

УДК 539.1.074; 621.386; 621.387

## МИКРОДОЗОВЫЕ РЕНТГЕНОГРАФИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ИНСТИТУТА ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО РАН И ОБЛАСТИ ИХ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Е. А. Бабичев, С. Е. Бару, В. В. Леонов,  
В. В. Поросев, Г. А. Савинов

*Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН,  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11  
E-mail: baru@inp.nsk.su*

Изложены проблемы, связанные с рентгенографией при предельно низких дозах облучения, предложен метод построения систем для рентгенографии людей при таких дозах, кратко описаны основные компоненты систем и охарактеризованы области их оптимального применения в медицине и в системах безопасности.

*Ключевые слова:* рентгеновские детекторы, дозы облучения, рентгеновские сканеры, досмотровые системы, медицинская рентгенография.

**Введение.** В 80-е годы прошлого века в Институте ядерной физики (ИЯФ) СО РАН определилось новое направление прикладной деятельности — рентгенография человека при предельно низких дозах облучения [1], базирующееся на накопленном авторами опыте работы в физике высоких энергий. Работа включала в себя выбор и обоснование оптимального метода получения изображений, выбор конструкторских решений, производство детекторов, разработку рентгенооптической схемы, выбор источников излучения, создание программного обеспечения (управление съёмкой, обработка и представление снимков). Актуальность темы не вызывала сомнений, поскольку рентгенография, например в медицине, до сих пор поставляет основную часть диагностической информации, хотя никто не отрицает вреда облучения. Поэтому задача радикального уменьшения доз при рентгенографических обследованиях разного типа является весьма актуальной. Кроме того, появление других, «безвредных» средств диагностики: МРТ, ПЭТ, УЗИ, эндоскопии и т. п. — также стимулировало создание микродозовых рентгенографических систем. Аналогично и в области обеспечения безопасности появились безвредные, но зато гораздо менее эффективные установки, например, на субмиллиметровых радиоволнах, что также заставило нас работать над снижением доз в рентгеновских системах досмотра.

Данная проблема поставила много вопросов. Насколько можно снизить используемые в рентгенографии дозы, оставляя качество снимка удовлетворительным? Как при этом должны быть устроены установки? Какие дозы можно считать безвредными? Есть специалисты, считающие, что вредны любые дозы, т. е. они исповедуют так называемую «беспороговую концепцию». Наша точка зрения — обследования с применением рентгена должны быть максимально безопасны, т. е. польза от них должна «перевешивать» вред от этих процедур. В качестве критерия допустимой дозы можно принять величину облучения, которую получает человек за счёт космического излучения (3–6 мкЗв/сутки на Земле и ~5 мкЗв/час при полёте на высоте 10 км).

**Постановка задачи.** Какую величину дозы можно считать допустимой и в то же время достаточной для получения снимка хорошего качества, удовлетворяющего работа-

ющего с установкой специалиста (врача, сотрудника службы безопасности в аэропорту и т. п.)? Доза (экспозиционная) зависит от количества и энергии рентгеновских квантов, падающих на единицу площади поверхности тела человека. Большая часть квантов рассеивается, меньшая — проходит сквозь человека (ослабляясь в зависимости от рентгеновской прозрачности тела в данном месте) и достигает детектора. Снимок «рисует» этими квантами, и чем их меньше, тем больше статистический шум в конкретном месте снимка, т. е. с уменьшением дозы ухудшается соотношение сигнал/шум и соответственно снижается качество снимка. Поэтому дозу можно уменьшать до известного предела.

Кроме упомянутого выше фактора (соотношение сигнал/статистический шум), на достижение экстремально низкой дозы влияют ещё несколько условий, которые должны быть выполнены:

1. Всё прямое излучение, прошедшее через человека, должно попадать в детектор. Это излучение несёт информацию о рентгеновской прозрачности тела и используется для создания снимка.

2. Рассеянное в теле человека излучение, напротив, не должно попадать в детектор. Это излучение портит снимок. В традиционных системах с двухкоординатным детектором оно составляет до 90 % от величины сигнала, создаёт на снимке «вуаль» и ложные образы, ухудшает контрастную чувствительность. В таких системах для уменьшения влияния шума от рассеянного излучения приходится увеличивать дозу.

3. Детектор должен обладать низким значением собственных (аппаратных) шумов, не превышающим сигнала от нескольких рентгеновских квантов, т. е. при выключении источника рентгена сигнал на детекторе должен быть близок к нулю.

4. Эффективность детектора, т. е. часть квантов, которая попала в него и превратилась в заряд, должна быть близка к 100 %. В эффективность входит и так называемый fill factor (коэффициент заполнения пикселя).

5. Разрешение детектора должно быть оптимально для данного типа обследований (пиксель для медицины 0,1–0,25 мм, для систем безопасности 1–1,5 мм). Низкое разрешение ухудшает качество изображения, а чрезмерно высокое повышает необходимую дозу и увеличивает стоимость детектора. К тому же оптимизация размера пикселя с помощью операции «binning» (сложение оцифрованных сигналов пикселей, расположенных рядом) приводит к повышению собственных шумов и, как следствие, к необходимости повышения дозы.

Анализ этих условий показывает, что пп. 1 и 2 зависят от рентгенооптической схемы установки. Выполнение условий 3–5 зависит от правильности построения детектора.

Теперь оценим, какие минимально приемлемые дозы могут быть достигнуты. Возьмём для конкретики медицинскую флюорографию. Допустим, что все вышеизложенные условия выполнены: прямое излучение полностью попадает в детектор, рассеянное не попадает, шум детектора равен сигналу от двух квантов ( $\delta = 2$ ), эффективность детектора  $\sim 75\%$ , размер пикселя  $0,25 \times 0,25$  мм. Качество снимка будет хорошим, если зернистость на изображении, вызванная статистическим шумом, не будет заметна и не будет мешать врачу хорошо видеть лёгочный рисунок, туберкулёмы и т. п. Это станет возможным, если шум будет меньше 3 %, т. е. в пикселе напротив прозрачной части лёгких будет зарегистрировано 1000–1500 квантов (для дальнейших оценок возьмём среднее число — 1200 квантов). Напомним, что собственный шум ( $\delta = 2$  кванта) пренебрежимо мал по сравнению со статистическим и не портит снимка. С учётом 75 %-ной эффективности на детектор напротив этого пикселя будет попадать 1600 квантов. А поскольку средняя рентгеновская прозрачность лёгких в 6 раз меньше, чем воздуха, на человека в этом месте (напротив того же пикселя) будет падать уже  $1600 \times 6 = 9600$  квантов. Какой дозе соответствует это число? При напряжении на рентгеновской трубке 100 кВ и значении экспозиционной дозы 1 мкР на один квадратный миллиметр приходится  $\sim 250$  квантов. Так как площадь

пикселя в 16 раз меньше чем  $1 \text{ мм}^2$ , доза составит  $9600 \times 16/250 = 615 \text{ мкР}$ , или  $\sim 5 \text{ мкГр}$  ( $115 \text{ Р} = 1 \text{ Гр}$ ). Далее необходимо перейти к эффективной дозе, которой оперируют НРБ и СанПиН и которая характеризует опасность облучения. Нашей дозе  $5 \text{ мкГр}$  соответствуют  $\sim 2,5 \text{ мкЗв}$  эффективной дозы. Много это или мало? Если сравнить с естественным природным фоном на поверхности Земли, составляющим  $3\text{--}6 \text{ мкЗв/сутки}$ , то, конечно, эта доза вполне допустима и безвредна [2].

Опустим такую подробную оценку доз для систем досмотра. С учётом того что здесь напряжение на трубке выше, просматриваются все части тела, ведётся поиск более крупных объектов на теле и внутри тела и размер пикселя больше ( $1\text{--}1,5 \text{ мм}$ ), минимально допустимая доза составит  $0,3\text{--}0,5 \text{ мкЗв}$ , т. е.  $\sim 10 \%$  от ежедневной фоновой дозы. Это приемлемо даже для КПП, где досмотр производится каждый рабочий день, не говоря уже об аэропортах при предполётном досмотре.

После создания флюорографа ФМЦ-НП-О с пикселем  $0,25 \times 0,25 \text{ мм}$  и системы досмотра СРК (система рентгеновского контроля) с пикселем  $1,5 \times 1,5 \text{ мм}$  (ЗАО «Научприбор», г. Орёл) приведённые выше оценки доз были полностью подтверждены.

**Предложенное решение.** При выборе схемы реализации микродозовой рентгенографии мы остановились на идее сканера, так как только сканер может с максимальной эффективностью устранить регистрацию рассеянного излучения (его отсекает узкое щелевидное окно линейного детектора). Наиболее обширное поле применения для будущих систем предоставляет модификация сканера с вертикальным сканированием и горизонтальным плоским рентгеновским лучом, поскольку только такие сканеры могут обеспечить получение снимков любой длины, что в медицине даёт возможность проводить антропометрию, исследовать позвоночник по всей его длине и т. п., а в области безопасности — производить досмотр всего тела человека.

Принцип действия сканера этого типа приведён на рис. 1. Установка включает в себя источник рентгена, штатив с механической системой сканирования, эффективный детектор излучения с низким уровнем шумов, блоки управления и компьютерное оборудование. Распределение излучения в горизонтальном направлении измеряется детектором, а в вертикальном — путём сканирования. Коллиматор вырезает из излучения трубки плоский веерообразный пучок рентгена, который после прохождения через обследуемого попадает во входное окно детектора. Данные с детектора каждые несколько миллисекунд переписы-

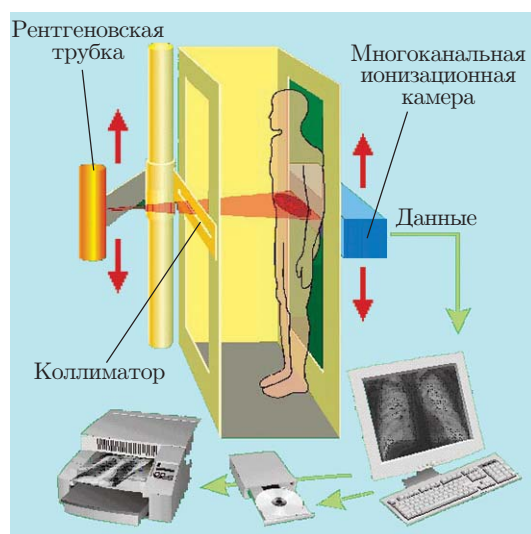


Рис. 1. Схема сканера

ваются в память компьютера. После окончания съёмки и быстрой обработки изображение выводится на экран дисплея [3].

Кроме радикального снижения дозы и возможности получать протяжённые снимки, сканер такого типа имеет и другие достоинства:

1. На снимке отсутствуют искажения по вертикали, что в медицине, например, позволяет видеть все позвонки под одним (прямым) углом, а при досмотре — точно оценивать место, где спрятаны опасные предметы.

2. В отличие от традиционных систем с двухкоординатными детекторами в применённой конструкции интенсивность излучения и пространственное разрешение практически одинаковы по всему полю снимка.

Пренебрежимо малый вклад рассеянного излучения в величину сигнала, зарегистрированного детектором, определил важнейшее метрологическое преимущество сканеров по сравнению с системами, использующими двухкоординатные ( $2D$ ) детекторы. Качество изображения зависит не только от основной характеристики детекторов — DQE (квантовой эффективности детектирования), которое у сканеров и лучших  $2D$ -детекторов составляет  $\sim 60\%$ , но и от рассеянного излучения, регистрируемого детектором. Поэтому во всех системах с  $2D$ -детекторами в отличие от сканеров происходит значительное ухудшение параметров при постановке перед детектором объекта исследования [4].

Краткая характеристика некоторых компонентов систем.

*Сканирующая механика.* Почему другие разработчики выбрали всё же сканеры с вращательным движением? Потому что вращательная механика принципиально проще. Однако нам удалось найти конструкторское решение, которое радикально упростило механику с вертикальным поступательным движением, сделало её надёжной и недорогой.

*Источник рентгена* состоит из излучателя на базе рентгеновской трубки и питающего его высоковольтного генератора. Богатый ассортимент рентгеновских источников, выпускаемых промышленностью (лучшие выпускаются, к сожалению, за рубежом) позволяет подобрать оптимальный комплект (генератор, трубка, кожух трубки) для каждой модели медицинской установки или системы досмотра. Важным компонентом источника рентгена является система фильтрации излучения. Оптимальный фильтр даёт возможность дополнительно снизить дозу облучения, сохранив качество снимка.

*Детектор.* В первых медицинских системах мы применили многопроволочную пропорциональную камеру (МПК). Их производство было освоено на ЗАО «Научприбор», которое поставило в клиники России около сотни флюорографов с таким детектором [5, 6]. Этот детектор, работающий в режиме прямого счёта квантов, «пришёл» прямо из физики высоких энергий. Однако, хотя врачи были довольны качеством снимка, мы были вынуждены прекратить применение детектора в рентгенографии, так как он имел ограниченное пространственное разрешение (0,6 мм), был нетехнологичен и подвержен старению. Поэтому ещё в 1997 г. мы заменили МПК-детектор многоканальной ионизационной камерой (МИК) (рис. 2, 3).

В производстве ИЯФ СО РАН разработано и освоено несколько типов МИК, которые отличались применённым рабочим газом (ксенон, криптон), давлением газа (20–40 атм.), шириной канала (0,2–1,6 мм), числом каналов (512–2560), конструкцией, областью применения [7].

Корпус МИК представляет собой цилиндр из прочного сплава (Д16Т), заполненный газом. В корпусе размещены две плоскости — анодный и катодный электроды, зазор анод—катод составляет 2–4 мм. К сплошному аноду приложено высокое напряжение, катод выполнен в виде полосок (стрипов), направленных на фокальное пятно рентгеновской трубки. Рентгеновское излучение, попавшее во входное окно детектора, проникает в пространство между электродами. Газ ионизуется, и образовавшиеся электроны и ионы дрейфуют к соответствующим электродам. Заряды, наведённые на стрипы, «снимаются» с

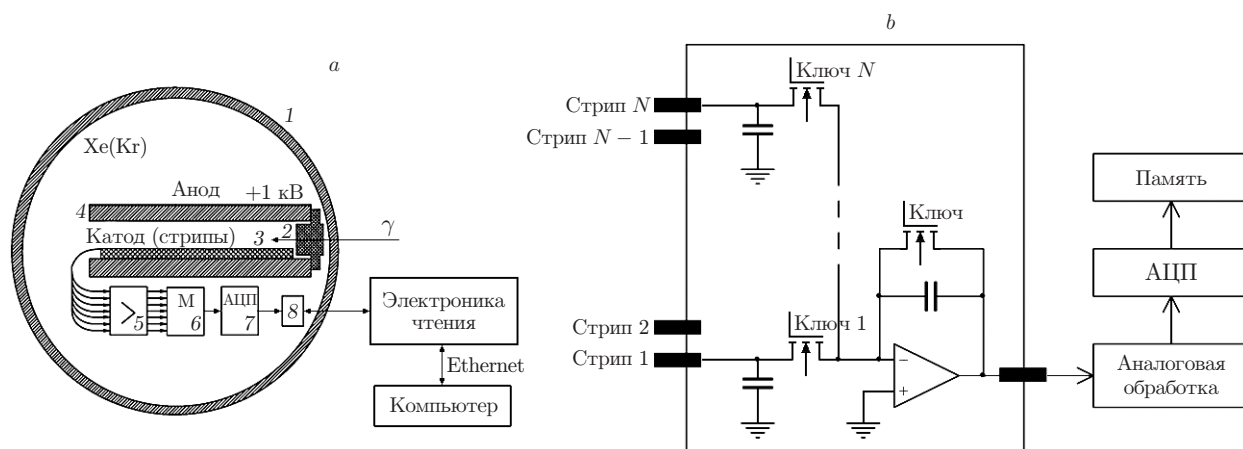


Рис. 2. Структура МИК: *a* — схема конструкции (1 — корпус камеры, 2 — входной лучепровод, 3 — катодная (стриповая) плоскость, 4 — анодная плоскость, 5 — зарядочувствительные усилители, 6 — мультиплексоры, 7 — аналого-цифровые преобразователи, 8 — память на одну строку и схема связи); *b* — схема электроники

них электроникой и после аналоговой обработки и оцифровки данные заносятся в память компьютера.

Детектор на базе МИК обладает высокой резистивностью к облучению и высокой эффективностью, поскольку в нём происходит прямое преобразование энергии кванта в заряд и fill factor = 100 %. В наших медицинских системах и установках досмотра применяются различные модификации МИК-детекторов. Общее число систем с МИК-детекторами ~250 шт.

В перспективе мы планируем разработать детектор, снова использующий метод прямого счёта квантов, так как это позволит убрать собственный шум и даст возможность при формировании снимка разделить кванты по энергии и применить взвешивающие коэффициенты. Результат — дальнейшее уменьшение дозы и повышение качества снимка.

**Рентгенооптическая схема.** Как уже отмечалось выше, правильно выполненная рентгеновская оптика должна полностью «принять» в детектор прямое излучение, максимально отсеять рассеянное излучение и исключить касание лучом рентгена краёв входного окна детектора. Для выполнения этих требований нужно подобрать размеры фокального пятна трубки, высоту щели коллиматора, расстояния «трубка — коллиматор» и «коллиматор — детектор». При формировании «толщины» веерного луча рентгена необходимо обеспечить пространственное разрешение по вертикали. Это разрешение в отличие от горизонталь-



Рис. 3. Общий вид МИК

ного виртуально и определяется толщиной луча в плоскости детектора, временем опроса одной «строки» изображения и скоростью сканирования. Для обеспечения предельно низких доз входное окно детектора должно иметь минимальную высоту, что предъявляет высокие требования к плавности и равномерности хода сканирующей механики, а также к линейности щели коллиматора и краёв окна (отклонение от прямых линий не более  $\pm 50$  мкм).

В результате выполнения условий задачи и оптимального подбора всех составляющих частей сканеров удалось разработать и освоить производство цифрового флюорографа ФМЦ-НП-О с экстремально низкими дозами облучения, обладающего характеристиками, необходимыми для получения качественного изображения органов грудной клетки, и оптимальной по основным параметрам (результативность, удобство использования, безвредность процедуры и т. п.) установки досмотра СРК. Параметры этих систем можно найти на сайте предприятия-изготовителя [8] и сравнить флюорограф ФМЦ-НП-О и систему досмотра СРК с отечественными и зарубежными установками аналогичного назначения.

**Применение разработок.** Итак, где же максимально эффективно следует использовать сканеры? Перечислим области, где низкие дозы облучения являются одним (если не первым) из определяющих факторов.

*Медицина.* 1. Естественной нишей для сканеров является флюорография, т. е. массовое профилактическое обследование органов грудной клетки. Доза должна быть предельно низкой, так как обследуется в основном здоровое население. Здесь у сканеров конкурентов нет. Параметры сканеров, предназначенных для таких обследований: пространственное разрешение 2,0 п.л./мм, доза облучения при прямом снимке лёгких 4 мкЗв, т. е. приблизительно равна суточной фоновой дозе. На таких сканерах можно обследовать все категории населения, включая беременных женщин, детей и подростков. Примером может быть сканер ФМЦ-НП-О с газовым детектором (рис. 4). В настоящее время в России работают  $\sim 200$  систем.



Рис. 4. Сканер ФМЦ-НП-О

2. Акушерство и гинекология — следующая область, где могут и должны использоваться сканеры. Мы уже имеем многолетний опыт применения такого сканера во Всероссийском центре гинекологии и перинатологии для прогнозирования течения и исхода родов при осложнённой беременности. Прогноз реализуется по результатам рентгенографического обследования путём моделирования прохождения головы ребёнка через три критических сечения в тазу роженицы. Моделирование осуществляется с помощью специальных программ, разработанных в своё время под руководством профессора А. И. Волобуева. По результатам такого прогноза даётся рекомендация о необходимости кесарева сечения или о возможности нормальных родов. Таким образом, кесарево сечение делается только в случае реальной необходимости. В этой области применения, кроме низких доз ( $\sim 40$  мкЗв на два снимка), используется свойство сканера не иметь искажений по вертикальной координате, что облегчает процесс измерений параметров женского таза и головы ребёнка. Микродозовый сканер был установлен в Центре в 1984 году. Последняя модификация производства ЗАО «Научприбор» введена в эксплуатацию в 2007 году. Как показал опыт Центра, методика позволяет значительно уменьшить число кесаревых сечений и снизить травматизм матери и ребёнка при родах у женщин с анатомически узким тазом. С 2002 г. установка рекомендована Министерством здравоохранения РФ для цифровой рентгенопельвиметрии (Письмо МЗ РФ № 25/10/11869-02-32).

3. Представляется целесообразным использование сканеров для любых рентгенографических обследований детей всех возрастов и подростков, как для диагностики, так и в любых скринингах. Например, весьма эффективным явилось применение сканера "Scan-DDR" (ADT Co., Ltd.), производимого в Корее по лицензии ИЯФ СО РАН, для диагностики искривления позвоночника, дефектов суставов и нижних конечностей у детей. При таком обследовании используются сразу три уникальных свойства сканера: предельно низкие дозы, любая разумная длина снимка и отсутствие искажений вдоль тела стоящего человека. Установка "Scan-DDR" работает в самой крупной клинике Кореи — "Samsung Hospital". Стало возможным получать на одном снимке изображение всего позвоночника и нижних конечностей, причём без искажений (рис. 5). Раньше это была кропотливая работа по сшивке двух–трёх снимков, полученных на цифровых плоских панелях, естественно, с



Рис. 5. Обследование детей в "Samsung Hospital"

искажениями. В Российской Федерации для аналогичных целей наш сканер используется в Центре новых медицинских технологий (ЦНМТ) в Академгородке г. Новосибирска.

4. Весьма результативным могло бы быть применение сканера для профилактических обследований пожилого (старше 50 лет) населения в целях раннего выявления рака желудка. В России из-за позднего обнаружения этого заболевания ежегодно погибает ~60 тыс. человек. По данным ЦНМТ, специалисты которого участвовали в разработке проекта, многих из них можно было бы спасти.

5. Наконец, с использованием микродозового сканера становится возможным проводить рентгенографию пациентов сколь угодно часто, отслеживая действие методик и лекарств. Такое применение сканера, изготовленного по лицензии ИЯФ СО РАН на комбинате «Электрохимприбор» (г. Лесной Свердловской обл.), практиковалось, например, в клинической больнице № 83 (Москва) Федерального управления медико-биологических и экстремальных проблем при МЗ РФ.

Микродозовые сканеры можно эффективно использовать и в других областях медицинской рентгенографии [9].

*Обеспечение безопасности. Системы досмотра.* 1. Проблема предполётного досмотра авиапассажиров решена лишь частично. Если досмотр ручной клади на багажных интроскопах результативен, то о личном досмотре людей этого сказать нельзя. Рамочные металлодетекторы не увидят ни взрывчатку, ни пластиковое оружие, а последующее раздевание и ощупывание — неэффективны, неудобны и унижительны. Установки досмотра, «ощупывающие» поверхность тела лучом миллиметровых радиоволн, также неудобны и неэффективны. Применение СРК для досмотра людей устраняет все проблемы и делает эту процедуру эффективной, быстрой и удобной для обеих сторон [10]. Несмотря на использование рентгена (как, например, увидеть взрывчатку внутри тела?) досмотр безопасен, поскольку доза облучения ничтожна и сравнима с фоновой дозой, которую получает пассажир за 4 мин полёта (0,35 мкЗв). К тому же СРК имеет все разрешительные документы и полностью соответствует условиям применения подобных установок, изложенным в СанПиН 2.6.1.3106-13. В настоящий момент СРК успешно используется в ряде аэропортов России. Особенно богатый опыт её применения накоплен в аэропорту Толмачёво г. Новосибирска, где работают три установки (рис. 6).

2. Применение СРК для охраны стратегически важных объектов (СВО). Персональный досмотр людей обычно проводится в специально оборудованных помещениях — КПП. Такие пункты являются важнейшими элементами охраны СВО, теракт на которых может



Рис. 6. Применение СРК в аэропорту Толмачёво



привести к катастрофическим последствиям для местности, где они расположены. К СВО можно отнести АЭС, ГРЭС, ГЭС и плотины, склады боеприпасов, химические производства и т. п. Основная задача персонала КПП — предотвращение терактов на охраняемых объектах. Аналогичная задача стоит перед персоналом, осуществляющим охрану банков, музеев национального значения, правительственных учреждений, первых лиц государства. Такой контроль может быть сплошным или выборочным (досмотр незнакомых или лиц, вызвавших подозрение персонала). Контроль ручной клади осуществляется на багажном интроскопе. При контроле с применением СРК рамочные металлодетекторы не нужны. Не вызывает затруднений досмотр в особых случаях — человек с протезом, в гипсе и т. п. Контроль становится эффективным, безопасным и удобным. Установки на радиоволнах здесь не годятся. Для досмотра на КПП СВО идеально подходит именно СРК. И, конечно, здесь нужно применять только отечественные системы досмотра [11].

3. Борьба с наркотрафиком (обнаружение контейнеров с наркотиками внутри тела).

4. Предотвращение хищения драгоценных металлов и изделий из них на афинажных фабриках и предприятиях, производящих ювелирные изделия.

5. Выборочный досмотр подозрительных лиц и лиц с неадекватным поведением на входах в железнодорожные вокзалы, станции метро и т. п. [12].

6. Применение СРК в СИЗО, колониях, тюрьмах и других местах лишения свободы для бесконтактного досмотра.

Из-за специфики темы нецелесообразно подробное раскрытие всех пунктов. Можно только указать, что имеются подтверждения соответствующих ведомств об эффективности перечисленных выше применений СРК. Всего в Российской Федерации, включая аэропорты, эксплуатируются ~75 установок СРК.

**Заключение.** Во многих областях микродозовые сканеры гораздо эффективнее применяемых сейчас установок, а в некоторых — просто вне конкуренции. К сожалению, они используются гораздо реже, чем этого заслуживают. Основные причины: в медицине — консерватизм рентгенологов и их предубеждение против сканеров, а в деле обеспечения безопасности — искусственно раздуваемая конкурентами радиофобия, подкреплённая недостаточной компетентностью некоторой части чиновников. Всё же прогресс в этом деле медленный, но существует. Лучший пример — три сканера СРК, работающие день и ночь в аэропорту Толмачёво и пользующиеся полным одобрением доверяющих науке новосибирцев.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бару С. Е., Макаров И. Р., Савинов Г. А. и др. Цифровая рентгенографическая установка для медицинской диагностики. Новосибирск, 1984. 14 с. (Препр. /ИЯФ СО АН СССР; 84-84).
2. Beutel J., Kundel H. L., Van Metter R. L. Handbook of Medical Imaging. Vol. 1. Physics and Psychophysics. USA: SPIE Press, 2000. P. 43–45.
3. Baru S. E., Makarov I. R., Savinov G. A. et al. Digital X-ray imaging installation for medical diagnostics // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1985. **A238**, N 1. P. 165–169.
4. Samei E., Lo J. Y., Yoshizumi T. T. et al. Comparative scatter and dose performance of slot-scan and full-field digital chest radiography systems // Radiology. 2005. **235**, N 3. P. 940–949.
5. Baru S. E., Khabakhpashev A. G., Shekhtman L. I. Multiwire proportional chamber for a digital radiographic installation // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1989. **A283**, N 3. P. 431–435.
6. Babichev E. A., Baru S. E., Khabakhpashev A. G. et al. Digital radiographic device based on MWPC with improved spatial resolution // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 1992. **A323**, N 1–2. P. 49–53.

7. **Babichev E. A., Baru S. E., Groshev V. R. et al.** The new effective detector for digital scanning radiography // Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. 2003. **A513**, N 1–2. P. 57–60.
8. **Научприбор.** URL: <http://www.nauchpribor.ru> (дата обращения: 7.10.2014).
9. **Белова И. Б., Китаев В. М.** Малодозовая цифровая рентгенография (малодозовая рентгенографическая установка «Сибирь»). Орёл: Труд, 2001. 164 с.
10. **Бару С. Е.** Эффективный персональный досмотр — гарантия безопасности полетов // Аэрокосмическое обозрение. 2007. № 4. С. 210–211.
11. **Бару С. Е.** Установка персонального досмотра для предотвращения терактов на стратегически важных объектах // Берг-коллегия. 2009. № 7(58). С. 44–45.
12. **Бару С. Е.** Системы сплошного и выборочного досмотров людей и багажа для предотвращения терактов // Тр. VIII Междунар. науч.-практ. конф. «Технические средства противодействия террористическим и криминальным взрывам». С.-Пб., 2012. С. 293–298.

*Поступила в редакцию 7 октября 2014 г.*

---