

Ядерная визуализация: достижения и перспективы

Разработки в различных областях определяют будущие направления

Герард ван Герк

„One picture is worth more than a thousand words” (Лучше один раз увидеть, чем сто раз услышать). Справедливость этого выражения, которое является лейтмотивом рекламы, не ограничивается только стратегией в рекламе. Конечно, это также относится к той решающей роли, которую играют визуальные изображения в диагностической медицине. Чтобы выявить направления развития приборов для получения изображений, надо начать с современного состояния арсенала ядерного медицинского оборудования. В этой статье придается особое значение приборам для получения изображений, которые могут представлять интерес для ядерного медицинского сообщества развивающихся стран.

Прямой линейный сканер был самым первым прибором, с помощью которого можно было получить изображение распределения радиации внутри тела. Сканер — все еще наиболее часто используемый и надежный прибор во многих ядерных медицинских центрах в третьем мире.

Сканер состоит из детектора, снабженного свинцовым коллиматором, который фокусирует радиационно-чувствительное поле зрения в узкое пятно за ним. Детектор передвигается вдоль извилистого пути над выбранной областью с распределенным в ней радиоактивным элементом, например, над органом пациента, изображение которого надо получить. Доля радиоактивности, измеренная в каждой позиции, одновременно регистрируется печат-

Д-р ван Герк — сотрудник Секции медицинских применений Отдела естественных наук.



тающим устройством, прикрепленным к другому концу движущегося детекторного блока. После завершения сканирования всей области общая система штрихов („сканограмма”) представляет собой полномасштабное распределение меченых атомов.

Образец наиболее часто используемой гамма-камеры разработан Хелом Энгером в 1959 году.

В гамма-камере Энгера распределение радиации проектируется как целое через коллиматор с параллельными отверстиями на тонкий сцинтилляционный кристалл. Диаметр его поля зрения может изменяться от 18 до 50 см. Каждую сцинтилляцию в кристалле можно „увидеть” с помощью набора фотоэлектронных умножителей (ФЭУ, типичное количество от 19 до 75). Относительный выходной сигнал ФЭУ анализируется электронной позиционной сетью, которая вырабатывает два позиционных сигнала на один зарегистрированный фотон. На экране монитора первоначальная „сцинтилляция” представляется соответствующим световым пятном. Фотокамера накапливает несколько тысяч таких событий, и образуется фотография, или „сцинтиграмма”, которая представляет собой проекционное изображение функционирующего органа.

Хотя сканер и считается старомодным устройством по сравнению с гамма-камерой, тем не менее он имеет ряд преимуществ. По своей природе он обеспечивает получение неискаженного и однородного отображения целой области; он удовлетворительно работает с высокоэнергетическими нуклидами, которые более доступны, чем часто исполь-

зуемый Tc-99m. Сканер обеспечивает хороший контраст для более глубоких структур. И, наконец, он обычно менее уязвим по отношению к неблагоприятным внешним условиям — непостоянству напряжения в сети, нерегулярному обслуживанию, т.е. ситуациям, часто встречающимся в развивающихся странах.

С другой стороны, сканеры имеют и недостатки: их нельзя применять в динамических исследованиях, например, получать изображение предметов, в которых распределение радиоактивных элементов нестационарно в течение обследования. Разрешение сканограммы низкое, и выглядит она менее впечатляюще, чем сцинтиграмма. По этим причинам сложная гамма-камера занимает господствующее положение над сканером, прибором первых лет радиодиагностики.

Какая бы ни была основа прибора для визуализации, важно регулярно иметь подтверждение тому, что каждая часть оборудования функционирует правильно. Уверенность в этом дает набор регулярно применяемых процедур для контроля качества (КК). МАГАТЭ поддерживает ряд программ и проектов в этой области и опубликовало технический документ по КК.

Применения компьютеров

В начале 70-х годов увеличилось количество исследований в области применения электронно-вычислительной техники для получения сцинтиграфических изображений. Результатом их явился быстрый рост в те же годы коммерческих компьютеров для обработки изображений. Применение компьютеров для обработки статических изображений дает в основном косметическое улучшение сцинтиграмм. Контрастность изображения может быть усилена за счет снятия радиоактивного фона или подчеркивания любого изменения в степени интенсивности, содержащей значительную клиническую информацию. Искажения и ложные детали, почти всегда присущие изображениям, полученным с применением гамма-камер, могут быть частично скорректированы; чаще всего коррекции применяются при недостаточной однородности и линейности. Наконец, существует множество „фильтрующих” программ для улучшения на сцинтиграмме „шумящих” или нерезких краев органов.

Помимо улучшения визуального изображения компьютерная обработка совершенно незаменима при анализе динамических процессов, например, для оценки изменения распределения меченых атомов во времени. Немедленно после инъекции меченых атомов в память компьютера записывается ряд последовательных изображений. Активность в органе или других выбранных областях, вызывающих интерес, фиксируется в зависимости от времени. Эти кривые зависимости активности

от времени затем анализируются с помощью математических и физиологических моделей. Получаемые количественные параметры представительны для функции органа. Успешные методы разработаны в ядерной медицине для динамического анализа многих функций организма, особенно метаболизма мозга, функций почек, опустошения желудка, потока крови и сокращения сердца. Последние достижения в изучении сокращения сердца сделали „ядерную кардиологию” фактически отдельной специальностью.

Обычная сцинтиграфия обеспечивает получение изображения функционирующих органов как проекцию через всю толщину тела. Активности во всех плоскостях, параллельных детектору, накладываются на окончательном снимке. До недавнего времени отдельную часть внутри тела можно было наблюдать только с помощью хирургической томографии. В последнее десятилетие новый вид визуализации, „компьютеризованная томография” (КТ), достиг зрелости в качестве симбиоза значительно усовершенствованного прибора для получения изображения и мощного компьютера. Принцип КТ основан на математической реконструкции трехмерной визуальной информации, собранной в большом количестве отдельных снимков, сделанных с разных сторон объекта. Информация для трехмерного изображения извлекается из памяти компьютера путем выбора плоскостных сечений в фронтальной, боковой, а также в поперечных проекциях. Возможность визуализации структуры в поперечной проекции, перпендикулярной оси тела, внесла особый вклад в значительное расширение анатомических горизонтов.

ПЭТ и ОФЭКТ

Быстрое появление и успешное развитие рентгеновского КТ-метода в качестве обычного инструмента в клинической диагностике еще больше стимулировали развитие ядерно-медицинской КТ или „эмиссионной компьютеризованной томографии” (ЭКТ). Между прочим, ЭКТ была разработана задолго до рентгеновской КТ, но продолжительное время не рассматривалась в качестве подходящего стандартного метода для получения изображений. Две отчетливые разновидности существуют в ядерной медицине: позитронная эмиссионная томография (ПЭТ) и однофотонная ЭКТ (ОФЭКТ).

Трехмерная визуальная информация в ПЭТ обеспечивается путем подсчета совпадений двух одновременных фотонов, сопровождающих позитроны. Позитроны, в свою очередь, испускаются определенными, в основном короткоживущими, радионуклидами. Прибор, создающий изображение в ПЭТ, оборудован детекторами с каждой стороны пациента и обладает относительно высокой чувствительностью, достаточной для детектирования

Основы радиационной визуализации

Первоначально ядерная медицина не занималась вопросами визуализации, однако имела дело с количественной оценкой определенного биомедицинского соединения, находящегося в определенном времени и месте. Концепция кинетики меченых атомов заключается в том, что медики „метят“ биомедицинский препарат радиоактивным „изотопом“ и следят за движением и судьбой этого „меченого атома“. Так как количество добавленного вещества мало и химическое поведение смеси определяет вещество, которое метят, имеется минимальное взаимодействие с нормальной физиологией. Меченые атомы, используемые в ядерной медицине, часто называют „радиофармацевтическими препаратами“.

Тесное сотрудничество биохимиков, физиологов, фармакологов дало большой набор „радиофармацевтических препаратов“. Для большинства органов и для разных функций органов существует специфический меченый атом, который играет особую роль в метаболизме или в механизмах переноса. В основном в качестве радиоактивной „метки“ используется нуклид $Tc-99m$, наиболее подходящий по физическим и химическим свойствам. Он имеет короткое время полураспада, ограничивающее радиационную дозу для пациента и помогающее избежать проблем с отходами.

Характерное преимущество ядерной медицины заключается в том, что меченые атомы ведут себя как „функциональные зонды“. Другие диагностические методы визуализации, такие как радиология и применение ультразвука, делают видимыми статические состояния тканей, такие, как например, плотность. Изображения в ядерной медицине, с другой стороны, отражают действующую биохимию. Стационарное распределение меченых атомов представляет моментальный снимок меченого соединения, застывший акт высокодинамического процесса.

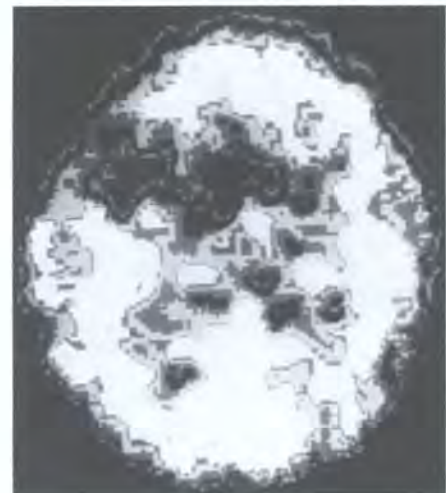
В большинстве методов визуализации используется световая или какая-либо другая радиация такой интенсивности, что она измеряется как общий поток радиации. Гамма-радиация, используемая в ядерной медицине, оперирует мельчайшими единицами, единичными отчетливыми порциями света, называемыми „фотонами“.

Для детектирования гамма-радиации широко используются сцинтилляционные детекторы. В сцин-

тилляционном кристалле каждый проходящий гамма-луч создает слабую световую вспышку. Фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) преобразовывает эту сцинтилляцию в небольшой электронный импульс. Высота импульса или его амплитуда пропорциональны „гамма-энергии“ (и обратно пропорциональны длине волны) падающего фотона. Общее число зарегистрированных фотонов, или „отсчетов“, собранных за данное время, представляет число радиоактивных меченых атомов, т.е. „активность“, присутствующую в поле детектора. Возможность подсчета единичных фотонов делает ядерную медицину подходящей для количественных исследований.

Ограниченное количество фотонов и хаотичный характер самого процесса радиоактивного распада определяют статистическую неточность измерения. Эта неточность проявляется в нерегулярных флуктуациях „шума“ измеряемой интенсивности и нежелательной лоскутности (пятнистости) ядерных изображений.

Сцинтиграмма мозга (Фото СЕА)



значительной части испускаемой радиации. Позитронная ЭКТ применялась весьма успешно, особенно в качестве способа исследований в физиологии и микробиологии. Атомы, составляющие органические соединения, в основном, содержат радиоактивные нуклиды, которые испускают позитроны. Были опубликованы впечатляющие результаты, дающие количественную и визуальную информацию о метаболизме и потреблении кислорода в мозгу и миокарде.

Успех ПЭТ, в свою очередь, стимулировал поиск томографического прибора, в котором могли бы использоваться обычные — однофотонные — нуклиды. Могут быть выделены по крайней мере три категории приборов для ОФЭКТ. Они накапливают необходимые виды с различных углов

или с помощью мультидиафрагменного коллиматора, или вращающегося коллиматора с наклонной диафрагмой, или вращающейся камеры. Вращающаяся камера — наиболее многообещающий инструмент, поскольку она наименее чувствительна к ложным сигналам и позволяет также получать изображение в поперечных плоскостях.

Дополнительные усилия, затраченные на ОФЭКТ, по сравнению с обычной сцинтиграфией, были вознаграждены скромным, но существенным улучшением диагностической точности. Томографическое изображение обеспечивает хороший контраст, т.к. исключается дополнительная проекция нижних структур. Следовательно, более глубокие структуры выявляются с лучшим контрастом.



Система ЭКТ (эмиссионная компьютеризованная томография). (Фото GE)

После того как первая волна энтузиазма по поводу ОФЭКТ спала, были обнаружены ложные детали в изображениях. Ложными деталями могут быть горячие пятна, полосы или круги в окончательном изображении. Считается, что их причиной являются либо значительная активность, которая частично остается вне поля зрения, либо неправильная настройка гамма-камеры. Дефекты однородности, нелинейности и неравномерности вращающейся камеры, как правило, несущественные для обычной сцинтиграфии, усиливаются в процессе реконструкции и могут вызвать серьезные аномалии в окончательном томографическом изображении. Нужны строгие процедуры по контролю качества (КК) для испытания и калибровки, чтобы преимущества ЭКТ не обернулись недостатками.

Тенденции в развитии приборов для визуализации

Ускорение развития оборудования для визуализации в ядерной медицине зависит, хотя бы частично, от того, что поставщики оборудования выберут для производства приборов. Исследования в ядерной медицине характеризуются быстрым развитием, особенно в области применения технических средств. Кажется, что из-за ряда факторов процесс действительного использования этих средств замедлился в последнее время. В то время как инженеры и физики готовы вступить на путь разработки новых конструкций, медицинский мир иногда проявляет больше инерции во взятии на вооружение новых методов и приборов для повседневного клинического использования.

Этим может быть объяснено двухэтапное развитие и принятие новых разработок, как это слу-

чалось недавно с ядерной кардиологией и эмиссионной томографией. Сначала идет волна энтузиазма от новых идей, опубликованных в печати и обсуждаемых на ежегодных научных совещаниях. Этот ажиотаж сменяется относительным затишьем, которое может длиться, по крайней мере, половину десятилетия. Затем неожиданный рост общего признания, вызванный выпуском промышленностью законченных изделий, указывает на то, что новая разработка созрела и будет служить новым инструментом в клинических исследованиях в области визуализации.

Наряду с впечатляющим расширением диапазона других возможностей в визуализации, из-за обычного сокращения расходов на исследования и разработки, промышленная новизна в технике визуализации для ядерной медицины потеряла свою действенность в последние годы. Например, значительное число компаний, производящих компьютеры для ядерной медицины, в последние годы свернули их производство. Более того, рынок в развитых странах достиг насыщения. К настоящему времени в мире установлено 10 000 гамма-камер при скорости ввода в строй около 1000 в год.

Разработки в области электроники

Разработка новых приборов стимулируется и поддерживается в большой степени достижениями в электронике. Последняя тенденция в электронике — миниатюризация, приводящая к увеличивающейся интеграции компонентов и как следствие — к драматическому падению цен на эти „чипы“. Внедрение микропроцессоров вместо традиционного оборудования делает приборы более производи-

тельными и многоцелевыми, но за меньшую цену. Внимание при конструировании переносится с разработки оборудования на разработку программного обеспечения. Большая мощность по обработке сигналов может теперь заключаться даже в более компактных „чипах”. Математическое обеспечение так усложнено, что иногда его называют „firmware”.

Тенденции в развитии гамма-камер и ОФЭКТ

Принцип камеры Энгера имеет врожденные ограничения, которые заставляют проектировщика искать компромисс между, например, чувствительностью и пространственным разрешением (энергия разрешения в изображении). По сравнению с такими методами визуализации, как рентгеновская радиология и ядерный магнитный резонанс (ЯМР), сдерживающим моментом в ядерной медицине является ограниченное количество регистрируемых фотонов в силу ограничения дозы радиации для пациента.

Любой подход к улучшению пространственного разрешения (путем использования более тонкого кристалла или более точного коллиматора) оплачивается потерей чувствительности и появлением большого шума в изображении. Проводятся исследования по применению других сцинтилляторов, таких как йодистый цезий или чистый германий, вместо обычного йодистого натрия. Однако эти поиски еще не привели к появлению нового жизнеспособного прибора. Использование с кристаллом большего количества фотоумножителей лишь слегка продвинуло уровень пространственного разрешения к теоретическому пределу. В то же время, однако, прибор становится более чувствительным к поломке, так как каждый дополнительный компонент вносит свой вклад в вероятность выхода инструмента из строя.

Если принимать во внимание стоимость и относительную надежность, камера Энгера остается приемлемым и практичным прибором для визуализации в ядерной медицине.

Существует более отчетливая тенденция к специализации применения гамма-камер, по сравнению с введением значительных изменений в ее конструкцию. Неизбежные изменения в конструкции камеры могут быть сделаны с учетом конкретных клинических применений, ведущих к созданию специфичных систем. Среди них, например, камеры небольшого поля зрения, приспособленные для высоких скоростей счета, применяемые в ядерной кардиологии; системы камер, вращающихся вокруг тела человека на очень небольшом расстоянии, сконструированные для оптимизации томографических изображений мобильные камеры и камеры, предназначенные для сканирования всего тела.

Представляется, что роль ОФЭКТ в ближайшем будущем возрастет. Этому способствует сопутствующее быстрое улучшение компьютерной технологии и программного обеспечения, наряду с ростом клинических применений. Вместе с ПЭТ, своим наиболее усложненным конкурентом, ОФЭКТ развивается в направлении получения количественного распределения радиоактивных меченых атомов. Важное условие для получения надежных количественных данных — знание точной поправки на поглощение в тканях. Обычно поправка определяется путем измерения истинного поглощения при трансмиссионном сканировании. Недостаток любой коррекции изображения, использующей измеряемую радиоактивность, заключается в увеличении „шума” или в статистических флуктуациях, приводящих к ухудшению результирующего изображения. Другой подход заключается в определении истинного контура тела или применении теоретической поправки в случае принятия его в форме эллипса. Этот подход не ухудшит качество изображения, но может дать менее точное отображение реальной ситуации.

Улучшенная визуализация глубоких слоев

Однако привлекательность проникновения в более глубокие слои ткани или органа оборачивается недостатком, заключающимся в появлении большого количества выделенных картинок. Многие преимущества томографической визуализации зависят от способности представить трехмерное изображение в компактном и удобном виде. В настоящее время разработано много методов, с помощью которых изображение глубины добавляется к томограмме.

Обычные фотоснимки, которые только предполагают трехмерную структуру, имеют преимущества, связанные с их практичностью и транспортабельностью. Их получают с экрана, с помощью которого выявляются следующие друг за другом более глубокие слои с уменьшающейся контрастностью или с удаленными краями, создающими такой же эффект, как занавес на театральной сцене. Другими более сложными изображениями являются стереоскопические снимки, голограммы и „вибрирующее зеркало”, где три измерения ясно „видны” на экране дисплея компьютера, обрабатывающего изображение. Более простой путь выделить глубину на экране компьютера — представить все первоначальные виды в быстро сменяющейся последовательности, как если бы они были сделаны вокруг пациента. Этот „вращающийся вид в движении” оставляет для системы отбора наблюдателя необходимость сгладить шум в изображениях и выделить три измерения в органах человека. Для ПЭТ разрабатывается ряд камер различной конструкции. Некоторые уже стали коммерчески доступными. Однако мир ПЭТ, кажется, отдаляет-



Соперничающие системы визуализации, такие как компьютерная томография, оказывают влияние на будущее радиоизотопной визуализации. (Фото Tech-Ops)

ся все дальше от визуализационных возможностей ОФЭКТ. ПЭТ нуждается в близко расположенном циклотроне с коллективом высокопрофессиональных сотрудников, в то время как с ОФЭКТ работают обычные радиофармацевты. Более того, преимущества клинического применения ПЭТ ограничены в связи с требующимися затратами. Будучи весьма сложным методом *per se*, позитронная томография применяется преимущественно в передовых физиологических исследованиях.

Интегрирование компьютеров с камерами

Тенденция в направлении к более компактному, более производительному и менее дорогому компьютерному оборудованию, объединенная с необходимостью осуществления быстрой коррекции сигнала и изображения, привели к интегрированию компьютера с камерой. Аналоговые позиционные сигналы, следующие от ФЭУ на кристалл детектора, преобразуются на раннем этапе в цифровые данные, и тем самым уменьшаются искажения в изобразительной информации. Эти так называемые „цифровые камеры” работают более стабильно ввиду того, что они менее чувствительны к помехам или к постепенному дрейфу аналоговых сигналов. С другой стороны, так как гам-

ма-камера управляется цифровыми сигналами, любой выход из строя компьютера приведет в негодность всю систему.

Для перестройки алгоритмов в ЭКТ и, например, осуществления анализа Фурье в ядерной технологии должен быть произведен значительный объем вычислений, обычно потребляющий много машинного времени. Параллельные процессоры, такие как матричные, могут обеспечить одновременное проведение большого количества операций. С падением цен на компьютеры матричные процессоры могут стать интегральной частью компьютерных систем для обработки изображений.

Но главный вклад в ядерную медицину будет сделан за счет разработки математического обеспечения. Вместе с тенденцией „вморожить” компьютерные программы в „чипы” это указывает на то, что порядок обработки и анализа изображений станет стандартным свойством приборов для визуализации. В настоящее время программное обеспечение легко доступно для персональных и изготовленных по заказу модификаций, которые подымают стандартизацию процедур. Примером применения, заслуживающим упоминания, является „функциональное изображение”. В функциональном, или „параметрическом” изображении интенсивность цвета каждого элемента картинки („пиксел”) представляет функцию параметра, например, результата математического анализа динамического исследования этой конкретной точки изображения. Функциональные изображения фазы и амплитуды сокращения миокарда после анализа Фурье и работа почек после анализа факторов привлекают всеобщее внимание.

Радиофармацевтические разработки

Ввиду того, что ядерная медицина развивается по многим направлениям, ее будущее определяется не только тенденциями в развитии приборов, но также и развитием радиофармацевтики. Ультракороткоживущие радионуклиды в комбинации с гамма-камерами, работающими с высокими скоростями счета, находят применение в новых областях — в исследованиях кровообращения и в ядерной ангиографии.

Существующая тенденция в разработке меченых атомов, обладающих большой тропностью к органам или к их функциональным состояниям, может открыть целую новую эру в функциональном изображении. Особого упоминания заслуживают моноклональные антитела, соединения с высокой тропностью к опухолям, используемые в настоящее время в радиоиммуноанализе. Если это применение расширится в *in vivo* области, может развиться совершенно новая изобразительная возможность получения изображения („радиоиммунная визуализация”). Если эти антитела удастся

пометить широко доступным $Tc-99m$, ядерные медики получат новый и мощный инструмент в битве против рака.

Растущая конкуренция

Помимо этих разработок существует значительное внешнее влияние на будущее ядерной медицины — усиливающаяся конкуренция со стороны других возможностей визуализации, таких как (цифровая) радиология, ультразвуковая визуализация и ЯМР. Эта конкуренция, наряду с постоянно растущей необходимостью в обработке изображений и использовании компьютера, может продиктовать организацию интегрированных отделов по визуализации в больницах в будущем. Как и в случае *in vitro* разработки в лабораториях, это может привести к постепенному прекращению существующей изоляции отделов ядерной медицины. Для развивающихся стран потребуется для этого от 5 до 10 лет, после того как новые разработки в ядерной медицине станут всеобщим достоянием. Среди других причин — неизбежная ограниченность финансовых ресурсов.

Административные процедуры и политическое давление иногда приводят к установлению временных ограничений для передачи технологии. Обычно длительные бюрократические процедуры вызывают дополнительную задержку поставки нового оборудования. В дополнение ко всему этому есть другие проблемы и более серьезные обстоятельства во многих развивающихся странах. Явно неблагоприятные климатические и энергетические условия создают неподходящую обстановку для все более сложного и деликатного оборудования.

Неадекватная инфраструктура и нехватка иностранной валюты затрудняют регулярную поставку короткоживущих радиофармацевтических препаратов и быстрое проведение ремонта и обслуживания. И, наконец, низкая зарплата и недостаточная подготовка инженеров, наряду со значительной „утечкой мозгов“, не стимулируют рост заинтересованности, знаний и опыта. В целом для развивающегося мира темп развития намного медленней, чем в развитом мире и, соответственно, разрыв в принятой в ядерной медицине технологии продолжает заметно расширяться.

Будущие направления

Тенденции в развитии ядерной медицины и приборов визуализации, кажется, приведут к различным результатам для развивающегося мира и для развитых стран. В обоих мирах существуют значительные различия в моделях болезней и в

клинических вопросах. Более того, ресурсы, выделяемые на сложные медицинские установки, отличаются в абсолютных и относительных выражениях. Рискованно и нереалистично даже пытаться предсказывать будущее развитие визуализации, которое и в своей короткой истории показало себя непостоянным, быстрым и направлялось неожиданными событиями и изобретениями.

В более развитых частях мира скорость распространения новаторских конструкций в оборудовании для ядерной медицины может снизиться в ближайшие годы. Конкуренция со стороны других методов визуализации, использующихся в клинической диагностике, и изменяющееся отношение публики к применениям ядерного излучения могут затормозить прогресс в ядерной медицине.

Интегрирование более мощных компьютеров с гамма-камерами Энгера, похоже, будет продолжаться, оптимизируя изображения в режиме *on-line* и позволяя проводить эффективный анализ динамических процессов. При дальнейшем применении быстродействующих процессоров однофотонная томография может превратиться в обычный точный метод визуализации. Главный вклад в новые клинические исследования сделает разработка радиофармацевтических препаратов, высокотропных к определенному органу.

В то время как прямолинейные сканеры постепенно заменяются гамма-камерами в развивающихся странах, существует очевидная тенденция по подключению компьютеров к существующим гамма-камерам. Это обеспечит новые возможности, как, например, развитие ядерной кардиологии. Система ОФЭКТ только начинает применяться в лучших ядерных медицинских центрах в этой части мира.

Приобретение нового оборудования, в общем, является целью, к которой стремятся с много большим пылом, чем к поддержанию в рабочем состоянии существующих приборов. Тем не менее, хорошо организованные ремонтные и обслуживающие мастерские окажутся весьма важными, как для продолжающегося развития клинического ядерно-медицинского обслуживания, так и для обучения инженеров-электронщиков. Помимо очевидной экономии финансовых ресурсов приобретение знаний и опыта непосредственно на месте поможет странам стать на путь большего самообеспечения.

Однако могут появиться соперничающие разработки в ядерной медицине, и важно оправдать затраты человеческих ресурсов и других ценных ресурсов путем разрешения специфических клинических вопросов и оценки их вклада в здравоохранение вообще. Только если обеспечивается стабильное и надежное качество исследований, а расходы оцениваются с учетом их социального воздействия, ядерная медицина может поддерживать свое значение в качестве полезного и привлекательного инструмента в использовании атома для мира.