

DOI: 10.21870/0131-3878-2020-29-4-164-172

УДК 615.849.1-71

## Анализ результатов ТЛД/РФЛД аудитов МАГАТЭ дистанционного радиотерапевтического оборудования в России за последние 20 лет

Шатёнок М.П.<sup>1</sup>, Толкачёв К.В.<sup>1</sup>, Моисеев А.Н.<sup>1,2</sup>, Кислякова М.В.<sup>3</sup>, Казанцев П.В.<sup>4</sup>,  
Рыжов С.А.<sup>1</sup>, Соколов Е.Н.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ГБУЗ «Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения г. Москвы»;

<sup>2</sup> ООО «Медскан», Москва;

<sup>3</sup> Ассоциация медицинских физиков России, Москва;

<sup>4</sup> МАГАТЭ, Вена, Австрия

Цель работы заключалась в проведении анализа результатов дозиметрических аудитов МАГАТЭ оборудования для дистанционной лучевой терапии в России за последние 20 лет (1999-2019 гг.). Анализировались результаты аудитов МАГАТЭ для пучков медицинских линейных ускорителей электронов (МЛУЭ) и гамма-терапевтических аппаратов (ГТА). Отклонение измеренной в дозиметрической лаборатории МАГАТЭ дозы от дозы, указанной пользователем, в пределах 5% считалось приемлемым. Первичный аудит был проведён при помощи 817 комплектов детекторов, из которых 430 облучено на аппаратах <sup>60</sup>Co и 387 на МЛУЭ в пучках тормозного излучения различных энергий. Дополнительно для прослеживания случаев превышения установленного толерантного уровня отклонения в 5% повторно было проверено 133 пучка, преимущественно относящихся к ГТА. В общей сложности доля пучков с отклонением более 5% составляет 9% для МЛУЭ и 27% для ГТА за весь период. Данные результаты могут быть связаны с высокой степенью изношенности парка оборудования, отсутствием персонала с необходимым уровнем квалификации на местах, отсутствием в наличии соответствующего дозиметрического оборудования. К наиболее часто встречающимся причинам неудовлетворительных результатов можно отнести несовпадение геометрии при расчёте на системе дозиметрического планирования и при облучении, а также ошибки при расчёте мониторинговых единиц (времени) для отпуска дозы на требуемую глубину. Анализ рабочих листов с ошибками показал, что чаще всего формы заполняются частично, информация об условиях облучения и расчёте дозы либо отсутствует, либо заполнена некорректно, что затрудняет анализ причин отклонений. Прослеживается положительная тенденция в результатах аудитов со временем, однако уровень ошибок всё ещё остаётся достаточно высоким по сравнению с другими странами, участвующими в аудите МАГАТЭ/ВОЗ. Для улучшения результатов и повышения качества лучевой терапии в целом необходимо расширение практики независимых аудитов в России, в том числе на национальном уровне, и с выездом специалистов в клиники. Такой подход исключит проблему коммуникации и повысит процент выявления истинных причин неудовлетворительных результатов.

**Ключевые слова:** аудит, радиотерапия, лучевая терапия, ТЛД, РФЛД, медицинский линейный ускоритель, гамма-терапевтический аппарат, дозиметрия, тормозное излучение, калибровка.

### Введение

Важным элементом обеспечения гарантии качества подведения дозы на аппаратах для дистанционной лучевой терапии является участие медицинских организаций во внешних независимых дозиметрических аудитах. Указанная практика успешно применяется во многих странах [1-3] и рекомендована ведущими ассоциациями медицинских физиков (AAPM, IOMP, EFOMP) и международными организациями (IAEA, ICRP) [4-7]. Выделяют два типа проведения независимых аудитов: с помощью удалённых методов и посредством организации выездов аудиторов непосредственно в медицинское учреждение. Служба почтовых аудитов Международ-

Шатёнок М.П.\* – эксперт; Толкачёв К.В. – эксперт; Моисеев А.Н. – эксперт, зав. отдел. ООО «Медскан», к.ф.-м.н.; Рыжов С.А. – рук. центра; Соколов Е.Н. – нач. отд. ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ». Кислякова М.В. – исполнит. директор. АМФР. Казанцев П.В. – дозиметрист по аудитам качества, член ESTRO. МАГАТЭ.

\*Контакты: 109029, Москва, ул. Средняя Калитниковская, 28, стр. 1. Тел.: +79162105028; e-mail: m.shatenok@npcmr.ru.

ного агентства по атомной энергии/Всемирной организации здравоохранения (МАГАТЭ/ВОЗ) является одной из старейших в мире и уже более 50 лет предоставляет бесплатный добровольный сервис проверки поглощённой дозы в воде в опорных условиях для пучков тормозного излучения высоких энергий с помощью термolumинесцентных дозиметров (ТЛД) [8, 9], а с 2017 г. – радиофотolumинесцентных дозиметров (РФЛД) [10]. В России дозиметрические аудиты МАГАТЭ начали проводиться в 1999 г., где Ассоциация медицинских физиков России (АМФР) выступила в роли национального координатора [11].

Цель работы заключалась в систематизации, оценке и анализе результатов проведённых дозиметрических аудитов МАГАТЭ оборудования для дистанционной лучевой терапии в России за последние 20 лет.

### Материалы и методы

В качестве исходных данных были использованы результаты аудитов МАГАТЭ, проведённых в РФ с 1999 по 2019 гг. для пучков тормозного излучения высоких энергий медицинских линейных ускорителей электронов (МЛУЭ) и гамма-терапевтических аппаратов (ГТА). Пучки ГТА имеют фиксированную энергию пучка ( $^{60}\text{Co}$ ), МЛУЭ могут иметь несколько энергий пучков. Взаимодействие клиник с МАГАТЭ проходило через локального координатора – АМФР.

В соответствии с ежегодно поданными в МАГАТЭ заявками в медицинские учреждения по почте передавались комплекты ТЛД/РФЛД, где их облучали на радиотерапевтическом аппарате в стандартизированном держателе в воде предписанной дозой 2 Гр в соответствии с расчётом мониторинговых единиц или времени облучения на системе дозиметрического планирования (СДП) или другим рутинно применяемым методом расчёта. Каждый комплект дозиметров предназначался для аудита одного пучка и включал три дозиметра: два для облучения и один для контроля фонового облучения, что позволяет выявить неверные действия пользователя, неверное хранение, учесть дозу от таможенного досмотра и так далее.

После облучения дозиметры возвращали в дозиметрическую лабораторию МАГАТЭ для определения измеренной дозы, сравнения с предписанной дозой и расчёта процентного отклонения. Отклонение измеренной от указанной пользователем дозы в пределах 5% считалось приемлемым; в случае же превышения этого предела происходило дополнительное исследование причины такого отклонения, и медицинскому учреждению предоставлялись новые комплекты дозиметров для повторного облучения.

В данной работе был проведён анализ сводных данных, содержащих информацию о годе проведения аудита, энергии пучка, предписанной и измеренной дозах, процентном отклонении, факте повторного облучения, возможной причине отклонений.

Процентное отклонение рассчитывалось в соответствии с формулой:

$$\Delta = 100\% \times \frac{D_{stated} - D_{measured}}{D_{measured}}, \quad (1)$$

где  $D_{stated}$  – доза, предписанная пользователем при облучении дозиметров;  $D_{measured}$  – среднее значение дозы двух дозиметров, измеренное в лаборатории МАГАТЭ. Отметим, что отклонение подведённой дозы от предписанной более чем на 5% может иметь клиническое значение при лечении пациентов [12].

Для статистического анализа данных использовалась программа Microsoft Excel. Значимость линейного коэффициента корреляции проверялась на основе t-критерия Стьюдента.

## Результаты

За 20 лет в аудите приняли участие 126 медицинских учреждений на территории России. Первичный аудит был проведён для 817 комплектов детекторов, из которых 430 облучено на аппаратах  $^{60}\text{Co}$  и 387 на МЛУЭ в пучках тормозного излучения различных энергий. Дополнительно, для прослеживания случаев превышения установленного толерантного уровня в 5% и выявления возможных причин было повторно проверено 133 пучка. Преимущественно, повторно проверялись пучки  $^{60}\text{Co}$  (случаи повторного аудита из-за неудовлетворительных результатов: ГТА – 103, МЛУЭ – 30).

В целом, наблюдается рост числа проводимых ежегодно аудитов. Аудит МАГАТЭ за анализируемый период проводился в среднем для 40 пучков в год. За последние 5 лет, не учитывая случаи повторного облучения, в среднем ежегодно проводился аудит уже 52 пучков.

Следует отметить, что за период наблюдения плавно снижается количество пучков в год с отклонением более 5%. К примеру, если 15-20 лет назад этот параметр достигал 50%, то за последние 5 лет относительное количество пучков, не прошедших аудит, не превышает 10%. На рис. 1 кроме числа неудовлетворительных результатов также показано относительное число  $^{60}\text{Co}$  среди всех проверенных в указанный год пучков, обе кривые аппроксимированы экспоненциальной зависимостью.

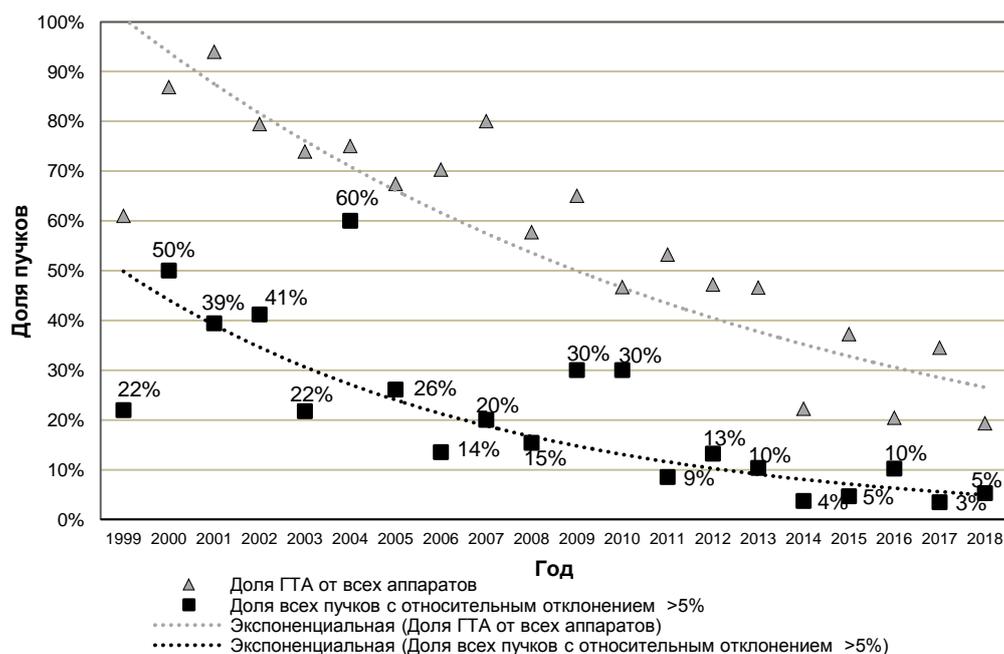
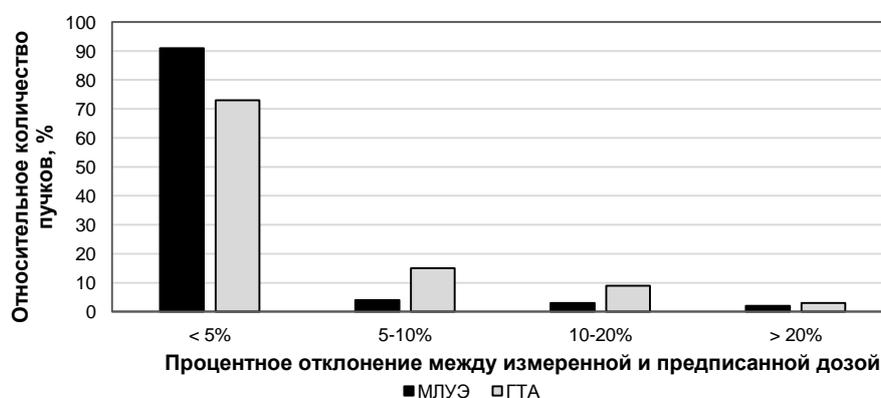


Рис. 1. Результаты ТЛД/РФЛД аудитов по годам.

Найдена высокая корреляция между снижением доли ГТА, участвовавших в аудите, и общим улучшением результатов аудита: коэффициент корреляции составил 0,76 ( $p < 0,05$ ), стандартное отклонение коэффициента корреляции – 0,33. В общей сложности доля пучков с отклонением более 5% составляет 9% для МЛУЭ и 27% для ГТА за весь период, таким образом, результаты аудитов на гамма-аппаратах были значительно хуже по сравнению с МЛУЭ. В то же время, для МЛУЭ доля негативных результатов практически не зависела от энергии проверяемого пучка (6 МВ – 9%, 10 МВ – 6%, 15 МВ – 10%, 18 МВ – 12%). Количество пучков, распределённое по диапазонам отклонений, представлено на рис. 2. Парадоксально, но ошибки в пре-

делах 5-10% имеют большее значение, чем в других диапазонах, поскольку их трудно объяснить чем-либо кроме клинически значимой систематической ошибки в калибровке аппарата. В то же время, отклонения свыше 10% зачастую связаны с ошибкой непосредственно во время аудита и не говорят о качестве лечения пациентов. Безусловно, за исключением случаев, когда, к примеру, имеет место расхождение между фактическими условиями калибровки аппарата и тем, что введено в систему планирования, согласно которой были рассчитаны мониторные единицы или время облучения дозиметра для аудита.

В качестве сравнения, по данным, приведённым в статье [8], усреднённая доля отрицательных результатов первичных аудитов МАГАТЭ среди всех стран-участниц за период 1998-2018 гг. составила 5% для МЛУЭ и 15% для ГТА. Значения по шести регионам мира (согласно делению ВОЗ) для МЛУЭ находятся в пределах от 3,3% до 6%, а для ГТА – от 6,9% до 20,7%. Европейский регион, из которого в аудитах принимают участие в основном страны бывшего социалистического блока (включая Россию), показал средний результат 3,3% для МЛУЭ и 20,7% для ГТА.

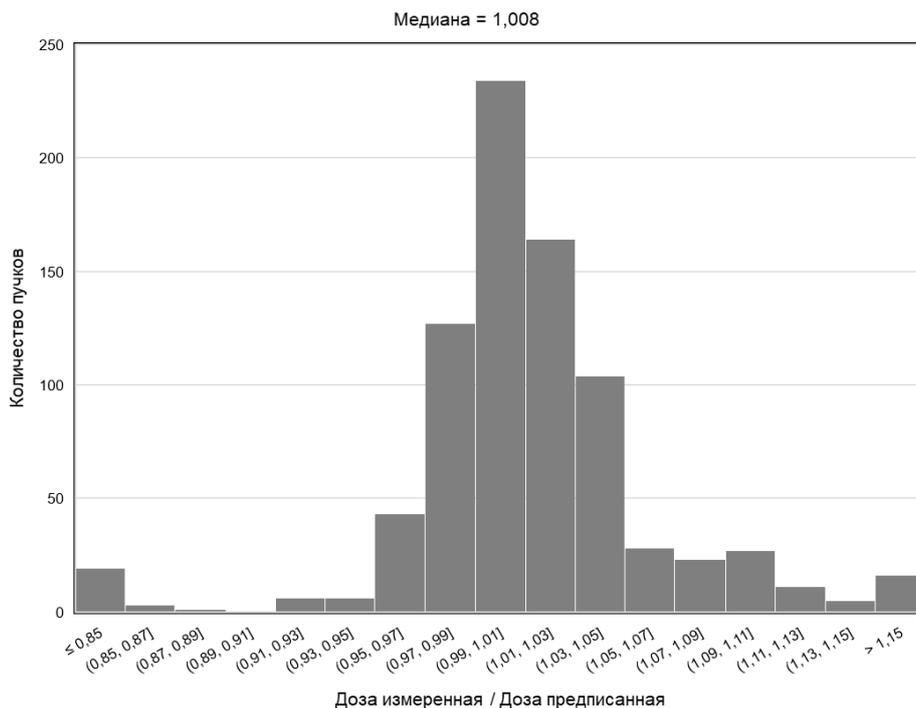


**Рис. 2.** Относительное количество пучков в зависимости от диапазона отклонений.

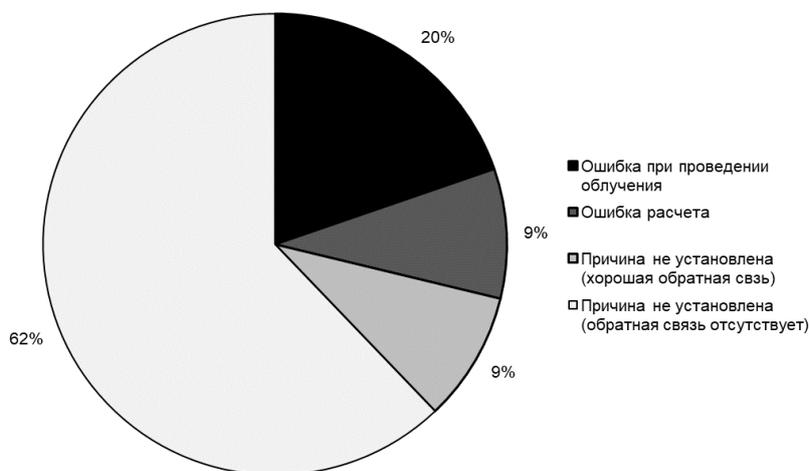
Также было проанализировано распределение общего количества пучков по диапазонам отношения измеренной дозы к рассчитанной. Если это отношение меньше единицы, то можно говорить о том, что пациент получает дозу ниже предписанной, и наоборот. Полученное распределение имеет небольшое смещение вправо (рис. 3): медиана составляет 1,008 для всех пучков, 1,000 для ускорителей и 1,020 для гамма-аппаратов, что говорит о систематическом подведении на ГТА пациентам дозы выше предписанной.

Проведён анализ причин неудовлетворительных результатов аудитов за весь период (рис. 4). К наиболее часто встречающимся причинам можно отнести ошибки при облучении ТЛД/РФЛД (в том числе из-за несовпадения геометрии при расчёте на СДП и при облучении) и ошибки при расчёте времени/мониторных единиц для отпуска дозы на требуемую глубину. Однако анализ рабочих листов с ошибками показал, что чаще всего формы заполняются частично, информация об условиях облучения и расчёте дозы либо отсутствует, либо заполнена некорректно.

Из 133 случаев повторного облучения только в 50 случаях были получены положительные результаты, в 39 – отклонение превысило 5%, в оставшихся случаях результат не был зафиксирован. Таким образом, повторный дистанционный аудит для пучков с первичным отрицательным результатом помог исправить возможную ошибку менее чем в 40% случаев. Это связано, по всей видимости, с тем, что во многих случаях участники аудита, к сожалению, не могут или не хотят разбираться в причинах ошибки.



**Рис. 3.** Распределение общего количества пучков по диапазонам отношения измеренной дозы к рассчитанной.



**Рис. 4.** Причины неудовлетворительных результатов.

Сложность коммуникации со специалистами клиник и отсутствие точной информации об условиях расчёта дозы и облучения для большинства случаев с неудовлетворительным результатом затруднил анализ причин отклонений. Причины неудовлетворительных результатов не были установлены, примерно, в 70% случаев (рис. 4). Причём в 62% случаев не удалось установить обратную связь с клиниками и всего в 9% случаев обратная связь была установлена, но даже совместно со специалистами клиник причину ошибки выяснить не удалось.

## Заключение

По результатам выполненного анализа прослеживается положительная тенденция в результатах аудитов со временем, однако уровень ошибок всё ещё остаётся очень высоким по сравнению с другими странами, участвующими в аудите МАГАТЭ/ВОЗ [8]. Это говорит о том, что регулярный аудит положительно повлиял на обеспечение гарантии качества лучевой терапии в РФ, что косвенно свидетельствует о повышении точности подводимой при радиотерапии дозы. Аргументами, снижающими ценность данного вывода, являются низкий охват аудита (только порядка 10% действующих пучков проверяется регулярно, часть пучков не проверялась ни разу (<https://dirac.iaea.org>)) и снижение доли аудитов пучков гамма-терапевтических аппаратов, результаты которых были достаточно плохими (что не говорит о снижении доли самих гамма-терапевтических аппаратов в структуре радиотерапевтического оборудования в России).

Плохие результаты для пучков  $^{60}\text{Co}$ , вероятно, связаны с высокой степенью изношенности парка аппаратов, отсутствием персонала с необходимым уровнем квалификации (медицинских физиков) на местах, отсутствием в наличии полного комплекта дозиметрического оборудования или нерегулярным его использованием для проведения процедур контроля/гарантии качества лучевой терапии. Этот вывод подтверждается статистическими данными по радиотерапевтическим отделениям Министерства здравоохранения Российской Федерации и АМФР [13].

Стоит отметить, что данный аудит ориентирован только на проверку дозы в опорных условиях, а расхождения зачастую невозможно объяснить. Низкий процент ( $\approx 30\%$ ) установления причин отклонений более 5% объясняется в первую очередь сложностью коммуникации при использованной схеме аудита. Для выяснения причин расхождения должна быть обязательно заполнена вторая часть листа, касающаяся измерения дозы ионизационной камерой, имеющейся в клинике, в условиях облучения ТЛД/РФЛД. К тому же, имеется временная задержка между облучением и результатом аудита, и за это время многое может измениться. В связи с этим представляется логичным проведение выездных аудитов, когда результат получается сразу же, и в случаях превышения толерантных уровней можно сразу же найти их причину и внести коррективы.

Для дальнейшего улучшения результатов, уменьшения вероятности возникновения радиационных происшествий и повышения качества лучевой терапии в целом, необходимо расширение практики специализированных независимых аудитов в России, в том числе на национальном уровне с выездом специалистов в клиники. Такой подход исключит проблему коммуникации и повысит процент выявления истинных причин неудовлетворительных результатов. В ряде стран обязательная практика проведения аудитов была внедрена уже после произошедших радиационных аварий в процессе подготовки и проведения лучевой терапии [14, 15]. Предлагается предпринять соответствующие действия на основании мирового опыта, не дожидаясь последствий наступления аварийных ситуаций в России.

Также с учётом широкого использования сложных методик проведения лучевой терапии (с использованием малых полей и модуляции интенсивности), выглядит целесообразным проведение независимых аудитов, учитывающих физические и клинические особенности этих методик. Закрепление обязанности по проведению контроля качества и независимых аудитов в действующих нормативно-правовых документах и установление чёткого порядка расследования выявленных отклонений от нормальной эксплуатации радиотерапевтического оборудования необходимо для повышения качества радиотерапии в России.

## Литература

1. **Izewska J., Lechner W., Wesolowska P.** Global availability of dosimetry audits in radiotherapy: the IAEA dosimetry audit networks database //Phys. Imaging Radiat. Oncol. 2018. V. 5. P. 1-4. DOI: 10.1016/j.phro.2017.12.002.
2. **Clark C.H., Aird E.G.A., Bolton S., Miles E.A., Nisbet A., Snaith J.A.D., Thomas R.A.S., Venables K., Thwaites D.** Radiotherapy dosimetry audit: three decades of improving standards and accuracy in UK clinical practice and trials //Br. J. Radiol. 2015. V. 88, N 1055. P. 1-13. DOI: 10.1259/bjr.20150251.
3. **Kry S.F., Peterson C.B., Howell R.M., Izewska J., Lye J., Clark C.H., Nakamura M., Hurkmans C., Alvarez P., Alves A., Bokulic T., Followill D., Kazantsev P., Lowenstein J., Molineu A., Palmer J., Smith S.A., Taylor P., Wesolowska P., Williams I.** Remote beam output audits: a global assessment of results out of tolerance //Phys. Imaging Radiat. Oncol. 2018. V. 7. P. 39-44. DOI: 10.1016/j.phro.2018.08.005.
4. Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna: IAEA, 2014. [Электронный ресурс]. URL: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1578\\_web-57265295.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1578_web-57265295.pdf) (дата обращения 08.10.2020).
5. ICRP, 2009. Preventing accidental exposures from new external beam radiation therapy technologies. ICRP Publication 112 //Ann. ICRP. 2009. V. 39, N 4. P. 1-87. [Электронный ресурс]. URL: [https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB\\_39\\_4](https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_39_4) (дата обращения 01.10.2020).
6. Science Council and Therapy Physics Committee of the American Association of Physicists in Medicine. Independent phantom irradiation is both necessary and cost effective for clinical trial credentialing //Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. 2015. V. 92, N 3. P. 501-503. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2015.01.021.
7. **Caruana C.J., Tsapaki V., Damilakis J., Brambilla M., Martín G.M., Dimov A., Bosmans H., Egan G., Bacher K., McClean B.** EFOMP policy statement 16: the role and competences of medical physicists and medical physics experts under 2013/59/EURATOM //Phys. Med. 2018. V. 48. P. 162-168. DOI: 10.1016/j.ejmp.2018.03.001.
8. **Izewska J., Bokulic T., Kazantsev P., Wesolowska P., van der Merwe D.** 50 Years of the IAEA/WHO postal dose audit programme for radiotherapy: what can we learn from 13756 results? //Acta Oncol. 2020. V. 59, N 5. P. 495-502. DOI: 10.1080/0284186X.2020.1723162.
9. **Izewska J., Andreo P.** The IAEA/WHO TLD postal programme for radiotherapy hospitals //Radiother. Oncol. 2000. V. 54. P. 65-72. DOI: 10.1016/S0167-8140(99)00164-4.
10. **Wesolowska P.E., Cole A., Santos T., Bokulic T., Kazantsev P., Izewska J.** Characterization of three solid state dosimetry systems for use in high energy photon dosimetry audits in radiotherapy //Radiat. Meas. 2017. V. 106. P. 556-562. DOI: 10.1016/j.radmeas.2017.04.017.
11. **Лютова Н.А., Ижевская И.** МАГАТЭ/ВОЗ программа почтового ТЛД тестирования. Результаты ТЛД тестирования пучков облучения радиологических клиник России //Медицинская физика. 2001. № 10. С. 14-21.
12. Prescribing, recording, and reporting photon beam therapy (Supplement to ICRU Report 50). ICRU Report 62 //Journal of the ICRU. 1999. V. 32, N 1. P. 1-52.
13. **Давыдов М.И., Голанов А.В., Канаев С.В., Корсунский В.Н., Костылев В.А., Матякин Г.Г., Мардынский Ю.С., Наркевич Б.Я., Паньшин Г.А., Сергиенко В.Б., Ткачев С.И., Хмелевский Е.В., Юрьева Т.В.** Анализ состояния и концепция модернизации радиационной онкологии, ядерной медицины и медицинской физики в России (краткое изложение) //Радиационная онкология и ядерная медицина. 2013. № 1. С. 5-17.
14. **Peiffert D., Simon J. M., Eschwege F.** Epinal radiotherapy accident: past, present, future //Cancer Radiother. 2007. V. 11, N 6-7. P. 309-312. DOI: 10.1016/j.canrad.2007.09.004.
15. Safety in external radiotherapy treatments //Controle Review (France). 2009. N 185. P. 1-136.

## Analysis of IAEA thermoluminescent and radiophotoluminescent postal dose audit of teleradiotherapy equipment performed in Russia over the past 20 years

Shatenok M.P.<sup>1</sup>, Tolkachev K.V.<sup>1</sup>, Moiseev A.N.<sup>1,2</sup>, Kislyakova M.V.<sup>3</sup>, Kazantsev P.V.<sup>4</sup>, Ryzhov S.A.<sup>1</sup>, Sokolov E.N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies of the Moscow Health Care Department;

<sup>2</sup> LLC «MedScan», Moscow;

<sup>3</sup> Association of Medical Physicists in Russia, Moscow;

<sup>4</sup> IAEA, Vienna, Austria

The article addresses results of IAEA thermoluminescent (TL) and radio-photoluminescent (RPL) postal dose audit of the external beam radiotherapy (EBRT) equipment, linacs and cobalt units, performed in Russia over the past 20 years between 1999 and 2019. The aim of the work was to evaluate results of IAEA dose audit: to compare the dose determined at the IAEA Dosimetry Laboratory with the dose stated by the Russian participant. The acceptable deviation between the doses is  $\leq 5\%$ . In the first-time audit 817 dosimeter sets were used, 430 of them were irradiated with  $^{60}\text{Co}$  of EBRT machines and 387 sets were irradiated with bremsstrahlung radiation of various energies. To search factors that affected the clinical dosimetry quality 133 beams, mainly  $^{60}\text{Co}$  gamma-ray beams, were retested. Over the twenty-year period a total of 9% of bremsstrahlung beams and 27% of gamma-ray beams exceeded the 5% tolerance interval. The observed deviation may be resulted from the use of outdated radiotherapy equipment, lack of *trained workers* with high-level experience and competence in medical radiology, medical physics, IT, as well as lack of appropriate dosimetry systems. The common reason of observed dosimetry audit outcomes may be the result of inconsistency between irradiation geometry calculated with the use of treatment planning system and the true irradiation geometry, as well as errors of calculation. Having assessed the worksheets we have found many partially completed sheets, information on irradiation conditions and dose calculation process was unavailable or incorrect, all mentioned made it difficult to analyze causes of observed deviations. Nonetheless, we witness a positive trend in the dose audit outcomes, at the same time, the amount of errors in Russian worksheets is still larger than in other countries-participants of the IAEA/WHO audit. It is possible to improve the radiation therapy quality and to increase radiotherapy benefits and effectiveness due to expanding the practice of autonomous auditors at the Federal and regional levels, as well as organizing of specialists' on-site visits to Radiotherapy Centers. Taking such actions makes it possible avoidance of communication problems and increase in the detection rate of true causes of observed shortcomings in clinical dosimetry quality.

**Key words:** *audit, radiotherapy, radiation treatment, TLD, RPLD, medical linear accelerator, cobalt unit, dosimetry, bremsstrahlung radiation, calibration.*

### References

1. **Izewska J., Lechner W., Wesolowska P.** Global availability of dosimetry audits in radiotherapy: the IAEA dosimetry audit networks database. *Phys. Imaging Radiat. Oncol.*, 2018, vol. 5, pp. 1-4. DOI: 10.1016/j.phro.2017.12.002.
2. **Clark C.H., Aird E.G.A., Bolton S., Miles E.A., Nisbet A., Snaith J.A.D., Thomas R.A.S., Venables K., Thwaites D.** Radiotherapy dosimetry audit: three decades of improving standards and accuracy in UK clinical practice and trials. *Br. J. Radiol.*, 2015, vol. 88, no. 1055, pp. 1-13. DOI: 10.1259/bjr.20150251.
3. **Kry S.F., Peterson C.B., Howell R.M., Izewska J., Lye J., Clark C.H., Nakamura M., Hurkmans C., Alvarez P., Alves A., Bokulic T., Followill D., Kazantsev P., Lowenstein J., Molineu A., Palmer J., Smith S.A., Taylor P., Wesolowska P., Williams I.** Remote beam output audits: a global assessment of results out of tolerance. *Phys. Imaging Radiat. Oncol.*, 2018, vol. 7, pp. 39-44. DOI: 10.1016/j.phro.2018.08.005.

Shatenok M.P.\* – Expert.; Tolkachev K.V. – Expert.; Moiseev A.N. – Expert, Head of Dep. (MedScan), C. Sc., Phys.-Math.; Ryzhov S.A. – Head of Centre; Sokolov E.N. – Head of Dep. RPCCDT. Kislyakova M.V. – Executive Director. AMPR. Kazantsev P.V. – Dosimetrist on quality audits, ESTRO Member. IAEA.

\*Contacts: 28, 1 Srednyaya Kalitnikovskaya str., Moscow, Russia, 109029. Tel.: +79162105028; e-mail: m.shatenok@npcmr.ru.

4. Radiation protection and safety of radiation sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna: IAEA, 2014. Available at: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1578\\_web-57265295.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1578_web-57265295.pdf) (Accessed 08.10.2020).
5. ICRP, 2009. Preventing accidental exposures from new external beam radiation therapy technologies. ICRP Publication 112. *Ann. ICRP*, 2009, vol. 39, no. 4, pp. 1-87. Available at: [https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB\\_39\\_4](https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_39_4) (Accessed 01.10.2020).
6. Science Council and Therapy Physics Committee of the American Association of Physicists in Medicine. Independent phantom irradiation is both necessary and cost effective for clinical trial credentialing. *Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 2015, vol. 92, no. 3, pp. 501-503. DOI: 10.1016/j.ijrobp.2015.01.021.
7. **Caruana C.J., Tsapaki V., Damilakis J., Brambilla M., Martín G.M., Dimov A., Bosmans H., Egan G., Bacher K., McClean B.** EFOMP policy statement 16: the role and competences of medical physicists and medical physics experts under 2013/59/EURATOM. *Phys. Med.*, 2018, vol. 48, pp. 162-168. DOI: 10.1016/j.ejmp.2018.03.001.
8. **Izewska J., Bokulic T., Kazantsev P., Wesolowska P., van der Merwe D.** 50 Years of the IAEA/WHO postal dose audit programme for radiotherapy: what can we learn from 13756 results? *Acta Oncol.*, 2020, vol. 59, no. 5, pp. 495-502. DOI: 10.1080/0284186X.2020.1723162.
9. **Izewska J., Andreo P.** The IAEA/WHO TLD postal programme for radiotherapy hospitals. *Radiother. Oncol.*, 2000, vol. 54, pp. 65-72. DOI: 10.1016/S0167-8140(99)00164-4.
10. **Wesolowska P.E., Cole A., Santos T., Bokulic T., Kazantsev P., Izewska J.** Characterization of three solid state dosimetry systems for use in high energy photon dosimetry audits in radiotherapy. *Radiat. Meas.*, 2017, vol. 106, pp. 556-562. DOI: 10.1016/j.radmeas.2017.04.017.
11. **Lytova N.A., Izewska J.** IAEA/WHO postal TLD audit program. TLD audit results of radiotherapy beams in Russia. *Meditinskaya fizika – Medical Physics*, 2001, no. 10, pp. 14-21. (In Russian).
12. Prescribing, recording, and reporting photon beam therapy (Supplement to ICRU Report 50). ICRU Report 62. *Journal of the ICRU*, 1999, vol. 32, no. 1, pp. 1-52.
13. **Davydov M.I., Golanov A.V., Kanaev S.V., Korsunskiy V.N., Kostylev V.A., Matyakin G.G., Mardynskiy Y.S., Narkevich B.Ja., Panshin G.A., Sergienko V.B., Tkachev S.I., Khmelevskiy E.V., Yurieva T.V.** Status analysis and concept of radiation oncology, nuclear medicine and medical physics modernization in Russia (summary). *Radiatsionnaya onkologiya i yadernaya meditsina – Radiation Oncology and Nuclear Medicine*, 2013, no. 1, pp. 5-17. (In Russian).
14. **Peiffert D., Simon J. M., Eschwege F.** Epinal radiotherapy accident: past, present, future. *Cancer Radiother.*, 2007, vol. 11, no. 6-7, pp. 309-312. DOI: 10.1016/j.canrad.2007.09.004.
15. Safety in external radiotherapy treatments. *Controle Review (France)*, 2009, no. 185, pp. 1-136.