

## ВЕРИФИКАЦИЯ ПЛАНОВ ОБЛУЧЕНИЯ С МОДУЛЯЦИЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ VERSA HD В СООТВЕТСТВИИ С ПРОТОКОЛОМ AAPM TG-119

Ю.Б. Быкова, Н.И. Храмцова, И.И. Шуваев, Н.А. Зайцева, Р.Н. Плавник  
Национальный медицинский исследовательский центр Радиологии  
Минздрава России, Москва

**Цель:** Проверка методики ЛТМИ перед введением нового ЛУЭ Versa HD (Elekta) в эксплуатацию с использованием тестовых примеров, приведенных в отчете AAPM TG-119.

**Материал и методы:** Проведена верификация планов, созданных как на основе дозовых предписаний, данных в отчете AAPM TG-119, так и на основе ограничений, которые используются в НМИЦ Радиологии Минздрава России. Проверка планов осуществлялась с использованием матрицы ионизационных камер MatriXXEvolution, помещенной в фантом mini Phantom (IBA Dosimetry), с применением гамма-анализа 3%/3 мм и 3%/2 мм при дозовом пороге 10%. Помимо проверки совпадения рассчитанного и измеренного дозового распределения в плоскости проведено сравнение дозы в точке, рассчитанной в системе планирования Monaco (Elekta) и измеренной ионизационной камерой (ИК) CC13 (0,13 см<sup>3</sup>, IBA Dosimetry) внутри PTV и в органе риска (OR).

**Результаты:** Разница в дозе, измеренной ионизационной камерой и рассчитанной в системе планирования, составила меньше 2% и хорошо соотносится с результатами других клиник, прошедших аккредитацию. Измеренное дозовое распределение в плоскости хорошо (97–100% точек) совпало с рассчитанным для всех локализаций. Исключение составил тестовый случай с несколькими мишенями, в котором оценка осуществлялась по гамма-критерию 3%/2 мм.

**Выводы:** Полученные результаты при тестировании ЛТМИ согласно протоколу, описанному в отчете AAPM TG-119, могут быть использованы для сравнения своих результатов с результатами других клиник, прошедших аккредитацию.

Ключевые слова: лучевая терапия с модуляцией интенсивности, AAPM TG-119, гарантия качества, верификация плана

DOI: 10.52775/1810-200X-2021-92-4-39-44

### Введение

В настоящее время лучевая терапия (ЛТ) остается одним из наиболее распространенных методов лечения онкологических больных как в качестве самостоятельного, так и в составе комбинированного лечения. Все чаще выбирается ЛТ терапия с модуляцией интенсивности (ЛТМИ), во многих случаях позволяющая лучше

сберечь нормальные ткани по сравнению с 3-мерной конформной ЛТ, а также подвести более высокую дозу к мишени, что потенциально может улучшить локальный контроль над опухолью [1, 2].

В соответствии с международным стандартом после приемки новых линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) медицинскими физиками осуществляется проверка для наибо-

лее характерных для данной клиники условий их использования. В эту проверку также входит верификация планов ЛТМИ [3]. В 2009 г. создан отчет рабочей группы 119 Американской ассоциации физиков в медицине (TG-119 AAPM), в котором описаны тестовые планы для проверки методики ЛТМИ на ЛУЭ перед клиническим использованием [3]. Несмотря на время создания данного отчета, он не теряет своей актуальности и сегодня, а рекомендуемые тесты могут быть адаптированы с учетом необходимых требований и локализаций опухолей, чаще всего встречаемых у пациентов данной клиники.

## Материал и методы

На новом ЛУЭ Versa HD (Elekta) проведены тесты, предложенные производителем, и проверки, предложенные в отчете AAPM TG-198, в том числе ежегодные [4]. В качестве заключительных проведены тесты в соответствии с рекомендациям AAPM TG-119. Согласно данному отчету рекомендовано создать модельные планы облучения наиболее распространенных в клинике локализаций разного уровня сложности. В нашем случае это планы облучения опухолей в области головы-шеи, предстательной железы, мишеней в форме буквы "С", нескольких мишеней, расположенных вплотную друг к другу с разными дозовыми предписаниями. PTV и ОР предварительно оконтурены.

Оконтуривание и планирование осуществлялось на пластинчатом фантоме из твердой воды прямоугольной формы. Созданные планы удовлетворяли требованиям по дозовым ограничениям, описанным в отчете. Сравнивались рассчитанная доза в точке, находящаяся внутри PTV и в ОР, и измеренная с помощью ИК. Оценивалось совпадение измеренного и рассчитанного дозового распределения в плоскости, находящейся в объеме мишени, используя гамма-критерий 3%/3 мм и дозовый порог 10%, за пределами значения которого сравнение не производится.

Дозовые ограничения, данные в отчете для создания планов, оказались не совсем релевантными для наших клинических требований. Поэтому мы рассчитали планы с использованием как ограничений из отчета, а также тех, которые обычно используются и были ранее заведены в нашу систему планирования (СП) в виде шаблона.

Для этих измерений использован двухмерный массив ИК MatrixxEvolution (IBA Dosimetry). Созданы планы облучения с использованием чаще всего применяемой в клинике технологии VMAT. Расчет дозы осуществлялся по алгоритму X-ray Voxel MonteCarlo (XVMC, Monaco) на расчетной сетке 0,1 см. Для верификации созданных планов выбран критерий 3%/3 мм при дозовом пороге 10% и глобальная нормализация. При глобальной нормализации в знаменателе используется максимальная доза в плане. Такая нормализация проведена для того, чтобы сравнить текущие данные с результатами других клиник. Для верификации планов, созданных на основе наших внутренних ограничений, использован критерий 3%/2 мм, рекомендуемый группой AAPM TG-218 [6].

## Особенности верификации планов по протоколу AAPM TG-119

В отчете AAPM TG-119 приведен набор контрольных примеров для оценки общей точности планирования и осуществления ЛТМИ на этапе внедрения нового оборудования. Многие клиники перед вводом ЛУЭ в эксплуатацию проводят верификацию лечебных планов по тому или иному критерию. Однако у такого подхода существует недостаток, который заключается в том, что при сравнении рассчитанного двумерного дозового распределения в СП на фантоме и измеренного дозового распределения теряется пространственная информация о местоположении точек, не прошедших по выбранному критерию. В настоящее время существуют коммерчески доступные программные решения, позволяющие воссоздать трехмерное дозовое распределение в пациенте на основе полученного двухмерного. Однако не все клиники имеют в распоряжении такое программное обеспечение. Один из вариантов проверки методики ЛТМИ заключается в сравнении двумерных дозовых распределений. Также проверяется доза в точках, представляющих наибольших, как правило, внутри планируемого объема мишени (PTV) и в органе риска (ОР), с помощью ионизационных камер (ИК), что и было предложено группой AAPM TG-119.

## Результаты и обсуждение

В табл. 1 и 2 приведены результаты сравнения рассчитанной и измеренной с помощью

Таблица 1

Результаты сравнения измеренных ( $D_{изм}$ ) и рассчитанных доз ( $D_{расчит}$ ) к предписанной  $D_{предпис}$  в точке внутри PTV ( $(D_{изм} - D_{расчит})/D_{предпис}$ ) усредненные по всем аккредитованным клиникам. В последнем столбце – результат, полученный в клинике НМИЦР для каждого теста

Тест	Положение точки	Среднее значение, отн. ед.	$\sigma$ , отн. ед.	Максимальное значение, отн. ед.	Минимальное значение, отн. ед.	Наш результат, отн. ед.
Несколько мишеней	Изоцентр	0,001	0,017	0,030	-0,020	-0,010
Простата	Изоцентр	-0,001	0,016	0,022	-0,026	-0,005
Голова и шея	Изоцентр	-0,010	0,013	0,011	-0,036	0,014
Форма С	2,5 см выше изоцентра	-0,001	0,028	0,038	-0,059	-0,003

Таблица 2

Результаты сравнения измеренных ( $D_{изм}$ ) и рассчитанных доз ( $D_{расчит}$ ) к предписанной  $D_{предпис}$  в точке внутри органа риска ( $(D_{изм} - D_{расчит})/D_{предпис}$ ) усредненные по всем аккредитованным клиникам. В последнем столбце – результат, полученный в клинике НМИЦР для каждого теста

Тест	Положение	Среднее, отн. ед.	Стандартное отклонение $\sigma$ , отн. ед.	Максимум, отн. ед.	Минимум, отн. ед.	Наш результат, отн. ед.
Несколько мишеней	4 см кпереди от изоцентра	-0,008	0,019	0,014	-0,050	0,001
Простата	2,5 см ниже изоцентра	0,000	0,018	0,030	-0,025	-0,021
Голова и шея	4 см ниже от изоцентра	0,004	0,024	0,061	-0,017	0,003
Форма С	Изоцентр	0,010	0,024	0,050	-0,037	-0,014

ИК дозы в точке (они приведены в качестве примеров в TG-119), полученные в клиниках, прошедших тестирование с гетерогенным фантомом ЛТМИ. В последнем столбце представлены наши результаты. Полученная разница между рассчитанной и измеренной дозой в точке для различных тестовых случаев составляет менее 2 % и находится в соответствии с результатами, полученными в других клиниках.

В табл. 3 и 4 представлены результаты сравнения дозы в точке в планах, созданных по нашим внутренним ограничениям. Полученная разница также составляет менее 2 %.

Результаты сравнения рассчитанного и измеренного дозового распределения в плоскости для планов, созданных по предписаниям из отчёта и нашим внутренним ограничениям, представлены в табл. 5 и 6 соответственно. Совпадение рассчитанных и измеренных результатов облучения составило 97–100 %.

Единственный план, который показал несколько худшее совпадение (88 %) при использовании гамма-критерия 3 %/2 мм, состоял из трёх мишеней. Это связано с крайне высоким требованием к градиенту дозы на границе нескольких PTV, а также с тем, что для проверки планов использовалась матрица ИК с не очень высоким пространственным разрешением, расстояние между камерами которой составляет 0,762 см.

В отчёте TG-218 рекомендуется при рутинной верификации планов использовать глобальную нормализацию, а локальную применять при первоначальных проверках аппарата перед вводом в эксплуатацию. При локальной нормализации разница между измеренной и рассчитанной дозой делится на рассчитанную дозу, а не на максимальную дозу в плане как в случае глобальной нормализации. Однако, если использовать локальную нормализацию для

Таблица 3

Результаты сравнения измеренных ( $D_{изм}$ ) и рассчитанных доз ( $D_{расчит}$ ) к предписанной  $D_{предпис}$  в точке внутри PTV ( $D_{изм} - D_{расчит} / D_{предпис}$ ), для планов, созданных по внутренним дозовым ограничениям клиники НМИЦР

Тест	Положение	Наш результат, отн. ед.
Простата	Изоцентр	-0,023
Голова и шея	Изоцентр	0,001
Форма С	2,5 см выше изоцентра	0,010

Таблица 4

Результаты сравнения измеренных ( $D_{изм}$ ) и рассчитанных доз ( $D_{расчит}$ ) к предписанной  $D_{предпис}$  в точке внутри органа риска ( $D_{изм} - D_{расчит} / D_{предпис}$ ) для планов, созданных по внутренним дозовым ограничениям клиники НМИЦР

Тест	Положение	Наш результат, отн. ед.
Простата	2,5 см ниже изоцентра	0,001
Голова и шея	4 см ниже изоцентра	-0,002
Форма С	Изоцентр	-0,009

Таблица 5

Процент точек, прошедших по гамма-критерию 3 %/3 мм, усредненный по институтам для каждого тестового случая. В последнем столбце – результат, полученный в клинике НМИЦР для каждого теста

Тест	Положение	Среднее, %	Стандартное отклонение $\sigma$ , %	Максимум, %	Минимум, %	Наш результат, %
Несколько мишеней	Изоцентр	99,1	0,9	100	97,5	97,2
Простата	Изоцентр	98,0	2,24	99,8	94,2	98,2
Голова и шея	Изоцентр	96,2	3,0	100	92,4	99,7
Форма С	Изоцентр	97,6	3,9	100	88,9	99,8

Таблица 6

Процент точек, прошедших по гамма-критерию 3 %/2 мм для планов, созданных на основе внутренних ограничений НМИЦР

Тест	Положение	Количество прошедших точек, %
Несколько мишеней	Изоцентр	88,5
Простата	Изоцентр	96,5
Голова и шея	Изоцентр	96,7
Форма С	Изоцентр	98,6

проверки планов, результаты будут оставлять желать лучшего в области низких доз (далеко за пределами мишени), что связано с самим принципом локальной нормализации. В связи с этим мы использовали глобальную нормализацию для верификации планов облучения.

По нашему мнению, помимо тестирования ЛТМИ согласно описанным в отчете ограничениям, необходимо создавать тесты с использованием дозовых ограничений, которые обычно используются в данной клинике. Например, распространенный рак предстательной железы, при котором в область облучения должна входить как предстательная железа, так и регионарные лимфоузлы. Данный тип локализаций не рассматривается в AAPM TG-119. Также имеет смысл использовать для планирования не только контуры, описанные в отчёте, но и контуры реальных пациентов, созданные врачом данной клиники и перенесённые на пластинчатый фантом, и проверять планы, созданные с использованием этих контуров.

Полученные результаты совпадения рассчитанных и измеренных данных облучения для разных локализаций можно использовать в дальнейшем как опорные значения при рутинной верификации планов.

## Выводы

1. Полученное расхождение между рассчитанной и измеренной дозой в точке для разных тестовых случаев составляет менее 2 % и находится в соответствии с результатами, полученными в клиниках, приведёнными в качестве примеров в отчете TG-119.
2. При верификации планов облучения, созданных на основе предписаний TG-119, совпадение рассчитанных и измеренных данных по гамма-методу (3 %/3 мм) составило 97–100 % для всех точек. Полученные результаты хорошо коррелируют с данными отчёта.
3. При проверке планов, созданных по внутренним ограничениям клиники, совпадение рассчитанных и измеренных данных по гамма-методу (3 %/2 мм) составило 97–100% для всех точек за исключением теста с несколькими мишенями. Это можно объяснить жестким требованием к градиенту доз на границе мишеней и пространственным разрешением использованного дозиметрического оборудования.

## Список литературы

1. Lou H, Ni J. A Prospective Study of IMRT Versus 3D-CRT for Post-Operative Cervical Cancer Patients. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2018; 102(3). DOI: 10.1016/j.ijrobp.2018.06.224.
2. Jingu K, Takahashi N, Tasaka S, et al. Long-Term Change in The Oral QOL of Patients Treated with Radiotherapy for Head and Neck Cancer: Comparison of the Effects of IMRT and 3D-CRT. *Int J Radiat Oncol Biol Phys.* 2020; 108(3): e224. DOI:10.1016/j.ijrobp.2020.07.1489.
3. Ezzell G, Burmeister J, Dogan N, et al. IMRT commissioning: Multiple institution planning and dosimetry comparisons, a report from AAPM Task Group 119. *Int J Med Phys Res and Practice.* 2009;(36)11: 5359-73. DOI: 10.1118/1.3238104.
4. Hanley J, Dresser S, Simon W, et al. AAPM Task Group 198 Report: An implementation guide for TG 142 quality assurance of medical accelerators. *Int J Med Phys Res and Practice.* 2021; 48(10): e830-e885. DOI: 10.1002/mp.14992
5. Palta J, Kim S, Li J, Liu C. Intensity Modulated Radiation Therapy: The State of Art. *Med Phys.* 2003: 593-612.
6. Miften M, Olch A, Mihalidis D, et al. Tolerance limits and methodologies for IMRT measurement-based verification QA: Recommendations of AAPM Task Group No. 218. *Int J Med Phys Res and Practice.* 2018; 45(4): e53-e83. DOI: 10.1002/mp.12810.

**VALIDATION OF DOSIMETRIC COMMISSIONING ACCURACY OF IMRT FOR VERSA HD  
LINEAR ACCELERATOR WITH AAPM TG-119 PROTOCOL**

*Yu.B. Bykova, N.I. Khramtsova, I.I. Shuvaev, N.A. Zaitseva, R.N. Plavnik  
National Medical Research Center of Radiological, Moscow, Russia*

**Purpose:** Verification of the IMRT prior to the introduction the new Versa HD (Elekta) Linac into operation using test examples given in the AAPM TG-119 report.

**Materials and methods:** The verification of plans created both on the basis of the dose prescriptions given in the AAPMTG-119 report and on the basis of the constraints used in the NMRRC was made. The plans were verified using a matrix of ionization chambers (MatriXX Evolution) placed in a mini Phantom (IBA Dosimetry), using gamma criteria of 3 %/3 mm and 3 %/2 mm at a dose threshold of 10 %. In addition to checking the coincidence of the calculated and measured dose distribution in the plane, a comparison of the dose at the point calculated in the Monaco planning system (Elekta) and measured by the CC13 ionization chamber (0.13 cm<sup>3</sup>, Iba Dosimetry) inside the PTV and in the organ at risk was carried out.

**Results:** The difference in the dose measured by the ionization chamber and calculated in the planning system was less than 2 %, and correlates well with the results of accredited clinics. The measured dose distribution in the plane well (97-100 % of the points) coincided with the calculated one for all localizations. An exception was the test case with several targets, in which the assessment was carried out according to the 3 %/2 mm gamma criterion.

**Conclusions:** The results obtained when testing IMRT according to the protocol described in the AAPM TG-119 report, can be used to compare their results with the results of other accredited clinics.

**Key words:** *intensity modulated radiotherapy, AAPM TG-119, quality assurance, plan verification*

E-mail: [yulia\\_medphys@mail.ru](mailto:yulia_medphys@mail.ru)