

легкого и статистически значимо превышал аналогичный показатель при коллагеназо-опосредованном выделении клеток ($3,9(2,8\div 5,0) \times 10^6/\text{г}$), $p=0,02$, U -критерий Манна-Уитни.

Для выделения альвеолярных эпителиальных клеток легочной ткани используют ряд методических подходов, основанных на фильтровании с использованием фильтров с диаметром пор 100-150 мкм, а также фильтра с нейлоновой сеткой от 20 до 50 мкм [5]. Добавление этапа фильтрования клеточных суспензий, полученных после ферментативной обработки ткани, через поры диаметром 100 мкм и 50 мкм обеспечивало эффективное удаление эритроцитов, клеточного дебриса и поврежденных клеток. Количество жизнеспособных (негативных по аннексину V и пропидий йодиду) клеток во всех полученных культурах колебалось от 91,0% до 98,5% и составляло по медиане 94,6 (92,1÷97,9) %.

Заключение. Метод, включающий механическую дезагрегацию ткани легкого с последующей обработкой полученных эксплантов 0,25% раствором трипсина в сочетании с фильтрованием клеточной суспензии через поры диаметром 100 мкм и 50 мкм, позволяет выделить достаточное количество жизнеспособных альвеолярных эпителиальных клеток ($6,8(5,4\div 7,5) \times 10^6$ клеток/грамм). При культивировании в стандартных условиях в культуры визуализируются активно делящиеся округлые альвеолоциты и клетки с кубоидной или полигональной морфологией, характеризующиеся высокой секреторной активностью. Примесь фибробластоподобных клеток не превышает 5%. Культуры альвеолярных эпителиальных клеток является уникальной модельной системой для изучения патогенетических процессов на молекулярно-клеточном уровне, для оценки эффективности лекарственных средств и разработки новых терапевтических подходов, а также могут использоваться в целях регенеративной медицины, в том числе для создания тканеинженерных конструкций.

Работа выполнена в рамках гранта Министерства образования Республики Беларусь на 2021 год.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Carcattera, M.* Alveolar epithelial cell type II as main target of SARS-CoV-2 virus and COVID-19 development via NF-Kb pathway deregulation: A physio-pathological theory / M. Carcattera, C. Caruso // *Med Hypotheses*. – Vol. 146. – 2021. – e.110412.

2. *Miura, T.A.* Respiratory epithelial cells as master communicators during viral infection / T.A. Miura // *Curr Clin Micro Rpt*. – Vol. 6. – 2019. – P. 10 – 17.

3. *Chuquimia, O.D.* Alveolar epithelial cells are critical in protection of the respiratory tract by secretion of factors able to modulate the activity of pulmonary macrophages and directly control bacterial growth / O.D. Chuquimia, D.H. Petursdottir, N.Periolo, C. Fernandez // *Infection and Immunity*. – Vol. 81 (1). – 2012. – P. 381 – 389.

4. *Hiemstra, P.S.* Human lung epithelial cell cultures for analysis of inhaled toxicants: Lessons learned and future directions / P.S. Hiemstra, G. Grootaers [et al.] // *Toxicology In Vitro*. – Vol. 47. – 2018. – P. 137 – 146.

5. *Lee, D.F.* Isolation and characterization of alveolar type II pneumocytes from adult bovine lung / D.F. Lee, F.J. Salguero, D. Grainger [et al.] // *Sci Rep*. – Vol. 8. – 2018. – e.11927.

6. *Gonzalez, R.F.* Isolation and culture of alveolar epithelial type I and type II cells from rat lungs / R.F. Gonzalez, L.G. Dobbs // *Methods Mol Biol*. – 2013. – Vol. 945. – P. 145 – 159.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОННОГО ДЕТЕКТОРА ПОРТАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИИ

QUALITY CONTROL OF THE ELECTRONIC PORTAL IMAGE DETECTOR

A. A. Шиш¹, Т. С. Чукова²

A. A. Shish¹, T. S. Chikova²

*¹Республиканский научно-практический центр онкологии
и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова
г. Минск, Республика Беларусь
dorohegoro1315@gmail.com*

*²Белорусский государственный университет, МГЭИ им.А. Д. Сахарова БГУ,
г. Минск, Республика Беларусь
chts@tut.by*

¹State institution «N. N. Alexandrov National Cancer Centre»

²Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus

Важным элементом современного высокотехнологичного радиотерапевтического комплекса на базе линейного ускорителя электронов является электронный детектор портальных изображений. Он обеспечивает точность позиционирования пациента на лечебном столе, соответствие доставляемого дозового распределения запланированному, позволяет выполнить быструю и точную верификацию лечебных планов с объемной

модуляцией интенсивности облучения. Рассматриваются основные положения контроля качества электронного детектора порталных изображений. Показано, что он включает следующие этапы: установка и ввод оборудования в эксплуатацию; контроль дозы облучения; калибровка; проверка качества клинических изображений; тестирование программного обеспечения; разработка программы гарантии качества, обеспечивающей эффективность и надежность условий облучения пациентов в курсе лучевой терапии.

An important element of a modern high-tech radiotherapy complex based on a linear electron accelerator is an electronic detector of portal images. It ensures the accuracy of the patient's positioning on the treatment table, the compliance of the delivered dose distribution with the planned one, and allows for fast and accurate verification of treatment plans with volumetric modulation of the radiation intensity. The main provisions of the quality control of the electronic portal image detector are considered. It is shown that it includes the following stages: installation and commissioning of equipment; radiation dose control; calibration; quality control of clinical images; software testing; development of a quality assurance program that ensures the effectiveness and reliability of the patient's radiation conditions in the course of radiation therapy.

Ключевые слова: онкология, лучевая терапия, линейный ускоритель, электронный детектор порталных изображений, визуализация изображения, распределение дозы, верификация.

Keywords: oncology, radiation therapy, linear accelerator, electronic portal imaging, image visualization, dose distribution, verification.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2021-2-138-142>

Введение

В настоящее время наиболее эффективную высококвалифицированную лечебную помощь онкологическим больным обеспечивает облучение злокачественных новообразований с применением линейных ускорителей электронов. Медицинский линейный ускоритель представляет собой радиотерапевтический комплекс, в котором отсутствуют радиоактивные элементы, а высокая концентрация радиации в области новообразования создается облучением узконаправленными лучами. В отличие от традиционного лучевого облучения линейный ускоритель дает более точную фокусировку излучения в теле облучаемого пациента, позволяет контролировать количество отпущенной дозы и распределение дозы в зоне опухоли во время сеанса, значительно уменьшает время воздействия облучения, минимизирует повреждение здоровых тканей организма и, как следствие, сокращает длительность лечения и периода реабилитации.

Качество лучевой терапии злокачественных опухолей и обеспечение наилучших мер радиационной защиты пациентов при ее проведении в определяющей степени зависят от высокой точности рабочих параметров всех элементов радиотерапевтической техники и прецизионной работы линейного ускорителя в целом. По мере совершенствования высокотехнологической лучевой техники разработка методов и устройств контроля качества характеристик современных медицинских ускорителей электронов является актуальнейшей проблемой медицинской физики в мире.

Все преимущества использования технологии лечения с объемной модуляцией интенсивности облучения могут быть реализованы только в том случае, если во время сеанса облучения на целевые и нормальные ткани организма будут доставлены дозы облучения, предписанные планирующей системой. Наличие серьезных различий между дозой, установленной планирующей системой, и распределением дозы, фактически полученным пациентом, могут поставить под угрозу или свести на нет ожидаемый позитивный эффект от лучевой терапии. При проведении курса лучевой терапией под визуальным контролем управление облучением осуществляется с учетом координат фактического плана лучевой терапии на основании использования получаемых изображений. Система порталных изображений является современным техническим средством радиотерапии, способствующим повышению ее эффективности за счет контроля наиболее ответственных звеньев лечебного процесса.

Электронный детектор порталных изображений (ЭДПИ) является эффективным и действенным средством определения точности позиционирования пациента, он обеспечивает возможность проведения процедуры верификации лечебных планов с объемной модуляцией интенсивности облучения.

В Республиканском научно-практическом центре онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова используется электронный детектор порталных изображений aS1000 компании Varian Medical Systems, интегрированный с медицинскими линейными ускорителями Trilogy, Unique и TrueBeam. Он представляет собой расположенный на выходе из тела пациента плоскостанельный детектор из аморфного кремния, смонтированный на механическом манипуляторе E-ARM, который регистрирует изображение внутренней структуры тела пациента в терапевтическом фотонном пучке [1, 2].

Проверка укладки пациента обычно включает сравнение изображения, полученного с помощью ЭДПИ с эталонным изображением, которое создается до начала лечения. Эталонное изображение может быть киловольтным (например, симуляционные снимки), мегавольтным или цифровой реконструкцией рентгеновских снимков (DRR) [3].

Качество изображений, полученных с помощью мегавольтного фотонного излучения, по своей природе хуже, чем качество изображений, полученных с помощью рентгеновского киловольтного излучения. Помимо хорошо известного уменьшения контраста объекта (например, дифференциального затухания между костью или воздухом и мягкими тканями) многие другие факторы по мере увеличения энергии рентгеновского излучения способствуют более низкому качеству портальных изображений. К ним относятся характеристики приемника изображения, рассеяние рентгеновского излучения в теле пациента, размер источника рентгеновского излучения и положение приемника изображения.

Контроль позиционирования пациента не единственная функция электронного детектора портальных изображений, наибольший интерес вызывает контроль дозы, фактически доставленной в зону опухоли и нормальную ткань. Еще в самых ранних работах изучались характеристики различных ЭДПИ для измерения доставляемой дозы. Эти исследования показывают, что при надлежащей калибровке ЭДПИ для создания изображения можно использовать выходную дозу в пределах 2–5% от значений, рассчитанных планирующей системой [3]. Такая возможность использования электронного детектора портальных изображений позволила ему стать важным инструментом проверки и анализа протоколов лечебных планов с объемной модуляцией интенсивности облучения.

К применению любой новой технологии, пусть даже рассчитанной на достижения простой цели, нельзя относиться легкомысленно. Прежде чем успешно внедрить новую технологию в практику, необходимо установить конкретные цели установки, клинические процедуры и протоколы гарантии качества. Понимание того, как новая технология вписывается в клинический процесс и влияет на него, имеет первостепенное значение для успешного внедрения его в практику долгосрочного использования.

Установка и ввод в эксплуатацию электронного детектора портальных изображений

Во время установки/приемки электронного детектора портальных изображений проверяются следующие его характеристики: механическая и электрическая безопасность, геометрическая воспроизводимость, качество изображения и характеристики программного обеспечения. После приемки и ввода в эксплуатацию контролируются эксплуатационные характеристики, относящиеся к клиническому использованию. Однако некоторые элементарные аспекты безопасности ЭДПИ всегда следует проверять, даже если устройства не используются регулярно. К ним относятся:

- Механическая стабильность и целостность корпуса ЭДПИ. Среди рисков при невыполнении этого требования наибольшая опасность состоит в том, что во время вращения гентри ускорителя устройство можно уронить на пациента или медицинский персонал. Особое внимание следует уделять проверке крепления съемных ЭДПИ и исправности механического манипулятора для выдвижных или подвижных электронных детекторов портальных изображений.
- Работа системы обнаружения столкновений. При неисправности этой системы самая серьезная потенциальная опасность состоит в столкновении электронного детектора портальных изображений с пациентом.
- Электрическая изоляция/заземление. Очевидно, что при отсутствии или нарушении заземления и изоляции возможно поражение пациента или медицинского персонала электрическим током. Постоянно необходимо проверять изоляцию источника питания и кабели подключения к детектору. Любой движущийся кабель или кабели, которые потенциально могут коснуться пациента или медицинского персонала, следует визуально проверять один раз в месяц [3].

Контроль дозы

Оптимизация дозы, необходимой для получения изображения, важна и зависит от применения и характеристик самого ЭДПИ. Неправильный контроль дозы может привести к невозможности получения проверочного изображения в заранее установленной дозе. В следствие чего возникает необходимость повторного получения изображения, что в свою очередь увеличивает дозную нагрузку на пациента.

Следует также проверять правильность получения изображения с помощью различных аттенуаторов или антропоморфного фантома [2].

Калибровка

Для большинства систем ЭДПИ требуется своеобразная калибровка изображения. Калибровка позволяет получить поправочные коэффициенты и измерить характеристики ускорителя и ЭДПИ [3], которые способствуют улучшению качества получаемого изображения при повседневном использовании. Часто фоновые сигналы вычитаются, а неоднородность отклика, связанная с характеристиками пучка линейного ускорителя, сокращается. Следует знать, что необходимо минимизировать шум на калибровочных изображениях, поскольку он неизбежно снижает качество клинического изображения.

ЭДПИ должен быть откалиброван для различных условий получения клинических изображений. Процедуры калибровки зависят от типа электронного детектора портальных изображений и рекомендаций производителя [3], однако в любом случае они включают облучение ЭДПИ при определенных условиях.

Калибровка обычно включает измерение темнового тока или шумового изображения. Шумовое изображение представляет собой сигнал, присутствующий в ЭДПИ даже в отсутствии излучения. Далее следует получение изображения полностью открытого поля. Изображение открытого поля используется для корректировки воспро-

изводимых специфических характеристик лечебного поля, таких как изменение интенсивности в профиле пучка. Поскольку характеристики пучка могут зависеть от энергии пучка и размера поля, необходимо также выполнить калибровку при различных энергиях и размерах поля.

Поскольку в некоторых случаях рассеяние и затухание, вносимые пациентом, могут повлиять на качество изображения, поэтому при калибровке должны также учитываться размеры пациента и расстояние от пациента до детектора.

Получение тестового изображения должно выполняться с использованием свежей калибровки электронного детектора портальных изображений, чтобы гарантировать отсутствие артефактов из-за нестабильности ускорителя или объектов в пучке. Частота повторной калибровки зависит от измеренной стабильности качества изображения и от механической устойчивости устройства. Как правило она осуществляется ежемесячно.

Качество изображения

Качество клинических изображений определяется пространственным и контрастным разрешением. Все современные электронные детекторы портальных изображений обеспечивают контрастное разрешение 1 % или выше для более крупных объектов (>5 мм). Такое качество контрастного разрешения достаточно при выполнении локализации портала для большинства лечебных полей.

Фантом Лас-Вегас (рисунок 1) [3] используется при приемочных испытаниях и при последующем контроле качества.

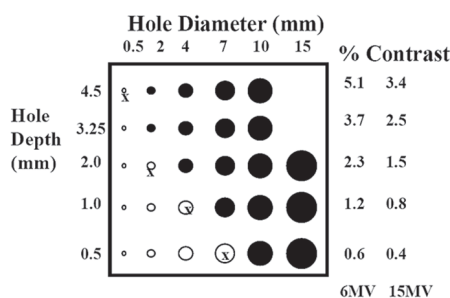


Рис. 1 – Алюминиевый фантом Лас-Вегас для контрастности и пространственного разрешения изображения полученного ЭДПИ

Он состоит из отверстий различных глубин и диаметров, встроенных в алюминиевый блок, которые представляют собой эталоны пространственного и контрастного разрешения. Визуализация определенного отверстия подразумевает определенное разрешение для заданной комбинации линейного ускорителя/ЭДПИ. Правильно настроенные ЭДПИ при использовании пучка фотонов энергией 6 МэВ обычно позволяют увидеть 17 заполненных отверстий из 28 изображенных на рисунке 1. Новейшие детекторы с плоской панелью способны визуализировать все отверстия [3].

Шалев и его коллеги [4] представили фантом и программный инструмент, который позволяет количественно определить разрешение ЭДПИ с помощью воспроизводимого протокола. Полученные значения могут использоваться в качестве базовых для приемных испытаний и постоянного контроля качества любого ЭДПИ.

Независимо от того, какой фантом и программное обеспечение используется для количественного анализа, исходные изображения, полученные во время приемки, являются исходными для постоянного контроля качества ЭДПИ.

Программное обеспечение

Ввод в эксплуатацию программного обеспечения включает тестирование таких функций, как управление ЭДПИ/линейным ускорителем, сетевые соединения, хранение, архивирование, поиск и резервное копирование, функции безопасности и инструменты анализа. Процесс ввода в эксплуатацию должен включать понимание и определение ограничений источников эталонных изображений (симуляторов, DRR и т.д. [3]), поскольку ошибки, связанные с положением полей, определяются путем сравнения изображений, полученных ЭДПИ, с эталонными изображениями.

Гарантия качества

Для поддержания работоспособности медицинского линейного ускорителя, при которой его технико-дозиметрические характеристики соответствуют опорным значениям, установленным во время ввода оборудования в эксплуатацию, включая эффективное функционирование электронного детектора портальных изображений необходимо создать программу гарантия качества, обеспечивающую эффективность и надежность условий облучения пациентов в процессе лечения. Такая программа должна определять конкретные верификационные мероприятия, частоты проверок и предельно допустимые отклонения контролируемых характеристик.

Частые (например, ежедневные) процедуры гарантия качества включают меры безопасности, такие как механическая целостность оборудования, блокировки аппаратуры при столкновении (функционирование), позици-

онирование (≤ 2 мм для не стереотаксического аппарата и ≤ 1 мм для стереотаксического) и совпадение системы координат детектора и лечебного поля линейного ускорителя (≤ 2 мм для не стереотаксического аппарата и ≤ 1 мм для стереотаксического) [5]. Операционные проверки и проверки изображений выполняются путем визуализации фиксированного фантома установленной геометрии с заданной дозой. Это позволяет быстро оценить работоспособность ЭДПИ и качество получаемого изображения.

Ежемесячный контроль качества включает также проверку технической безопасности и механической целостности. Такие параметры как, пространственное разрешение, контрастность, равномерность и шумы должны определяться специально для каждого типа ЭДПИ и для каждого отдельного лечебного учреждения с учетом его оснащенности.

Для отслеживания тенденции ухудшения качества изображения следует анализировать ежедневные результаты контроля качества. Кроме того, периодически (например, ежемесячно) следует подвергать контролю обслуживание диска и базы данных.

Быстрая проверка производительности программного обеспечения для выполнения количественного измерения должна проводиться ежегодно. Контроль качества программного обеспечения должен выполняться также при выходе обновлений программного ресурса, а также при каких-либо изменениях в системе ЭДПИ.

Заключение

При выполнении программы гарантии качества ЭДПИ является быстрым, достаточно точным и простым методом верификации лечебных планов с объемной модуляцией интенсивности облучения. Технология ЭДПИ является важным инструментом для оценки точности позиционирования пациента на лечебном столе; определения соответствия доставляемого дозового распределения и распределения, предписанного планирующей системой; обеспечения высокого качества характеристик медицинского линейного ускорителя и, как следствие, служит гарантом эффективности лечения онкологических больных.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Титович, Е. В.* Оптимизация программы гарантии качества облучения пациентов по методике IMRT / Е.В. Титович, И.Г. Тарутин, А.А. Жигун // Медицинская физика. 2014;4:14–21.
2. *Тарутин, И. Г.* Применение линейных ускорителей электронов в высокотехнологичной лучевой терапии / И.Г.Тарутин, Е.В. Титович. – Минск: Белорусская наука, 2014. – 176 с.
3. *Herman MG.* Clinical use of electronic portal imaging: Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group 58 / Michael G. Herman [et al.] // Medical Physics. 2001;1(2):38–57.
4. *Herman MG.* Guide to clinical use of electronic portal imaging / Michael G. Herman [et al.] // Journal of Applied Clinical Medical Physics. 2000;1(2):38–57.
5. *Klein EE.* Task Group 142 report: Quality assurance of medical accelerators / Eric E. Klein [et al.] // Medical Physics. 2009;36:4197–4212.

КОНТРОЛЬ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ В ОТДЕЛЕНИИ РАДИОИЗОТОПНОЙ ДИАГНОСТИКИ CONTROL AND QUALITY ASSURANCE OF DIAGNOSTIC EQUIPMENT IN THE RADIOISOTOPE DIAGNOSTICS DEPARTMENT

Д. В. Шпак, Т. С. Чикова
D. V. Shpak, T. S. Cyikova

*Белорусский государственный университет, МГЭИ им. А.Д. Сахарова БГУ,
г. Минск, Республика Беларусь
101dashka@mail.ru
Belarusian State University, ISEI BSU, Minsk, Republic of Belarus*

Метод радионуклидной диагностики онкологических заболеваний, основанный на регистрации излучений при введении в организм больного радиофармпрепаратов, является одним из наиболее высокочувствительных и эффективных. Однако, в настоящее время в мире отсутствует универсальная программа гарантии качества подобного обследования пациентов в отделении ядерной медицины. Обоснована необходимость и актуальность разработки системы контроля и обеспечения качества диагностического оборудования в отделении радиоизотопной диагностики медицинского учреждения. Рассмотрены условия проведения контроля качества, этапы и алгоритмы ежедневного контроля качества, требования к обеспечению качества диагностических аппаратов, включающие кросс-калибровку томографа, проверку стабильности, испытание на гомогенность, проверку пиксельного шума, пространственной разрешающей способности и контрастности, проверку положения стола.