

## Практическое применение устройства портальной дозиметрии для проведения ежедневных проверок в рамках программы гарантии качества ускорителей электронов

### Аннотация

Ежедневные проверки радиационного выхода пучков излучения ускорителя до начала лечения больных являются обязательным элементом всех международных рекомендаций по гарантии качества. В классическом варианте такая проверка выполняется с помощью стандартного «проводного» (подсоединяемого при помощи проводов) дозиметрического оборудования, например калиброванных ионизационных камер или матриц детекторов. Однако при тестировании большого числа ускорителей, нехватке соответствующего дозиметрического оборудования и кадров проведение утренней проверки может сказаться на времени начала лечебного процесса. Для ускорения проведения этой процедуры в ФГБУ «РОНЦ им. Н.Н. Блохина» РАМН была разработана и внедрена беспроводная методика утренней проверки с использованием устройств портальной визуализации для тестирования постоянства абсолютной дозы фотонного излучения и оценки точности работы многолепесткового коллиматора. При этом попутно осуществляется проверка работоспособности системы передачи данных между сервером отделения и консолью ускорителя, а также возможности получения изображений.

### Введение

Работа медицинских физиков отделений лучевой терапии в рамках концепции гарантии качества предполагает регулярное плановое выполнение процедур тестирования всех узлов радиотерапевтической цепочки, что сокращает вероятность возникновения ошибок, которые могли бы привести к клинически значимым последствиям. Одним из основных компонентов проверки является абсолютная доза излучения, которая, согласно всем международным рекомендациям [1]-[3], должна контролироваться ежедневно, до начала лечения пациентов.

Помимо измерения абсолютной дозы, в список ежедневных проверок входит проверка систем безопасности, а именно блокировок двери при работающем пучке, наличия аудио- и видеосвязи с каньоном, работы контрольного дозиметра, а также правильности настройки лазеров, дальномера и индикации размера поля. В некоторых публикациях [1], [4] также рекомендуется ежедневная проверка работоспособности динамического клина и тестирование многолепесткового коллиматора (МЛК). В частности, если в отделении лучевой терапии лечится большое количество пациентов с применением облучения с модуляцией интенсивности (ЛТМИ) и принимается решение

отказаться от проверки каждого ЛТМИ-плана, то ежедневная проверка параметров МЛК становится обязательной.

В настоящее время на рынке оборудования присутствует множество моделей детектирующих устройств различных производителей для проведения утренних проверок (табл. 1). Обычно это матрицы с небольшим количеством детекторов, которые позволяют измерять абсолютную дозу, мощность дозы, энергию пучка, симметрию и равномерность пучка излучения, соответствие осей светового и радиационного полей. В некоторых случаях они позволяют измерять угол динамического клина и параметры МЛК. Матрицы выпускаются в проводном и беспроводном исполнении, что во втором случае значительно ускоряет процедуру проверки.

Безусловно, для измерения абсолютной дозы можно использовать ионизационную камеру (ИК) и пластиковый или водный фантом. Однако в этом случае утренняя проверка может занять до 1 ч, что может быть допустимо для одного аппарата, но уже неприемлемо для двух и более перед началом лечения. Проведена оценка рабочего времени, необходимого для проведения утренней проверки одного ускорителя. В случае проводной матрицы без автоматической компенсации показаний на температуру и давление воздуха это время составило

Таблица 1

Современное специализированное оборудование для проведения утренних проверок производства компаний «Standard Imaging», «SunNuclear», «PTW», «IBA»

Наименование	Число детекторов	Наличие автоматической поправки на температуру и давление	Возможность работы без проводов	Возможность проверки МЛК	Возможность проверки параметров клина	Примечания
Standard Imaging QA BeamChecker Plus	8 ИК	Да	Да	Нет	Да, при использовании программного обеспечения	–
SunNuclear Daily Q A 3	13 ИК; 12 диодов	Да	Да	Нет	Нет	Диоды используются для проверки совпадения осей светового и радиационного полей
SunNuclear Check Mate 2	1 ИК	Да	Да	Нет	Нет	Измерение только радиационного выхода пучка
IBA StarTrack*	453 ИК	Да	Нет	Нет	Да	Измерение поперечных и диагональных профилей
PTW QuickCheck <sup>w</sup> <sub>eblne</sub>	13 ИК	Да	Да	Нет	Да	–
PTW LinaCheck	1 ИК	Не требуется	Да	Нет	Нет	Измерение только радиационного выхода пучка

25 мин, беспроводной матрицы – 15 мин, камеры в твердой воде – 35 мин.

подавляющее большинство современных клинических ускорителей имеют в своем составе устройство портальной визуализации и детектирования, которое при соответствующей калибровке можно использовать для измерений абсолютной дозы. При этом область применения детектирующего элемента (матрицы детекторов, МД) достаточно широка: в литературе описаны: проверка планов ЛТМИ [5], дозиметрия *in vivo* с реконструкцией фактически поглощенной дозы по алгоритму обратного проецирования [6], тестирование изоцентричности ускорителей по методу Winston-Lutz [7] и др. Как видно, почти все перечисленные нестандартные области применения МД основаны на базовой возможности измерения абсолютной дозы, и таким образом ее также можно использовать для проведения утренних проверок. К такому же выводу пришли авторы работы [8], показавшие, что разница показаний при измерении радиационного выхода между МД и ИК в среднем за период в 1 год не превышает 1,5 %. Также в [8] было проведено сравнение параметров профилей, измеренных с помощью водного фантома и МД. В результате сделан вывод о том, что последнюю можно использовать для контроля симметрии и равномерности пучков излучения. Будучи двумерной, матрица детекторов может также заменить пленочный детектор при проверке характеристик МЛК.

Таким образом, после анализа возможных стратегий проведения ежедневного дозиметрического контроля на ускорителях было принято решение о разработке набора процедур и методов сбора данных и обработки результатов тестирования характеристик аппаратов при помощи устройства портальной визуализации и детектирования, установленного на каждом из них. В частности, была поставлена задача проведения дозиметрической калибровки МД, создания планов проверки аппаратов и программы расчета результатов тестов МЛК, которые сложно обрабатывать вручную.

## Материалы и методы

В отделе радиационной онкологии ФГБУ «РОНЦ им. Н.Н. Блохина» РАМН установлены 6 ускорителей серии «Varian Clinac» (4 – с номинальными энергиями фотонного излучения 6 и 18 МэВ и шестью энергиями электронного излучения, 2 – с номинальной энергией фотонного излучения 6 МэВ), одинаково оснащенные МЛК («Millennium 120») и устройствами портальной визуализации и детектирования (в дальнейшем – портальный детектор «EPID aS1000», ПД). Таким образом, программа обработки результатов измерений не потребовала какой-либо специализации относительно размеров пиксела детектора или числа и ширины лепестков МЛК.

Портальный детектор «Varian aS1000» («PortalVision», «Varian Medical Systems», Palo Alto, CA) – это плоское визуализирующее устройство из аморфного кремния, смонтированное на роботизированной «руке» (рис. 1). Эта «рука» позволяет помещать детектор на расстояние от 95 до 180 см от источника.

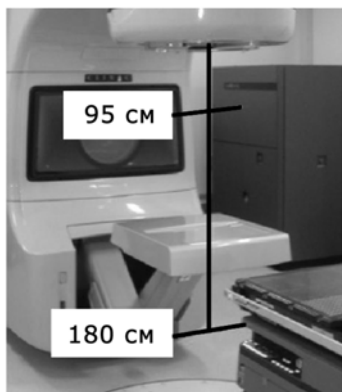


Рис. 1. Вид портального детектора aS1000 и диапазон его вертикального перемещения

Детектор aS1000 имеет активную детектирующую область  $40 \times 30 \text{ см}^2$  (при РИП = 105 см). Матрица изображения состоит из массива  $1024 \times 768$  пикселей. Максимальная скорость получения кадров составляет 9,574 кадр/с, допустимый диапазон энергий фотонного излучения 4...25 МэВ, допустимая мощность дозы 50...600 МЕ/мин (МЕ – мониторная единица, или единица измерения отпускаемой пациенту дозы). Калибровка ускорителя осуществляется таким образом, чтобы 1 МЕ была равна 0,01 Гр (грей – системная единица измерения поглощенной дозы).

Детектор состоит из четырех основных компонентов (рис. 2). Внутри пластикового корпуса находится пластина из меди толщиной 1 мм, играющая роль поглотителя и источника электронов отдачи. Под этой пластиной находится слой люминофора. В данном устройстве – это сцинтилляционный экран «Kodak Lanex Fast B» толщиной 0,4 мм оксисульфида гадолиния ( $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$ ). Экран поглощает электроны отдачи, приходящие из слоя меди, и трансформирует их в видимый свет. Под люминофором находится чувствительный слой фотодиодной системы толщиной 1,5 мкм, нанесенный на подложку из стекла толщиной 1 мм и непосредственно детектирующий изображение. Каждый пиксел состоит из кремниевого фотодиода, преобразующего входящий свет в заряд, и тонкопленочного транзистора (TFT) в качестве тройного переключателя для считывания.

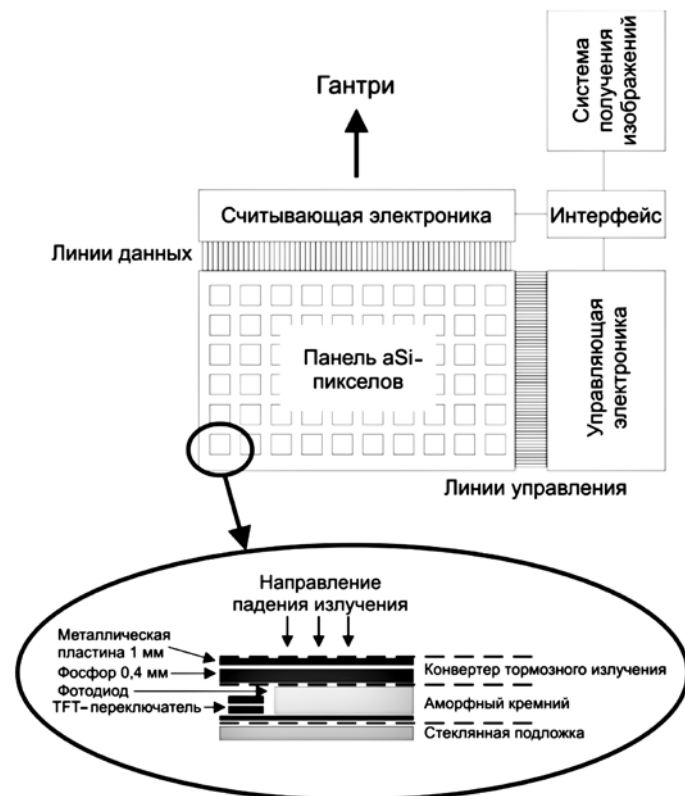


Рис. 2. Схематичное изображение структуры портального детектора

Электронная схема управляет переключателями TFT и считывает величину накопленного заряда. Считывание происходит последовательно при подаче напряжения на линию из TFT-переключателей, после чего они передают заряд в линию считывания данных. Каждая линия зачитывается по порядку, формируя строку в финальном изображении. В то время как одна строка считывается, напряжение подается на следующую строку. Внешние зарядочувствительные усилители захватывают данный заряд. Для формирования одного кадра изображения необходимо последовательное считывание всех строк.

Для измерения дозы ПД необходимо откалибровать в режиме интегрирования (integrated image), что включает в себя как подстройку базового качества изображения, так и непосредственно дозиметрическую калибровку.

**Калибровка основного качества изображения** производится путем получения «dark field» и «flood field» изображений. Получение этих изображений позволяет устранить фоновые шумы и обеспечить равномерный отклик всех пикселей детектора. В частности, изображение «dark field» обеспечивает систему информацией о фоновых шумах и получается путем считывания каждого пиксела в отсутствие излучения. Результирующее изображение (рис. 3, слева) представляет собой серию узких вертикальных полосок, которые возникают в результате утечки тока фотодиода и различных смещений электрометра. Изображение «flood field», с другой стороны, получается при облучении детектора в широком однородном пучке излучения и служит критерием равномерности дозы (рис. 3, справа). Оно позволяет системе проводить внутреннюю коррекцию индивидуальной чувствительности пикселей.

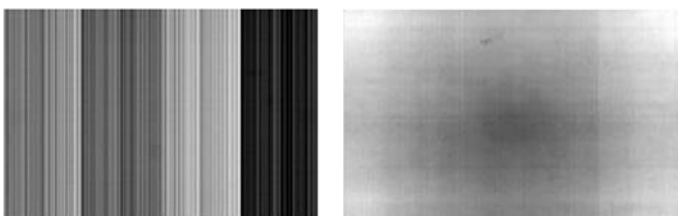


Рис. 3. Изображения «dark field» (слева) и «flood field» (справа)

**Дозиметрическая калибровка** портального детектора проводится в два этапа. На первом необходимо рассчитать в системе планирования число МЕ, которое создает в чувствительном слое детектора дозу, например 2 Гр, а также измерить диагональный профиль пучка на той же глубине. Второй этап заключается в облучении ПД полученным числом МЕ и сопоставлении измеренного отклика детектора с известной дозой, а также в загрузке диагонального профиля в систему для компенсации неравномерности пучка.

После проведения калибровки ПД можно использовать для измерения дозы в режиме интегрирования. Таким образом, ПД может заменить пленку при проведении процедур гарантии качества и, в частности, может успешно применяться для проведения таких проверок характеристик МЛК, как «fence-test» и «speed-test».

«Fence-test» предназначен для мониторинга и тестирования установки лепестков МЛК в заданную позицию: проверки согласованности лепестков между собой в каждой из кареток, точности установки противоположащих лепестков в заданном положении. Проверяются два параметра: точность отработки назначенных координат и ширина зазора между противоположащими лепестками. Само тестирование происходит следующим образом: все пары лепестков МЛК в сомкнутом положении выстраиваются на заданное время вдоль одной линии, затем происходит смещение всех лепестков на определенное расстояние, например 2 см, и процедура повторяется. Отпуск дозы во время теста производится постоянно, а лепестки занимают ряд статических позиций вдоль всего поля облучения. В результате пропускания дозы между концами

противолежащих лепестков мы получаем дозовую карту (рис. 4б), где видно несколько вертикальных полос. Полученные данные можно анализировать визуально и численно. При визуальном анализе можно видеть, насколько вертикальные линии являются прямыми и однородными. Если какая-либо пара лепестков имеет явную ошибку позиционирования, то это будет четко видно на дозовой карте. Численный анализ, в свою очередь, производится с помощью обработки дозовых профилей вдоль пути, который проходит каждая пара лепестков. МЛК «Varian Millennium 120» имеет 60 пар лепестков, т. е. необходимо проанализировать 60 профилей. Для того чтобы нивелировать влияние «tongue-and-groove» эффекта (дозиметрической неравномерности тени лепестка вследствие асимметрии его строения), дозовый профиль должен проходить через середину лепестка, что можно автоматизировать, обработав перпендикулярный лепесткам профиль. Полученные вдоль лепестков профили представляют собой набор пиков, которые анализируются относительно ширины на полувысоте. Она должна быть не больше определенного значения, указанного в спецификации МЛК, а расстояние между этими пиками должно быть одинаковым и равным 2 см.

«Speed-test» позволяет проанализировать точность динамического перемещения пластин МЛК. Во время теста каждая пара противоположащих лепестков движется со своей определенной скоростью, а отпуск дозы производится непрерывно. В результате измеряется дозовая карта с набором полос различной интенсивности (рис. 4б). Лепестки не сомкнуты, как при «fence-test», а находятся на некотором расстоянии, которое динамически изменяется. Анализ полученного изображения производится измерением равномерности и симметричности этих профилей. После обработки каждого профиля делается вывод о необходимости калибровки лепестков по скорости.

В состав онкологической информационной системы «Varian ARIA» входит программа «Portal Dosimetry», которая позволяет просматривать и сравнивать между собой дозовые изображения с портального детектора. Она связана с базой данных пациентов, что очень удобно для автоматизации процесса измерений и хранения дозовых изображений.

Таким образом, для проведения утренних проверок ускорителей было решено создать несколько виртуальных пациентов с тестовыми планами, поля которых отвечают за тестирование одного или нескольких параметров ускорителя. В частности, было создано 6 «пациентов» с планами по три поля в каждом для измерения абсолютной дозы, проведения «speed-test» и «fence-test» МЛК. Первый из тестов МЛК позволяет проверить равномерность перемещения лепестков коллиматора по оценке равномерности профиля соответствующего участка дозового изображения. По результатам второго теста измеряются точность калибровки перемещения пар лепестков и параметры утечки.

## Результаты

Первым этапом подготовки к переходу на новую методику проведения ежедневных проверок стала калибровка портальных детекторов по дозе. Было рассчитано, что для создания

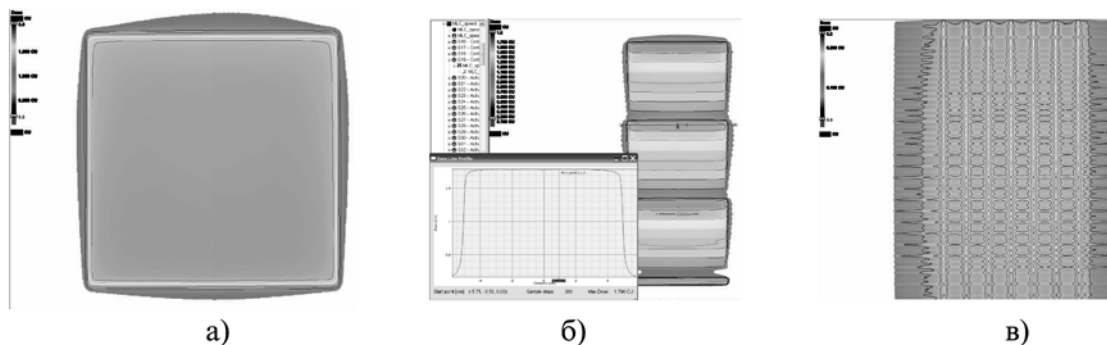


Рис. 4. Дозовые изображения, полученные в результате измерения портальным детектором полей плана виртуального пациента: а) абсолютная доза; б) «speed-test» МЛК; в) «fence-test» МЛК

дозы в 2 Гр в слое детектора необходимо подвести 231 МЕ. В качестве диагонального профиля на глубине детектирования (порядка 0,8 г/см<sup>2</sup>) был использован профиль на глубине максимума дозы (1,5 г/см<sup>2</sup>) при предположении, что они мало отличаются друг от друга и эта замена не вносит большой ошибки в результаты проверки.

Вторым этапом стало создание виртуальных пациентов, которое не потребовало ввода каких-либо изображений, и фактически созданные планы представляют собой простой набор команд для ускорителя (размеры полей, конфигурация МЛК, энергия и тип излучения, число МЕ, поворот коллиматора и гантри) и устройства портальной визуализации (геометрическое расположение панели, вид полученного изображения – интегрированное). Результаты отработки тестового плана (рис. 4) представляют собой набор дозовых изображений, которые сохраняются в общей базе данных пациентов.

Анализ полученных изображений проводится в два шага. На первом физик проводит численную проверку измеренной абсолютной дозы с использованием инструментов программы «Portal Dosimetry» и визуальную оценку результатов тестов МЛК. После этого принимается решение о начале или приостановке облучения пациентов на аппарате. Предполагается, что самопроверка МЛК во время инициализации в начале рабочего дня в совокупности с успешным проведением двух тестов обеспечивает необходимый контроль качества работы коллиматора.

Для численной оценки результатов тестирования МЛК созданы соответствующие программы на базе системы научного программирования Matlab. В качестве входных данных используются полученные дозовые изображения в формате DICOM; вычисление характеристик происходит автоматически. Успешность прохождения «speed-test» определяется по тому, вошли ли симметрия и равномерность профилей всех полос равномерной дозы в границы допуска (2 и 3 % соответственно). Допустимые пределы изменения характеристик, измеряемых в результате проведения «fence-test», составляют 0,2 мм как для ширины пика на полувысоте, так и для расстояния между пиками.

С практической точки зрения, методика ежедневной проверки с использованием портальной дозиметрии состоит в том, что медицинскому физику (или другому специалисту, обученному этой методике – это может быть и оператор со средним медицинским образованием) необходимо произвести следующие действия:

1. После включения инженером линейного ускорителя и перед началом облучения пациентов из стандартного клинического режима загрузить лечебный план тестового пациента.
2. Убедиться, что стол убран, а портальный детектор выдвинут в положение в соответствии с планом.
3. Выполнить план облучения и дождаться сохранения полученных интегрированных изображений на сервер.
4. Запустить программу портальной дозиметрии и провести оценку измеренных характеристик. Принять решение о клинической эксплуатации ЛУЭ.
5. Провести более глубокую численную оценку характеристик МЛК.
6. Документировать полученный результат.

## Выводы

В результате проведенной работы был выбран набор процедур и методов сбора данных и создана система обработки результатов ежедневного тестирования основных характеристик линейных ускорителей при помощи портального детектора, установленного на каждом из них. В частности, была проведена дозиметрическая калибровка ПД, созданы планы проверки аппаратов и программы расчета результатов тестов МЛК. Опыт внедрения и эксплуатации разработанной методики показывает, что время проверки существенно сокращается (до 7...10 мин), повышается ее удобство, а количество проверяемых характеристик увеличивается. Таким образом,

можно рекомендовать методику использования портального детектирования для ежедневных проверок характеристик линейных ускорителей для широкого практического применения.

## Список литературы:

1. Klein E.E., Hanley J., Bayouth J. et al. AAPM Task Group 142 Report: Quality assurance of medical accelerators // Med. Phys. 2009. Vol. 36 (9). PP. 4197-4212.
2. Thwaites D., Scalliet P., Leer J.W., Overgaard J. Quality Assurance in radiotherapy // Radiother. Oncol. 1995. Vol. 35. PP. 61-73.
3. World Health Organization. Quality Assurance in Radiotherapy. – Geneva: WHO, 1988.
4. Swiss Society of Radiobiology and Medical Physics. Quality Control of Medical Electron Accelerators. – Lausanne: SSRMP, 2003.
5. European Society for Radiotherapy & Oncology. Guidelines for the verification of IMRT. – Brussels: ESTRO, 2008.
6. Wendling M., Louwe R.J.W., McDermott L.N. et al. Accurate two-dimensional IMRT verification using a back-projection EPID dosimetry method // Med. Phys. 2006. 33. PP. 259-273.
7. Rowshanfarzad P., Sabet M., O'Connor D.J., Greer P.B. Verification of the linac isocenter for stereotactic radiosurgery using cine-EPID imaging and arc delivery // Med. Phys. 2011. Vol. 38. PP. 3963-3970.
8. Budgell G.J., Zhang R., Mackay R.I. Daily monitoring of linear accelerator beam parameters using an amorphous silicon EPID // Phys. Med. Biol. 2007. Vol. 52. PP. 1721-1733.

*Павел Валерьевич Казанцев,  
ведущий инженер,  
отделение лучевой топометрии  
и клинической дозиметрии,  
отдел радиационной онкологии,  
ФГБУ «РОНЦ им. Н.Н. Блохина» РАМН,  
Ирина Матвеевна Лебеденко,  
д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник,  
отделение лучевой топометрии  
и клинической дозиметрии,  
отдел радиационной онкологии,  
ФГБУ «РОНЦ им. Н.Н. Блохина» РАМН,  
профессор кафедры № 35,  
НИЯУ МИФИ,  
Татьяна Алексеевна Крылова,  
инженер 1 категории,  
Мария Петровна Прусова,  
мл. научный сотрудник,  
Юрий Валентинович Журов,  
ведущий инженер,  
отделение лучевой топометрии  
и клинической дозиметрии,  
отдел радиационной онкологии,  
ФГБУ «РОНЦ им. Н.Н. Блохина» РАМН,  
Владимир Александрович Климанов,  
профессор кафедры № 35,  
НИЯУ МИФИ,  
г. Москва,  
e-mail: imlebedenko@mail.ru*