

Анализ полученных данных показывает, что характеристики флуоресценции мТГФХ в комплексах с мономерными и полимерными ЦД существенно отличаются. Данные различия могут быть использованы для анализа скорости процессов перераспределения молекул мТГФХ между различными комплексами включения. Как видно из рис. 3, перераспределения мТГФХ из комплексов с полимерами после добавления избытка мономерного ТМ-β-ЦД сопровождается значительным снижением степени поляризации флуоресценции. Скорость этого процесса относительно невелика, так как достижение равновесного распределения требует многочасового инкубирования. Поскольку равновесие в связывании мТГФХ с мономерным ТМ-β-ЦД обычно достигается в течение 20-30 минут, полученные результаты позволяют предположить низкую скорость диссоциации молекул сенсibilизатора из состава комплексов с полимерным ЦД.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Yakavets, I.* Soret band shape indicates mTHPC distribution between β-cyclodextrins and serum proteins / I. Yakavets, I. Yankovsky, L. Bezdetnaya, V. Zorin // *Dyes and Pigments*. – 2017. – Vol. 137. – P. 299–306.

### **АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕДУР КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МЕДИЦИНСКОГО ЛИНЕЙНОГО УСКОРИТЕЛЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ TRUE BEAM STX С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ MACHINE PERFORMANCE CHECK**

### **ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF THE QUALITY CONTROL PROCEDURES OF THE TECHNICAL PARAMETERS OF THE MEDICAL LINEAR ACCELERATOR OF THE NEW GENERATION TRUE BEAM STX USING THE MACHINE PERFORMANCE CHECK SOFTWARE**

***О. А. Герцик, Е. В. Тутович, М. С. Майорова***  
***O. Gertsik, E. Shutov, M. Mayorov***

*Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской  
радиологии им. Н. Н. Александрова, г. Минск, Республика Беларусь*  
*olgera.ru@yandex.ru*

*N. N. Alexandrov National Cancer Center of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

Рассмотрена эффективность использования программного обеспечения Machine Performance Check установленного на медицинском линейном ускорителе нового поколения. Проанализированы характеристики, подлежащие программному контролю на соответствие установленным стандартным процедурам. Проведены тестовые проверки линейного ускорителя программным обеспечением, наряду со стандартными процедурами. Выявлена и обоснована необходимость совместного использования данного программного обеспечения со стандартными процедурами национальной программы гарантии качества.

This article discusses the effectiveness of using the software Machine Performance Check installed on the medical linear accelerator of the new generation. The characteristics subject to program control for compliance with the established standard procedures are analyzed. Test checks of the linear accelerator were performed by the software along with standard procedures. Identified and justified the need to share this software with the standard procedures of the national quality assurance program.

*Ключевые слова:* Machine Performance Check, медицинский линейный ускоритель, контроль качества, True Beam STx, фантом IsoCal.

*Keywords:* Machine Performance Check, medical linear accelerator, quality control, True Beam STx, phantom IsoCal.

Machine Performance Check (проверка производительности аппарата, далее MPC), – программное приложение для осуществления контроля качества следующих технических характеристик медицинского линейного ускорителя: геометрических характеристик радиационных полей облучения, характеристик системы радиационной безопасности, дозиметрических характеристик полей, а также характеристик систем управления, влияющих на условия облучения онкологических пациентов. Данное приложение проверяет работоспособность наиболее важных функций всех систем линейного ускорителя, а также позволяет выполнить проверку геометрических параметров полей облучения и оценивает стабильность пучка излучения. Результаты каждой проверки могут быть проанализированы, в том числе и с использованием полученных ранее результатов аналогичных тестов. Полученные зависимости могут быть экспортированы в одном из широко используемых цифровых форматов для последующего их анализа с использованием различных статистических моделей, в том числе и для сравнительного анализа с данными, полученными при контроле качества разных терапевтических установках.

Результаты всех проверок с использованием MPC, выполненных на аппаратах лучевой терапии сохраняются в базе данных приложения, с целью поиска погрешностей параметров радиационных полей и анализа произошедших при эксплуатации медицинского ускорителя технических неисправностей.

Необходимые инструменты:

1. Пользовательский интерфейс Machine Performance Check.
2. Фантом IsoCal с держателем.

Приложение Machine Performance Check использует интегрированную с ускорителем систему визуализации в комплексе автоматизированных проверок. Сбор данных происходит при проведении анализа параметров серии из 39 изображений (12 с кВ и 27 с МВ-детектором), полученных в предварительно определенных базовых положениях штатива ускорителя. Часть изображений получают с использованием установленного в изокентр фантома IsoCal, часть изображений без него.

Приложением выполняются анализ геометрических и дозиметрических характеристик.

Геометрические проверки предназначены для проверки изокентра радиационного пучка и его совпадения с устройствами визуализации, коллиматором, МВ-детектором, коллимирующими створками X, Y, многопластинчатой диафрагмой и положением кушетки, в том числе кушетки с шестью степенями свободы перемещений.

К дозиметрическим проверкам относится контроль стабильности радиационного пучка. Сравнивается полученный тестовый МВ снимок с базовым эталонным изображением, заданным пользователем. Для каждой тестируемой энергии выполняется отдельный интегральный снимок. Таким образом, для проведения теста на стабильность пучка, необходимо реализовать базовые изображения для каждого вида энергии. Оцениваются следующие характеристики радиационного пучка: изменение выходной мощности излучения, изменение однородности, смещение изокентра облучения.

Для проведения измерений производятся следующие действия: фантом IsoCal при помощи кронштейна MPC устанавливается на терапевтический стол, согласно расположения индексирующих пазов (рис. 1);



Рисунок 1 – Фантом IsoCal установлен для проведения теста MPC медицинско линейного ускорителя True Beam STx

На консоли управления линейным ускорителем в приложении Machine Performance Check выбирается опция Prepare (подготовка), затем устанавливаются параметры аппарата, согласно заданным (рис. 2). После разрешения на включение излучения, приложение MPC автоматически выполнит все заданные системой тесты. После завершения, полученные изображения обрабатываются приложением;



Рисунок 2 – Интерфейс приложения Machine Performance Check

Для оценки результатов открываем текущую сессию тестов в рабочем окне приложения. Зеленая галочка обозначает, что результат находится в пределах допустимой погрешности, оранжевая – результат находится на

границе допустимой погрешности, красная отметка обозначает неудовлетворительный результат теста, выходящий за пределы допустимого отклонения (рис. 3).

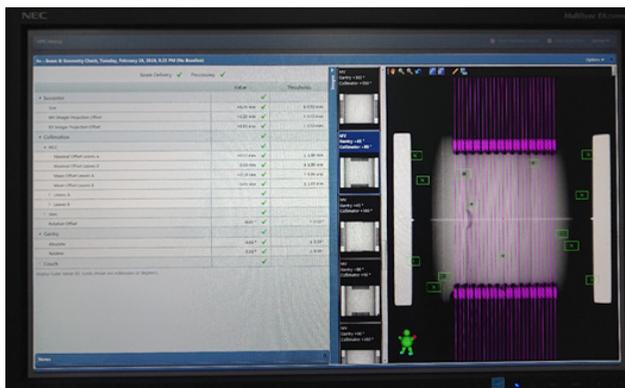


Рисунок 3 – Результаты выполненного теста МРС на медицинском линейном ускорителе True Beam STx

Данные тестов Beam Delivery и Processing указывают на успешное получение и обработку данных. Для стабильности радиационного пучка (равномерного изображения) и геометрических характеристик пучка, изоцентра, коллиматора, гентри и стола, данные теста отображаются детально. Тест, при необходимости, может быть повторен нажатием на кнопку Repeat. Наихудший результат теста используется приложением как итоговый.

Далее создается отчет о проведенной процедуре с использованием функции Create Report. После генерируется электронная версия отчета, которая будет автоматически сохранена на жесткий диск.

По окончании проверок МРС осуществляется стандартная процедура еженедельного контроля качества для медицинского линейного ускорителя электронов, согласно утвержденного протокола. Форма протокола приведена на рис. 4.

ПРОТОКОЛ			
Утвердить: _____			
Устройство	Категория	Детектирование	Результат
Измеряемость пучка на расстоянии 100 см	0,5 мм	Функционировать (+)	
Установка положения излучателя ускорителя (Фенту)	0,5 мм	отклонения $\pm 0,2$	
	0,15 мм		
	0,1 мм		
Установка положения излучателя диафрагмы (СМАЖИИ)	0,5 мм	отклонения $\pm 0,2$	
	0,15 мм		
	0,1 мм		
Горизонтальность положения диска лучевого стола		$\pm 0,5$ мм на уровне излучения	
Среднеквадратичное отклонение диска лучевого стола	1,47	отклонения $\pm 2$ мм	
	1,50		
	1,51		
Функционирование коллиматора Фенту	10°	Функционировать (+)	
	30°		
	45°		
	60°		
	75°		
	90°		
Функционирование системы для формирования пучка на расстоянии 100 см	1,5 мм	Функционировать (+)	
	1,5 мм		
	1,5 мм		
	1,5 мм		
Установка положения детектора латеральной информации (ДЛ)	0,5 мм	0,5 мм на уровне излучения	
	0,15 мм		
Положение детектора (Фенту)	1,5 мм	отклонения $\pm 2$ мм	
	1,5 мм		
Табуретки		отклонения $\pm 0,25$ мм	
Установка радиуса стола, заданная системой управления	15 и 10 см	отклонения $\pm 2$ мм	
	15 и 15 см		
	20 и 20 см		
Совпадение радиуса раздвижного диска с радиусом, установленным на дисплее компьютера для радиуса 10 и 15 см		отклонения $\pm 0,2$ мм	
Стабильность точки излучения системы при вращении функции		отклонения $\pm 1\%$	
Оптический индикатор РСИ (РСИ) при РСИ=100 см		отклонения $\pm 0,2$ мм	
Дата: _____			
Примеры проверки: _____			

Рисунок 4 – Утвержденная форма протокола еженедельного контроля качества медицинского линейного ускорителя

В течение 6 мес. для сбора данных еженедельно выполнялись МРС тесты на медицинском линейном ускорителе нового поколения True Beam STx. Совместно с тестами были проведены еженедельные стандартные проверки согласно утвержденным протоколам программы гарантии качества. Результаты были проанализированы для энергии 6 МэВ.

Геометрические проверки: девиация изоцентра радиационного пучка согласно тесту, МРС составила  $-0,23$  мм против  $0,5$  мм стандартной проверки; девиация изоцентра систем визуализации кВ и МВ  $+0,20$  мм и  $+0,19$  мм соответственно, против  $0,5$  мм и  $0,2$  мм при стандартной проверке; девиация положения кушетки по латерали, вертикали и длине  $0,01$  мм,  $0,15$  мм и  $0,1$  мм против  $0,03$  мм,  $0,1$  мм и  $0,1$  мм при стандартной проверке; девиация гентри относительно изоцентра составила  $-0,07$  мм против  $0,1$  мм при выполнении стандартной проверки.

Дозиметрическая проверка выполняется одновременно с геометрическими тестами, и не является репрезентативной для контролируемых органов при проведении оценки условий облучения онкологических пациентов, так как процедура не утверждена в национальных протоколах контроля качества радиотерапевтических установок.

Таким образом, проведение контроля качества геометрических параметров, влияющих на условия облучения онкологических пациентов, проводимая в автоматическом режиме работы линейного ускорителя, может значительно снизить затраты рабочего времени сотрудников отделений. Точность определения контролируемых параметров соответствует утвержденным протоколам программы гарантии качества. Следует отметить, что использование рассмотренного приложения MPC не должно исключать необходимости проведения стандартных процедур контроля качества.

## ЛИНЕЙНО-КВАДРАТИЧНЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ОЦЕНКИ ДОЗЫ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ОБЩЕГО ВРЕМЕНИ ОБЛУЧЕНИЯ

### APPLICATION OF THE USAGE OF LQ MODEL FOR ESTIMATION OF RADIATION DOSE WHEN OVERALL TREATMENT TIME VARIES

*Е. В. Гончарова, В. П. Зорин*  
*K. Hancharova, V. Zorin*

*Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ,  
г. Минск, Республика Беларусь  
katsiaryna.hancharova@gmail.com, vpzorin@mail.ru  
Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus*

Линейно-квадратичная модель (ЛКМ) широко используется для прогнозирования контроля опухоли и токсичности после традиционной лучевой терапии и для определения оптимального плана лечения. В этом исследовании мы анализируем применимость ЛКМ для оценки дозы при изменении общего времени лечения.

The linear quadratic model (LQ) is widely used to predict tumor control and toxicity after conventional radiotherapy and to determine the optimal treatment plan. In this study we analyze the applicability of LQ model for estimation of radiation dose when overall treatment time varies.

*Ключевые слова:* фракционирование, пролиферация, лучевая терапия, репопуляция, контроль над опухолью, лучевые повреждения.

*Keywords:* fractionation, proliferation, radiation therapy, repopulation, tumor control, radiation damage.

В лучевой терапии при выборе эффективного плана лечения из ряда альтернативных обычно используются определенные радиобиологические модели с целью количественной оценки уровней лучевого воздействия на нормальные и опухолевые ткани. При этом допустимое множество планов должно обеспечивать такие условия облучения очага опухолевого заболевания, которые приведут к необратимому разрушению опухолевого процесса без серьезных (необратимых) лучевых осложнений в нормальных органах и тканях. Относительная радиочувствительность опухолевых клеток зависит от ряда факторов: способности клеток устранять повреждение, гипоксии, периода клеточного цикла и доли растущих клеток. Кроме того, возможность ликвидации опухоли определяется ее начальным объемом.

Задача расчета изозффективных доз в лучевой терапии злокачественных опухолей при разработке и применении различных протоколов лечения в течение целого ряда лет решалась с использованием широко известных моделей НСД, КРЭ и ВДФ, разработанных применительно к универсальной соединительной ткани. Эти модели сохраняют свое значение в радиологии, но не позволяют конкретизировать характер реакции различных тканей и опухоли на облучение, учесть неполную репарацию при двух и более фракциях в день, откорректировать дозу, если первая фракция выполнена неверно. Более широкие возможности в этом плане имеет линейно-квадратичная модель (ЛКМ), основанная на теории клеточной выживаемости. Базовое уравнение, определяющее фракцию клеток  $S$ , выживших после облучения, имеет вид:

$$S(d) = \prod_{i=1}^N \exp(-\alpha d_i - \beta d_i^2) = \exp\left(-\sum_{i=1}^N (\alpha d_i + \beta d_i^2)\right), \quad (1)$$

где  $d_i$  – доза в  $i$ -ом сеансе, а  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры модели;  $\alpha$  характеризует начальный наклон кривой выживаемости и соответствует одномишенной и одноударной гибели клеток, а  $\beta$  характеризует сублетальное повреждение клеток.

Кривая выживаемости клеток графически представляет собой зависимость выжившей фракции от дозы облучения. На рис. 1 такая кривая показана в линейном, а также в полулогарифмическом масштабе. У кривой выживаемости есть плечо, за которым следует асимптотическое приближение к нулю. Для характеристики чувствительности клеток на кривой определяются значения  $ED_{50}$  или  $ED_{90}$ , которые равны доли (50 или 90 %) от полного числа клеток, убиваемых данной величиной дозы.