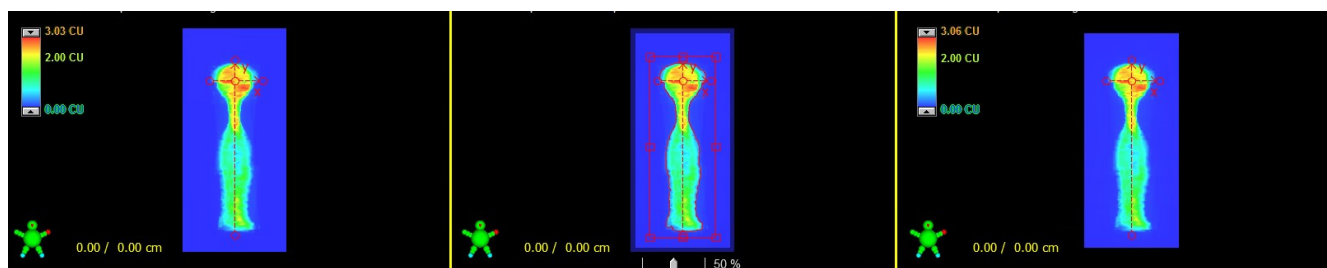


Рис. 3. Результаты верификации обработанных суммарных планов КСО

Таблица 3
Результаты верификации суммарных планов КСО

Номер пациента	TrueBeam $\gamma(2\%, 2\text{ мм})$	Halcyon $\gamma(2\%, 1\text{ мм})$
1	95,7 %	100,0 %
2	94,3 %	99,6 %
3	98,3 %	99,4 %
4	98,3 %	99,5 %
5	97,7 %	99,9 %

Таблица 4
Результаты верификации областей наложения

Изоцентры	TrueBeam $\gamma(2\%, 2\text{ мм})$	Halcyon $\gamma(1\%, 1\text{ мм})$
Наложение полей изоцентров 1 и 2	96,6 % [95,1 %; 99,0 %]	98,3 % [96,1 %; 99,9 %]
Наложение полей изоцентров 2 и 3	97,0 % [94,8 %; 98,9 %]	95,8 % [91,9 %; 97,4 %]
Наложение полей изоцентров 3 и 4	–	97,0 % [94,4 %; 98,5 %]

метрии суммарных планов и областей наложения представлены в табл. 3 и 4.

Заключение

Детальное изучение техники VMAT для проведения КСО привело к следующим выводам:

1. Наиболее информативными характеристиками при проведении сравнения качества планов КСО для двух ускорителей являются индекс гомогенности и показатели дозовых нагрузок на критические органы.
2. Дозовая нагрузка на органы риска для большинства планов на ускорителе Halcyon сравнима с данными, полученными для планов на TrueBeam.
3. По результатам верификации планов облучения было получено, что на ускорителе Halcyon гамма-анализ был пройден по более жестким критериям, чем на ускорителе TrueBeam. Это можно объяснить следующими особенностями:
 - a. для ЛУЭ Halcyon имеется готовая модель пучка Golden Beam, которая была введена производителем в планирующую систему

для уменьшения потенциальных ошибок и сокращения времени ввода в эксплуатацию, а также для точности и качества получаемых данных. У TrueBeam данная модель создается медицинским физиком самостоятельно во время проведения процедуры ввода в эксплуатацию ускорителя, после чего необходимые данные заносятся в планирующую систему;

- б. жесткое крепление портальной панели в Halcyon, которая не двигается, а у TrueBeam она подвижна, что может внести дополнительные погрешности в полученные данные;
- в. конструкция МЛК в Halcyon, где два банка лепестков, расположенных в шахматном порядке, а также большая толщина лепестков, чем у стандартного МЛК (Millenium 120-leaf MLC) TrueBeam, позволяют уменьшить межлепестковое пропускание.

По полученным результатам можно прийти к заключению, что проведение КСО на ускорителе Halcyon возможно осуществить так же качественно, как и на ускорителе TrueBeam.

Список литературы

1. Овсянников АВ, Миронова ОА. Дозиметрическое планирование краниоспинального облучения онкологических больных на линейных медицинских ускорителях. Медицинская физика, 2019.
2. Barsing S, Parab A, Singh A, Pemmaraju G. Craniospinal irradiation by volumetric modulated arc therapy technique on Halcyon, 2022.
3. Roshan S. Prabhu, Reshika Dhakal, Melanie Piantino et al. Volumetric Modulated Arc Therapy (VMAT) Craniospinal Irradiation (CSI) for Children and Adults: A Practical Guide for Implementation, 2021.
4. Yongqiang Zhou, Yao Ai, Ce Han, et al. Impact of setup errors on multi-isocenter volumetric modulated arc therapy for craniospinal irradiation, 2021.
5. Maddalo M, Benecchi G, Altabella L, et al. Automatic feathering algorithm for VMAT craniospinal irradiation: A comprehensive comparison with other VMAT planning strategies, 2020.

EVALUATION OF THE QUALITY AND COMPARISON OF DOSIMETRIC PARAMETERS OF PLANS FOR CRANIOSPINAL IRRADIATION OF PATIENTS USING VMAT METHOD AT VARIAN TRUEBEAM AND VARIAN HALCYON ACCELERATORS

A.E. Gumbatova¹, A.V. Ovsyannikov¹, I.M. Lebedenko², I.I. Luzina³

¹ Radiation Therapy Center AO "K31 City", Moscow, Russia

² N.N. Blokhin National Medacal Research Center of Oncology, Moscow, Russia

³ N.G. Chernyshevsky Saratov State University, Saratov, Russia

Purpose: To carry out a comparative analysis of the dosimetric characteristics of plans for craniospinal irradiation (CSI) performed by the VMAT technique on Varian TrueBeam and Halcyon electron accelerators.

Material and methods: Comparison of dose distributions was carried out for a group of 5 patients with tumors of the central nervous system. Contouring and planning were in Eclipse version 15.6. The following dose characteristics were calculated and evaluated: homogeneity index (HI), conformity index (CI), target coverage (CO) and constraints (lenses, esophagus, lungs, heart, liver, bowel bag and kidneys). Patient-Specific QA was performed to verify the consistency of the dose distribution calculated in the planning system and obtained at the accelerators.

Results: For all CSI plans the target coverage metric was $D_{95} > 95\%$ and constraints for critical organs were obtained. Homogeneity index was $HI \leq 0.12$ for two accelerators. The mean value of the CI conformity index was 1.09 for the TrueBeam accelerator, and $CI = 1.12$ for the Halcyon. Gamma analysis showed results within tolerance both plans at TrueBeam and Halcyon. Conclusions have been made about the advantages and disadvantages of CSI on TrueBeam and Halcyon electron accelerators.

Conclusion: It is possible to treat patients with the CSI method on the Halcyon accelerator using the VMAT method with the same quality as on the TrueBeam accelerator.

Key words: external beam radiation therapy, craniospinal irradiation, TrueBeam, Halcyon, homogeneity index, conformity index, coverage index, dense organs, portal dosimetry

E-mail: a.gumbatova@k31.ru