

## **ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МЕДИЦИНСКИХ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ НА ДОЗОВЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ С УЧЕТОМ АНАТОМИИ ПАЦИЕНТА И ПАРАМЕТРОВ ОПУХОЛИ.**

### **Часть 3. Контроль качества функционирования медицинских линейных ускорителей**

Е.В. Титович<sup>1</sup>, И.Г. Тарутин<sup>1</sup>, М.Г. Киселев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Республиканский научно-практический центр онкологии  
и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова, Минск, Белоруссия

<sup>2</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск, Белоруссия

Описана система контроля качества медицинских линейных ускорителей электронов, позволяющая оценить возможность их клинической эксплуатации путем анализа плоскостных дозовых распределений. Система основана на преобразовании опорных планов облучения фантомов, с учетом установленных зависимостей дозы от технико-дозиметрических характеристик ускорителя, результатов периодического контроля этих характеристик и коррекционных таблиц для отклонений в симметрии и равномерности пучков излучения с последующим проведением оценки отклонений в абсолютной дозе между преобразованным и опорным распределениями дозы для каждой точки в плоскости изоцентра. Показано, что использование разработанной системы позволяет учесть параметры облучаемых пациентов и мишеней при проведении периодического контроля ускорителей, выявить клинически недопустимые отклонения в дозовых распределениях и обеспечить радиационную безопасность путем осуществления независимой проверки условий лучевого лечения.

Ключевые слова: *лучевая терапия, линейные ускорители электронов, контроль качества, условия лучевого лечения, независимая проверка*

#### **Введение**

Для безопасного и точного проведения процедур лучевой терапии (ЛТ) необходима эффективная система контроля качества (КК) функционирования радиотерапевтического оборудования, которая предотвращает ошибки в лучевом лечении онкологических пациентов из-за неправильной работы линейных ускорителей электронов (ЛУЭ) [1]. Эта система должна базироваться на выполнении международных и национальных

стандартов в области ЛТ и неукоснительно выполняться в радиотерапевтических отделениях. Перечень тестов типичной системы КК приведен в Белорусском национальном протоколе функционирования медицинских ЛУЭ [2], в котором указана необходимая частота их проведения и предельно допустимые значения отклонений для каждого параметра. С целью обеспечения радиационной безопасности (снижения вероятности переоблучения) пациентов необходимо проводить регулярный КК всего процесса облучения с

использованием критериев, основанных на распределении клинических данных облучаемых пациентов [3].

Проведенные исследования позволили установить наиболее часто встречающиеся в практике онкологических учреждений Белоруссии локализации злокачественных новообразований, определить анатомические параметры пациентов с этими локализациями опухолей, оказывающие влияние на распределение дозы, создать фантомы с параметрами, соответствующими средним их значениям по выборке и установить зависимости между технико-дозиметрическими характеристиками ЛУЭ и отклонениями в доставляемых распределениях дозы с учетом параметров пациентов и облучаемых мишеней [4, 5].

Разработанная система КК функционирования ЛУЭ позволяет оценить целесообразность их клинической эксплуатации путем анализа плоскостных распределений дозы, доставляемой онкологическим пациентам. Система основана на преобразовании опорных планов облучения каждого созданного фантома с учетом установленных зависимостей дозы от технико-дозиметрических характеристик облучаемого ЛУЭ, результатов периодического КК этих характеристик и коррекционных таблиц для отклонений в симметрии и равномерности пучков. Она позволяет оценить целесообразность использования облучаемого ЛУЭ для ЛТ путем оценки отклонений в абсолютной дозе между преобразованным и опорным распределениями доз для каждой точки поля в плоскости изоцентра [4].

Внедрение такой системы позволит проводить независимый регулярный КК процедур лучевого лечения больных, выявлять клинически недопустимые отклонения в дозовых распределениях и обеспечить радиационную безопасность. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- ✓ Провести комплексную оценку возможности использования облучаемого ЛУЭ и разработать систему КК ускорителей, позволяющую оценить целесообразность их эксплуатации путем анализа плоскостных дозовых распределений.
- ✓ Оценить известные протоколы КК функционирования медицинских ЛУЭ для обеспечения радиационной защиты пациентов.
- ✓ Установить критерии определения целесообразности клинического использования об-

следуемого ускорителя на основании анализа дозовых распределений.

- ✓ Оценить результаты внедрения разработанной системы КК в клинике РНПЦ ОМР.

### **Комплексная оценка возможности клинического использования облучаемого линейного ускорителя**

В основу разработанной системы КК функционирования ЛУЭ положена оценка влияния на дозу отклонений их технико-дозиметрической характеристик, выявленных при проведении периодического КК в рамках утвержденного МЗ РБ протокола [2], в соответствии с разработанными методиками определения погрешности дозы при калибровке радиационного выхода (РВ) [4] и при проведении облучения пациентов по методам динамической ЛТ [5]. Система позволяет установить интегральную погрешность дозы при проведении калибровки РВ, а также провести оценку влияния отклонений механических параметров и дозиметрических характеристик радиационных пучков ЛУЭ на дозовые распределения, доставляемые пациентам. Кроме того, система позволяет учесть параметры пациентов и опухолевых очагов при оценке результатов КК, а также обеспечить проведение независимого регулярного КК проводимых процедур облучения.

Согласно разработанной системе КК комплексная оценка возможности клинического использования ускорителя включает в себя следующие этапы:

1. Определение в соответствии с [4] репрезентативных пациентов, создание (с применением системы планирования облучения (СП)), фантомов с анатомическими параметрами, соответствующими средним их значениям по выборке пациентов, получавших лучевое лечение в данном учреждении, и проведение моделирования условий их облучения.
2. Установление отклонений в дозе, связанных с подведением предписанного значения дозы в опорную точку гомогенного фантома, возникающих вследствие выявленных при проведении периодического КК отклонений технико-дозиметрических характеристик ЛУЭ в соответствии с [4]. Данный этап проводится с целью установления характеристик ускорителя, оказывающих доминирую-

- щее влияние на величину интегральной погрешности дозы при калибровке РВ.
3. Проведение облучения опорным значением дозы дозиметрической системы в стандартных условиях калибровки РВ. Установление истинного значения РВ и его сравнение с опорным значением дозы в точке калибровки, определенным при приемке ускорителя в эксплуатацию. В случае превышения предельно допустимого отклонения интегральной погрешности дозы ( $ERR_{total}$ ), величина которого указана в протоколе КК, используемом в учреждении (2 % для учреждений Белоруссии [2]), использование ускорителя для проведения ЛТ является неприемлемым. В таких случаях производится корректировка характеристик ЛУЭ, оказывающих влияние на величину погрешностей дозовых распределений, и производится повторная калибровка РВ. В случае непревышения отклонения  $ERR_{total}$  проводится настройка первого и второго канала мониторинга ИК для соответствия 1 МЕ дозе 1 сГр на глубине максимума ионизации на основании полученного истинного значения РВ.
  4. Определение погрешности плоскостного дозового распределения, возникающей в результате отклонений механических характеристик ЛУЭ, выявленных при проведении процедур КК, на основании преобразований с использованием СП опорных планов облучения созданных фантомов в соответствии с [5].
  5. Получение для каждого фантома поправочных таблиц, определяющих влияние симметрии и равномерности пучков облучаемых ЛУЭ на доставленное распределение дозы [5].
  6. Преобразование планов облучения с учетом отклонений дозиметрических характеристик ЛУЭ в соответствии с [5] на основании результатов КК параметров пучка излучения и таблиц для коррекции отклонений в его симметрии и равномерности.
  7. Проведение комплексной оценки влияния характеристик облучаемого ЛУЭ, его систем и пучков на величину погрешности распределения дозы, возникающей при периодическом КК, на основании анализа преобразованного и опорного дозовых распределений для каждого плана облучения фантомов с использованием специализированного программного обеспечения (Verisoft RTW или аналогичного) согласно [5].
  8. Оценка отклонений в абсолютной дозе между преобразованным и опорным распределениями дозы для каждой точки в плоскости изоцентра. В качестве критерия приемлемости применения ЛУЭ для облучения пациентов используется разница в абсолютной дозе между преобразованным и опорным распределением (процент точек, в которых разница в абсолютной дозе превышает предельно допустимое значение, должен быть не более установленной величины).
  9. При выявлении превышения допустимого значения процента точек, в которых отклонение в абсолютной дозе превосходит приемлемую величину для любого из созданных фантомов, использование ЛУЭ считается неприемлемым. В таких случаях производится корректировка характеристик ускорителя, оказывающих доминирующее влияние на величину погрешности дозовых распределений, и производится повторный КК его функционирования в соответствии с пунктами 1–8.

### **Оценка известных протоколов контроля качества медицинских ЛУЭ для обеспечения радиационной защиты пациентов**

Цель КК ЛУЭ – установление целесообразности их клинического использования для облучения пациентов путем анализа его характеристик и физических параметров, которые влияют на точность подведения дозы и обеспечение радиационной безопасности. В известных программах КК ЛУЭ используются в качестве критериев оценки возможности их клинического применения, в соответствии с результатами независимых измерений механических и дозиметрических параметров, а также с опорными значениями этих характеристик, установленными во время ввода оборудования в действие. Для получения требуемых результатов проводят тестирование технико-дозиметрических характеристик ЛУЭ с использованием специализированного оборудования. При выявлении отклонения любого из оцениваемых параметров, превышающего установленные программой КК величины, использование аппарата для проведения ЛТ считается неприемлемым.

Основным недостатком известных протоколов (программ) КК медицинских ЛУЭ [2, 3, 6–10], где в качестве критериев оценки используют недозовые величины и которые противоречат друг другу в отношении частоты проверок применяемых для этого приборов и вспомогательного оборудования, является то, что методики оценки результатов КК в них не учитывают параметры пациентов и не являются достаточными в области, касающейся вынесения решения о возможности клинической эксплуатации ЛУЭ по следующим причинам:

1. Превышение предельного отклонения только для одной (когда другие характеристики ЛУЭ не имеют отклонений от опорных значений) характеристики (например, величина углового отклонения штатива от положения “0” будет превышать 0,50), что, согласно протоколам КК, приведет к запрету использования обследуемого ускорителя. В то же время, эта погрешность не вызовет превышения предельного отклонения в определении опорного значения дозы, так как составит менее 0,2 % для фотонов 6 и 18 МВ при допустимых  $\pm 5$  %, рекомендованных в докладе МКРЕ-24 [11].
2. Имеется возможность превышения погрешности доставляемой поглощенной дозы  $\pm 5$  %, даже в случае отсутствия установленных при проведении КК превышений предельно допустимых отклонений для всех обследуемых характеристик ускорителя.

С целью установления величины такой погрешности для предельно-допустимых значений отклонений технико-дозиметрических характеристик ЛУЭ от их опорных значений для каждого из рассматриваемых протоколов КК (табл. 1) была проведена комплексная оценка возможности использования обследуемого ЛУЭ в соответствии с разработанной системой КК. Результаты, полученные с применением фантомов, соответствующих таковым для репрезентативных пациентов [4], представлены в табл. 2.

Таким образом, применение любого из рассмотренных протоколов КК не является достаточным для обеспечения радиационной безопасности пациентов. Значительные отклонения в доставляемых распределениях дозы (от 16,7 до 27,9 % точек имеют отклонение в дозе более 5 % от запланированного значения, что согласно [12–14], может привести к лучевым осложнениям в нормаль-

ных тканях) могут не учитываться при вынесении решения о пригодности аппарата для клинического использования. В связи с этим требуется внедрение независимой проверки условий проведения ЛТ. Это предполагает проведение (помимо мероприятий в рамках существующей программы КК) еще и независимой оценки целесообразности клинического применения обследуемого ЛУЭ с использованием предложенной системы КК для обеспечения радиационной защиты как пациентов, так и персонала.

### **Критерии определения целесообразности клинического применения ускорителя электронов на основании анализа дозовых распределений**

В основу предложенных критериев определения целесообразности использования обследуемого ЛУЭ положена взаимосвязь изменения клинического эффекта облучения и отклонений значений дозы, доставленной пациенту в ходе лучевого лечения, от предписанных радиационным онкологом. Их сущность заключается в том, что, согласно проведенным исследованиям в области радиационной биологии [12–14], для обеспечения контроля за распространением опухолевого процесса для большинства локализаций поглощенная доза должна быть доставлена с точностью в 7–10 %. Если предположить, что это число эквивалентно доверительной вероятности 0,95, то стандартное отклонение значения поглощенной дозы должно находиться в пределах 3,5–5 %. То же справедливо и для случаев лучевых осложнений, возникающих в результате незапланированного переобучения здоровых тканей [12–14]. В докладе МКРЕ [11] указано, что подведенная доза должна находиться в пределах 5 % от предписанной дозы (одно стандартное отклонение).

В соответствии с [15], для определения достижимых уровней процента точек, в которых поглощенная доза доставляется с требуемой точностью, для каждого фантома был проведен ретроспективный анализ результатов ежеквартального КК функционирования аппарата Trilogy № 3567 в период 2010–2014 гг. ( $N=20$ ). На основании отклонений от опорных значений технико-дозиметрических характеристик, выявленных в ходе

Таблица 1

## Характеристики ЛУ, влияющие на точность доставки дозового распределения

| Характеристики линейного ускорителя                                                   | Протоколы контроля качества линейных ускорителей для проведения сеансов динамической лучевой терапии |                         |                 |                         |                |                                  |                                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|----------------|----------------------------------|---------------------------------|
|                                                                                       | Национальный протокол Белоруссии [2]                                                                 | ГОСТ Р МЭК 60977-99 [7] | AARM TG 142 [8] | Рекомендация ВОЗ        | AARM TG 40 [3] | Национальный протокол Канады [9] | Национальный протокол Ганы [10] |
|                                                                                       | Предельно допустимое отклонение характеристики и рекомендуемый интервал проверок                     |                         |                 |                         |                |                                  |                                 |
| Точность установки нулевого положения штатива ускорителя, град.                       | ±0,5<br>неделя                                                                                       | ±0,5<br>год             | ±1<br>месяц     | ±0,5<br>год             | ±1<br>месяц    | ±1<br>месяц                      | ±1<br>месяц                     |
| Девиация изоцентра вращения штатива, мм                                               | ±2<br>квартал                                                                                        | ±2<br>год               | ±2<br>месяц     | ±2<br>год               | ±2<br>год      | ±2<br>год                        | ±2<br>неделя                    |
| Точность установки нулевого положения коллиматора ускорителя, град.                   | ±0,5<br>неделя                                                                                       | ±0,5<br>год             | ±1<br>месяц     | ±0,5<br>год             | ±2<br>месяц    | ±1<br>месяц                      | ±1<br>месяц                     |
| Девиация изоцентра вращения коллиматора ускорителя, мм                                | ±2<br>квартал                                                                                        | ±2<br>год               | ±2<br>месяц     | ±2<br>месяц             | ±2<br>год      | ±2<br>год                        | ±2<br>день                      |
| Точность показаний светового указателя расстояния источник-пациент, мм                | ±2<br>день                                                                                           | ±2<br>месяц             | ±2<br>день      | ±2<br>месяц             | ±2<br>день     | ±2<br>день                       | ±2<br>день                      |
| Точность установки размеров поля облучения, мм                                        | ±2<br>неделя                                                                                         | ±5<br>месяц             | ±2<br>день      | ±2<br>месяц             | ±2<br>месяц    | ±2<br>день                       | ±2<br>неделя                    |
| Точность установки лазерных центраторов, мм                                           | ±2<br>день                                                                                           | ±2<br>месяц             | ±1,5<br>день    | ±2<br>неделя            | ±2<br>день     | ±2<br>день                       | ±2<br>день                      |
| Точность перемещений деки терапевтического стола, мм                                  | ±2<br>неделя                                                                                         | ±5<br>месяц             | ±2<br>месяц     | ±2<br>год               | ±2<br>месяц    | ±2<br>месяц                      | ±2<br>месяц                     |
| Зависимость радиационного выхода линейного ускорителя от мощности дозы, %             | ±1<br>год                                                                                            | ±2<br>месяц             | ±2<br>месяц     | не<br>прове-<br>ряется  | ±2<br>месяц    | не<br>прове-<br>ряется           | не<br>прове-<br>ряется          |
| Точность определения проникающей способности фотонов, %                               | ±2<br>год                                                                                            | ±3<br>месяц             | ±1<br>год       | не<br>прове-<br>ряется  | ±1<br>год      | не<br>прове-<br>ряется           | не<br>прове-<br>ряется          |
| Симметрия радиационного поля, %                                                       | ±3<br>квартал                                                                                        | ±3<br>неделя            | ±1<br>месяц     | ±2<br>дважды<br>в месяц | ±3<br>месяц    | ±3<br>месяц                      | ±3<br>месяц                     |
| Равномерность радиационного поля, %                                                   | ±3<br>квартал                                                                                        | ±5<br>неделя            | ±1<br>месяц     | ±2<br>дважды<br>в месяц | ±3<br>месяц    | ±3<br>месяц                      | ±3<br>месяц                     |
| Угловая зависимость радиационного выхода линейного ускорителя при вращении штатива, % | ±2<br>год                                                                                            | ±3(2)<br>месяц          | ±2<br>год       | не<br>прове-<br>ряется  | ±2<br>год      | ±2<br>год                        | не<br>прове-<br>ряется          |
| Точность определения коэффициентов радиационного выхода, %                            | ±2<br>год                                                                                            | не<br>прове-<br>ряется  | ±2<br>год       | не<br>прове-<br>ряется  | ±2<br>год      | ±2<br>год                        | не<br>прове-<br>ряется          |
| Точность определения ЦМЕ, %                                                           | ±1<br>год                                                                                            | ±0,5<br>неделя          | ±3<br>день      | ±2<br>месяц             | ±3<br>день     | ±3<br>день                       | ±3<br>день                      |
| Точность определения дозового фактора клиновидных фильтров, %                         | ±2<br>год                                                                                            | ±2<br>год               | ±2<br>год       | ±2<br>год               | ±2<br>год      | ±2<br>год                        | ±3<br>неделя                    |

Таблица 2

**Процент точек для оценки преобразованных в соответствии со значениями характеристик ЛУЭ из табл. 1 планов облучения, в которых отклонение в абсолютной дозе не превышает 5 % от таковых значений для опорного плана облучения**

| Количество точек облучения с отклонениями в дозе <5 % | Количество точек, %          |                        |                                |      |
|-------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------|--------------------------------|------|
|                                                       | Фантом предстательной железы | Фантом молочной железы | Фантом головного мозга у детей |      |
| Национальный протокол Белоруссии [2]                  | 78,6                         | 78,1                   | 83,3                           | 82,3 |
| Гост Р МЭК 60977-99 [7]                               | 77,5                         | 77,2                   | 82,9                           | 82,2 |
| AAPM TG 142 [8]                                       | 72,7                         | 75,8                   | 82,5                           | 79,2 |
| Рекомендация ВОЗ                                      | 73,1                         | 76,3                   | 82,7                           | 80,4 |
| AAPM TG 40 [3]                                        | 72,4                         | 75,5                   | 81,8                           | 79,0 |
| Национальный протокол Канады [9]                      | 72,1                         | 75,4                   | 81,7                           | 78,5 |
| Национальный протокол Ганы [10]                       | 72,1                         | 75,4                   | 81,5                           | 77,6 |

Примечания: 1. Погрешность дозы, вызванная отклонениями в симметрии и равномерности полей облучения не учитывалась. 2. Использовалась угловая зависимость радиационного выхода аппарата Trilogy от угла наклона штатива. 3. В случаях, когда для протокола КК не указано предельно допустимое отклонение для характеристики ЛУЭ, использовалось таковое значение из национального протокола Белоруссии

проведения каждой процедуры, проведена комплексная оценка влияния характеристик аппарата, его систем и пучков на величину погрешности распределений доз, доставляемых пациентам. При проведении анализа учитывались точки, доза в которых составляла менее 0,1 % от предписанной дозы в изоцентре. С использованием результатов проведенной оценки по формуле (1) [16–17] для каждого из фантомов установлены уровни вмешательства (минимально приемлемое количество точек, в которых отклонения в дозе не превышают 5 % от предписанных значений, по отношению к общему количеству точек).

$$UB = \bar{D} - 1,96\sigma, \quad (1)$$

где UB – уровень вмешательства,  $\bar{D}$  – средний процент точек со значениями отклонений в дозе, не превышающих 5 % от предписанного значения, для всех проанализированных планов облучения, при ежеквартальном КК,  $\sigma$  – стандартное отклонение.

Количество точек, преобразованных в соответствии со значениями характеристик ЛУ, полученными в ходе проведения ежеквартального КК ЛУЭ Trilogy №3567 в 2010-2014 годах, в которых отклонение в абсолютной дозе превосходит 5 % от таковых значений для

опорного плана облучения, и установленные значения уровней вмешательства приведены в табл. 3.

В международных исследованиях по верификации динамической ЛТ [17] предельно допустимое значение процента точек, в которых поглощенная доза доставляется с требуемой точностью, составило 90–95 %. Исходя из этого, при проведении комплексной оценки влияния характеристик ускорителя на величину погрешности дозового распределения, возникающей вследствие выявленных при КК функционирования ЛУЭ, в качестве предельно допустимого предложены следующие значения отношения количества точек, в которых отклонение дозы от предписанного значения составляет менее 5 %, к общему числу точек: для фантома простаты – не менее 95,6%; для фантома молочной железы: область молочной железы – не менее 94,3 %; область надключичных лимфоузлов – не менее 93,0 %; для фантома головного мозга у детей – не менее 90,5 %.

Таблица 3

**Количество точек для оценки планов облучения  
и установленные значения уровней вмешательства**

|                                                             | Фантомы                            |                               |                                       |                                   |
|-------------------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|
|                                                             | Фантом<br>предстательной<br>железы | Фантом молочной железы        |                                       | Фантом головного<br>мозга у детей |
|                                                             |                                    | Область<br>молочной<br>железы | Область<br>надключичных<br>лимфоузлов |                                   |
| Количество точек<br>облучения с отклонениями<br>в дозе <5 % | 98,1±1,3                           | 97,2±1,5                      | 96,9±2,0                              | 95,0±2,3                          |
| Уровень вмешательства, %                                    | 95,6                               | 94,3                          | 93,3                                  | 90,5                              |

**Результаты внедрения  
разработанной системы КК  
в клинике РНПЦ ОМР**

Разработанная система внедрена в клинике РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова и используется совместно с протоколом [2] при проведении КК функционирования ЛУЭ Trilogy № 3567 с начала 2015 г., обеспечивая проведение независимой проверки условий лучевого лечения онкологических больных.

Измерения дозиметрических характеристик, определяющих форму пучка и калибровку РВ, необходимо осуществлять не реже одного раза в квартал. Проверка большого количества технико-дозиметрических характеристик и профильных и глубинных распределений дозы с применением трехмерного анализатора дозового поля занимает значительное аппаратное время. В общем случае, при проведении ежеквартального КК квалифицированными дозиметристами требуется оста-

новка лечения на один рабочий день. Принимая во внимание, что для комплексной оценки влияния параметров ЛУЭ на дозовые распределения требуется проведение дополнительных измерений симметрии и равномерности пучков [5], определена оптимальная периодичность проведения такой оценки один раз в квартал. Продолжительность проведенных в РНПЦ ОМР с использованием верификационного фантома [18] ежеквартальных измерений характеристик пучка Trilogy № 3567 для учета симметрии и равномерности составляла менее одного часа. Результаты оценки возможности клинического использования аппарата Trilogy № 3567, проведенной на основании разработанной системы КК, представлены в табл. 4 (N=4).

Таким образом, при оценке возможности клинического использования ЛУЭ Trilogy № 3567 случаи превышения установленных уровней вмешательства ни для одного из фантомов выявлены не были, что свидетельствует о том, что в РНПЦ ОМР поддерживается вы-

Таблица 4

**Результаты оценки возможности клинического использования ЛУЭ Trilogy № 3567,  
проведенной в 2015 г.**

| Количество точек с<br>отклонениями в дозе <5 % | Фантомы                                             |                                         |                         |                                                       |
|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------------|
|                                                | Фантом для<br>облучения<br>предстательной<br>железы | Фантом для облучения молочной<br>железы |                         | Фантом для<br>облучения<br>головного мозга у<br>детей |
|                                                |                                                     | Молочная<br>железа                      | Надключичная<br>область |                                                       |
| 1 квартал 2015                                 | 98,7                                                | 98,2                                    | 98,2                    | 95,1                                                  |
| 2 квартал 2015                                 | 99,1                                                | 98,5                                    | 98,3                    | 97,0                                                  |
| 3 квартал 2015                                 | 97,1                                                | 96,2                                    | 95,1                    | 93,0                                                  |
| 4 квартал 2015                                 | 97,9                                                | 97,3                                    | 97,1                    | 94,6                                                  |
| Средняя за год                                 | 98,2±0,9                                            | 97,6±1,0                                | 97,2±1,5                | 94,9±1,6                                              |

сокий уровень радиационной безопасности облучаемых пациентов. В то же время следует отметить, что при проведении ретроспективного анализа результатов за 2010–2014 гг. было выявлено 2 случая превышения уровня вмешательства. Первое превышение установлено в 2011 г. для области надключичных лимфоузлов. Было выявлено, что только 92,9 % точек имеют отклонение в дозе менее 5 %, что ниже определенного уровня вмешательства для данного фантома. Установлено, что доминирующее влияние на величину погрешности дозы в данном случае оказала симметрия пучка 6 МВ (1,9 % по оси штатив-терапевтический стол) и симметрия пучка 18 МВ (1,6 % по этой оси). Второе превышение выявлено при анализе результатов КК за третий квартал 2013 г. для фантома головного мозга. Установлено, что 90,1 % точек имели отклонение в дозе менее 5 %. Доминирующее влияние на ошибку в дозе оказала погрешность в 1,7 % при определении фактора клиновидного фильтра 300. Для других двух ЛУЭ, используемых в РНПЦ в настоящее время, проводятся измерения характеристик пучков с целью конфигурации моделей для проведения КК в СП Eclipse.

Таким образом, разработанная система независимой оценки возможности клинического использования ЛУЭ на основании анализа дозовых распределений позволяет учесть параметры пациентов и мишеней при проведении процедур периодического КК, выявить клинически недопустимые отклонения в распределении дозы и обеспечить радиационную безопасность пациентов путем осуществления независимой проверки условий ЛТ. Дополнительное машинное время, необходимое для проведения исследований симметрии и равномерности составляет менее одного часа.

## Заключение

1. Разработана система контроля качества функционирования медицинских ЛУЭ, позволяющая оценить допустимость их клинической эксплуатации при проведении ЛТ путем анализа плоскостных дозовых распределений. Система основана на преобразовании опорных планов облучения созданных фантомов, с учетом установленных зависимостей дозы от технико-дозиметрических характеристик обследуемого ЛУЭ, результатов периодического КК этих характеристик и коррекционных таблиц для отклонений в симметрии и равномерности радиационных пучков с последующим проведением оценки отклонений в абсолютной дозе между преобразованным и опорным дозовыми распределениями для точек дозового распределения в плоскости изоцентра.
2. Установлено, что использование известных протоколов КК ЛУЭ недостаточно для обеспечения радиационной безопасности пациентов, поскольку значительные отклонения в распределениях дозы (от 12 до 27,9 % точек имеют отклонение в дозе более 5 % от запланированного значения) могут не учитываться при вынесении решения о пригодности аппарата для клинического использования. В связи с этим, в отделениях, в которых применяются ЛУЭ, требуется внедрение дополнительной независимой проверки условий облучения, что предполагает проведение, помимо существующей программы КК функционирования ЛУЭ, независимой оценки целесообразности клинического применения обследуемого ЛУЭ с использованием разработанной системы для обеспечения радиационной защиты как пациентов, так и персонала.
3. При оценке целесообразности использования аппарата с применением созданных фантомов, был проведен ретроспективный анализ результатов ежеквартального КК функционирования ЛУЭ Trilogy № 3567 за период 2010–2014 гг. ( $N=20$ ). Для каждого фантома предложены минимально приемлемые значения отношения количества точек, в которых отклонение дозы составляет менее 5 % от предписанного значения, к общему числу точек: для предстательной железы – не менее 95,6 %; для молочной железы – не менее 94,3 %; для области надключичных лимфоузлов – не менее 93,0 %; для фантома головного мозга у детей – не менее 90,5 %.
4. Разработанная система внедрена в клинике РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова в Минске и используется при проведении КК функционирования ЛУЭ Trilogy № 3567 с начала 2015 г., обеспечивая независимую проверку условий лучевого лечения онко-

логических пациентов. Оптимальная периодичность проведения такой оценки составляет один раз в квартал. При оценке возможности клинического использования аппарата Trilogy № 3567 не были выявлены случаи превышения установленных уровней вмешательства ни для одного из фантомов. Однако следует отметить, что при проведении ретроспективного анализа результатов КК за 2010–2014 гг. было выявлено два случая превышения установленных уровней вмешательства, для которых были установлены технико-дозиметрические характеристики ЛУЭ, повлиявшие на величину погрешности дозы.

5. Разработанная система, базирующая на независимой оценке допустимости использования аппарата на основании анализа дозовых распределений, позволяет учесть параметры облучаемых пациентов и мишеней, выявить клинически недопустимые отклонения в распределениях дозы и тем самым обеспечить радиационную безопасность пациентов. Дополнительное машинное время, необходимое на осуществление дозиметрических проверок симметрии и равномерности радиационного пучка, составляет менее одного часа.

## **Список литературы**

1. Code of Practice for Radiotherapy Accelerators. AAPM report series No. 47 – AAPM, 1994. [Electronic resource]. – Mode of access: [https://www.aapm.org/pubs/reports/RPT\\_47.pdf](https://www.aapm.org/pubs/reports/RPT_47.pdf) – Date of access: 6.01.2016.
2. Тарутин И.Г., Страх А.Г., Гацкевич Г.В. Контроль качества медицинских ускорителей электронов. // В сб. “Контроль качества в лучевой терапии и лучевой диагностике”. – Минск: Полипринт. 2009. С. 31–66.
3. Kutcher G.J., Coia L., Gillin M., et al. Comprehensive QA for radiation oncology: Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 40 // Med. Phys. 1994. Vol. 21. P. 581–618.
4. Титович Е.В., Тарутин И.Г., Киселев М.Г. Влияние характеристик медицинских линейных ускорителей на дозовые распределения с учетом анатомии пациента и параметров опухоли. Часть 1. Отклонения механических параметров // Мед. физика. 2015. № 4(68), С. 32–41.
5. Титович Е.В., Тарутин И.Г., Киселев М.Г. Влияние характеристик медицинских линейных ускорителей на дозовые распределения с учетом анатомии пациента и параметров опухоли. Часть 2. Отклонения дозиметрических параметров // Мед. физика. 2016. № 1(69). С. 20–28.
6. Klein E.E., Low D.A., Maag D., Purdy J.A. A quality assurance program for ancillary high technology devices on a dual-energy accelerator // Radiother. Oncol. 1996. Vol. 38. P. 51–60.
7. ГОСТ Р МЭК 60977-99. Изделия медицинские электрические. Медицинские ускорители электронов в диапазоне энергий от 1 до 50 МэВ. Руководство по проверке функциональных характеристик. – М.: ИПК Изд-во стандартов. 2000. 55 с.
8. Klein E.E., Hanley J., Bayouth J. et al. Task Group 142 report: quality assurance of medical accelerators // Med. Phys. 2009, Vol. 36(9). P. 4197–4212.
9. Dunscape P., Johnson H., Arsenault C. et al. Development of quality control standards for radiation therapy in Canada // J. Appl. Clin. Med. Phys. 2007. Vol. 8(1). P. 108–118.
10. Asquah G.F., Schiestl B. Quality assurance and performance evaluation of an Elekta linear accelerator: results from over a year qa experience in Ghana // IJSBAR. 2014. Vol. 14(1). P. 354–363.
11. ICRU report 24. Determination of absorbed dose in a patient irradiated by beams of X or gamma rays in radiotherapy procedures. – Bethesda: ICRU. 1976.
12. Brahme A., Chavaudra J., Landberg T., McCullough E. et. al. Accuracy requirements and quality assurance of external beam therapy with photons and electrons // Acta Oncol. 1988. Suppl. 1.
13. Mijnheer B.J., Battermann J.J., Wambersie A. What degree of accuracy is required and can be achieved in photon and neutron therapy? // Radiother. Oncol. 1987. Vol. 8. P. 237–252.
14. Mijnheer B.J., Battermann J.J., Wambersie A. Reply to precision and accuracy in radiotherapy // Radiother. Oncol. 1989. Vol. 14. P. 163–167.
15. Титович Е.В. Верификация планов облучения по методике VMAT с использованием измерительной дозиметрической системы OCTAVIUS 4D // Мед. физика. 2014. № 4(63). С. 19–26.

16. Venselaar J., Welleweerd H., Mijnheer B. Tolerances for the accuracy of photon beam dose calculations of treatment planning systems // *Radiother. Oncol.* 2001. Vol. 60. P. 191–201.
17. Ezzell G. A., Burmeister J.W., Dogan N. et al. IMRT commissioning: multiple institution planning and dosimetry comparisons. Report from AAPM Task Group 119 // *Med. Phys.* 2009. Vol. 36(11). P. 5359–5373.
18. Титович Е.В., Тарутин И.Г., Гмырак А.И. Верификация планов облучения по методике Rapid Arc // *Мед. физика.* 2013. № 4(60). С. 12–18.

**INFLUENCE OF MEDICAL LINACS CHARACTERISTICS ON DOSE DISTRIBUTIONS  
WITH ACCOUNT OF THE PATIENTS ANATOMY AND TUMORS PARAMETERS.**

**PART 3. Quality Assurance of Medical Accelerators**

*Y.V. Tsitovich<sup>1</sup>, I.G. Tarutin<sup>1</sup>, M.G. Kiselev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus, Minsk, Belarus*

<sup>2</sup> *Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus*

A description of the quality control system of medical linacs functioning, enabling to assess the possibility of its clinical operation by analyzing planar dose distributions is provided. The system is based on the phantoms treatment plans transformation, taking into account the established dose dependence on the technical and dosimetric characteristics, the results of periodic QC of these characteristics and correction tables for variations in radiation beams symmetry and flatness, followed by an assessment of deviations in the absolute dose between transformed and the reference dose distributions for each of points in the plane of the isocenter. It is shown that the use of the developed QC system allows to take into account the parameters of the patients and targets during the periodic QC, identify clinically unacceptable deviations in the dose distribution delivered to patients and provide their radiation safety through the implementation of independent verification of the conditions of their radiation treatment.

*Key words: radiation therapy, linear accelerators, quality assurance, radiation treatment conditions, independent verification*

E-mail: [e.v.titovich@gmail.com](mailto:e.v.titovich@gmail.com)