Некоторые особенности высокотехнологичных методов диагностики в ядерной медицине

А. В. Баранов, Д. В. Вахрушев

ЗАО «Независимый институт испытаний медицинской техники» (НИИМТ), г. Москва, Россия

Рассмотрены современные наиболее информативные высокотехнологичные методы диагностики, применяемые в ядерной медицине. Оказание медицинской высококвалифицированной помощи при обширном ряде нозологий невозможно без установления верифицированного диагноза. При этом применение только методов стандартной визуализации недостаточно для оценки функциональности патологического процесса. Вместе с тем, имеющиеся способы определения функций патологического очага не всегда позволяют точно локализовать и анатомически выверить даже первичный очаг поражения. Совместное применение двух, а иногда и большего количества методов дает возможность врачам не только улучшить качество диагностики, но и выявить на ранних этапах малозаметные очаги патологий, расположенные вне первично измененных тканей. Применение методов радионуклидной визуализации позволяет оценить функциональные особенности пораженных органов и систем и выбрать наиболее адекватный протокол лечения. Приводится сравнительный анализ эффективности, диагностической информативности отдельных методов с учетом их технической составляющей. Рассмотрены аппаратные решения и технологические схемы, применяемые в практике и реализованные как в нашей стране, так и за рубежом.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: позитронно-эмиссионная томография, ядерная медицина, радионуклид.

Применение радионуклидов в диагностике патологических процессов можно отнести к периоду открытия их родства (тропности) к конкретным тканям человека.

В конце 20-х годов XX века впервые были использованы меченые соединения в клинической практике. Тогда в 1927 г. американские врачи Герман Блумгарт (Hermann Blumgart) и Сома Вайс (Soma Weiss) опубликовали работы по использованию газа радона для определения гемодинамики у больных сердечной недостаточностью.

Хорошей иллюстрацией использования радиоактивных веществ в медицине является закономерность распределения радиоактивного йода [1, 2] при различных заболеваниях щитовидной железы, выявленная в 1939 г. Джозефом Гамильтоном (Joseph Gilbert Hamilton). Им впервые была эмпирически определена нормальная скорость накопления препарата в щитовидной железе. При быстром накоплении диагностировалась гиперфункция щитовидной железы, а если накопление шло медленнее, чем в норме, то — гипофункция.

Важным этапом развития радионуклидной диагностики стало техническое переоснащение регистрирующей аппаратуры, замена счетчиков Гейгера на сцинтилляционные датчики.

В середине 1950-х гг., с развитием атомной промышленности, появилась возможность производить в достаточных количествах различные искусственные радионуклиды, что привело к расширению ассорти-

мента органотропных радиофармпрепаратов (РФП). В это же время совершенствовались и радиометрические приборы.

Так появилась возможность ввести радиоактивную метку в гиппуровую кислоту, которая традиционно использовалась для определения функционального состояния канальцевого аппарата почек [3]. При введении меченого радионуклидами гиппурана и внешней радиометрии раздельно каждой из почек получали две кривые, которые представляли собой графики накопления и выведения препарата каждой из почек — ренограммы. Изменение формы и высоты кривых характеризовали ту или иную патологию. Описанная методика представляет собой классический случай динамического, так называемого функционального, исследования.

Следующим этапом в развитии радионуклидной визуализации стало создание сканера. Было предложено измерять радиоактивность, перемещая датчик радиометра вдоль исследуемого органа, при этом получалась сумма срезов. Такая совокупность линейных срезов или сканов получила название сканограммы, а метод — сканирование.

Создание новых приборов стимулировало разработку новых РФП. Появилась возможность для визуализации на сканере различных органов: щитовидной железы с ^{131}I , печени с ^{197}Au , почек с ^{169}Yb , сердца с ^{201}Tl , легких с ^{133}Xe , поджелудочной железы с ^{75}Se и т. д. [1, 4]. При отсутствии ультразвуковой диагностики (УЗИ) и компьютерной томографии (КТ) радио-

нуклидное сканирование являлось единственным методом визуализации очагового поражения органов и тканей.

Большинство из перечисленных РФП имело повышенную радиотоксичность в основном из-за большого периода полураспада ($T_{1/2}$), например у ^{75}Se — 121 день. Оптимальным для проведения исследования являлся бы препарат с небольшим $T_{1/2}$, в идеале — несколько часов или минут.

Проблема была решена с помощью применения генераторов радиоактивных изотопов. Принцип работы генератора основывается на том, что распад некоторых нестабильных элементов заканчивается не образованием стабильного изотопа, а созданием дочернего, нового нестабильного элемента [5].

В медицинской диагностической практике используются чаще всего две генераторные пары ^{113}Sn — $^{113\text{m}}\text{In}$ и $^{99\text{m}}\text{Mo}$ — $^{99\text{m}}\text{Tc}$. В России, да и за рубежом, чаще работают с радиоактивным изотопом $^{99\text{m}}\text{Tc}$ [6], имеющим идеальный для скинтиграфии моноэнергетический спектр γ -излучения и $T_{1/2}$ — 6 часов. Для его получения используется ^{99}Mo , $T_{1/2}$ которого ~ 7 суток.

В конце 60-х — начале 70-х гг. прошлого века бурное развитие технологии создания крупных кристаллов, химии полимеров и радиоэлектроники позволило создать качественно новый вид радиометрического прибора — гамма-камеру.

При попадании γ -квантов кристалл засвечивается целиком, но с разной интенсивностью, наибольшей в месте попадания частицы [1, 7]. Несложная плечевая электронная схема опроса ФЭУ¹ позволяет определить координаты попадания частицы и вывести их на дисплей прибора. Изображения, полученные на гамма-камере, получили название скинтиграммы, а метод — скинтиграфии.

В настоящее время для диагностики используются РФП на основе технеция, йода, таллия и др. [8]. Перспективы развития методик радиоизотопной диагностики сводятся к замене радионуклидов с большим $T_{1/2}$ на короткоживущие радиоизотопы, не испускающие β -частиц ($^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{123}I). Внедрение в клиническую практику инертных радиоактивных газов ^{133}Xe и ^{85}Kr позволит получить наиболее адекватный и прямой способ оценки вентиляции легких.

На первых гамма-камерах регистрация количества частиц происходила за счет длительного «запоминающего» свечения люминофора дисплея. С развитием компьютерных технологий все гамма-камеры оборудовались запоминающим устройством и программами обработки изображения. Бурное развитие компьютерной техники в 1980-е гг. привело к созданию новых систем обработки скинтиграмм, в частности к созданию эмиссионного компьютерного томографа [1, 4].

¹ ФЭУ — фотоэлектронный умножитель.

В 1931 г. Отто Варбург (Otto Warburg) обнаружил, что злокачественные опухоли отличаются повышенным уровнем потребления глюкозы [9].

Концепция эмиссионной и трансмиссионной томографии была представлена Давидом Кухлем (David Edmund Kuhl) и Роем Эдвардсом (Roy Edwards) в конце 1950-х гг. Майкл Тер-Погосян (Michael Ter-Pogossian) в 1975 г. совместно с Дж. Эуджен-Робинсон (J. Eugene Robinson) и К. Шарп Кук (C. Sharp Cook) изобрел способ регистрации γ -квантов после аннигиляции позитронов. Им впервые сконструирован позитронно-эмиссионный томограф (ПЭТ) [9].

В 1977 г. Л. Соколов (L. Sokoloff) предложил измерять локальный уровень метаболического потребления глюкозы в мозгу крыс с помощью дезокси-глюкозы, меченой радиоактивным изотопом углерода. Майкл Фелпс (Michael Edward Phelps) в 1979 г. предложил измерять тот же параметр у людей с помощью дезокси-глюкозы, меченой радиоактивным изотопом фтора ^{18}F — фтородезоксиглюкозы (ФДГ) [5, 10]. ФДГ является аналогом глюкозы на нескольких этапах ее метаболизма, но, в отличие от глюкозы, метаболизм ФДГ прекращается преждевременно и ее продукт накапливается в тканях.

Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ-исследование) расширила наше понимание биохимических основ нормальной и патологической работы систем внутри организма и позволила проводить биохимические исследования пациентам *in vivo* одновременно с их лечением.

ПЭТ-исследование — высокоспецифичный, неинвазивный метод визуализации, при котором с помощью меченых короткоживущими радионуклидами соединений получают трехмерное цветное изображение распределения этих веществ в организме [4, 11]. В отличие от УЗИ, КТ и магнитно-резонансной томографии (МРТ), визуализирующих анатомические структуры, ПЭТ-исследование дает информацию о биохимических процессах, метаболической активности и функциях организма, которую невозможно получить другими способами [11]. Наиболее избирательной, специфичной и адекватной является терапия, выбранная на основании данных исследования нарушений биохимических процессов, лежащих в основе заболеваний. Определение биохимических нарушений обеспечивает наиболее раннюю диагностику заболеваний, даже на досимптомных стадиях, еще до того, как израсходованы резервы или истощены компенсаторные механизмы организма [12]. Оценка возможности восстановления функции позволяет объективно определять эффективность терапевтических вмешательств для каждого конкретного пациента.

Учитывая это, ПЭТ-исследование нашло применение в изучении многих биохимических процессов *in vivo*, когда локализация и протяженность патологи-

ческого процесса неизвестна, а использование эффективного метода диагностики «во всем теле» является первостепенной задачей. Получение объемных изображений после ПЭТ-сканирования облегчает диагностику заболеваний и позволяет выявить отдаленные метастазы [11].

ПЭТ-исследование предоставляет возможность визуализировать ход биологических процессов *in vivo*. Визуализация реализуется путем интеграции двух методик: анализа кинетики метки и КТ. Анализ кинетики метки включает в себя применение меченых радиоактивными изотопами биологически активных веществ (что и является меткой) и математических моделей, описывающих кинетику метки при ее вовлечении в биологический процесс. Измерение концентрации метки в ткани, необходимое для математической модели, производится ПЭТ-сканером. Результатом является трехмерное изображение распределения радионуклида в анатомическом органе.

Меченые радиоизотопами метки и метод анализа кинетики метки используются для количественной оценки таких процессов, как кровоток, мембранный транспорт, метаболизм, синтез, лиганд-рецепторные взаимодействия, картирование аксональных зон протекания антероградной и ретроградной диффузией, регистрация моментов клеточного деления, маркерный анализ с использованием метода рекомбинантной ДНК, радиоиммунный анализ, исследования взаимодействия препаратов с химическими системами организма [13]. Методика использования меток продолжает оставаться одной из самых чувствительных и широко используемых для анализа состояния биологических систем. ПЭТ-исследование связывает воедино точные и клинические науки благодаря общности методов и решаемых задач.

В процессе ПЭТ-исследования позитрон-эмиттирующий радиоизотоп вводится пациенту внутривенно или путем ингаляции. После этого изотоп циркулирует в кровяном русле, достигает патологического очага и накапливается в нем. Как только происходит аннигиляция, томограф регистрирует локализацию изотопа и вычисляет его концентрацию. Линия, которая возникает после аннигиляции, отражает собой эмиссию двух γ -квантов с энергией 511 кэВ, направленных приблизительно на 180 градусов (противоположно) друг к другу [4]. Работа томографа заключается в том, чтобы регистрировать эти лучи, означающие, что позитронная аннигиляция произошла где-то на данной линии совпадения. Когда γ -кванты взаимодействуют с кристаллами сцинтиллятора, изготовленными, например, из германата висмута, они преобразуются в фотоны света.

В ПЭТ-исследованиях используются соединения, меченые ^{11}C ($T_{1/2}$ — 20,4 мин); ^{13}N ($T_{1/2}$ — 10,0 мин); ^{15}O ($T_{1/2}$ — 2,1 мин); ^{18}F ($T_{1/2}$ — 109 мин);

^{82}Rb ($T_{1/2}$ — 1,25 мин). Все они являются короткоживущими радионуклидами, и синтез на их основе меченых веществ представляет собой сложную задачу [10]. Ввиду того, что радионуклид ^{18}F — один из наиболее удобных для клинического использования, на его основе синтезируется самый обширный класс фармпрепаратов для ПЭТ, среди которых наиболее широко используется ФДГ.

Указанные изотопы являются единственными формами «физиологических» элементов (^{18}F используется как замена водорода), которые в результате позитронного распада с последующей аннигиляцией испускают ионизирующее излучение, способное проникать сквозь тело и регистрироваться за его пределами. Фармпрепараты, метаболиты и их аналоги могут быть помечены этими радиоизотопами, при этом их химические или биологические свойства не изменяются.

Химическое соединение, помеченное таким радионуклидом, выбранным из ряда «физиологичных» короткоживущих радионуклидов, может быть метаболическим субстратом или одной из важных в биологическом отношении молекул. Эта технология при использовании соответствующих РФП и фармакокинетических моделей, описывающих распределение и метаболизм препарата в тканях, кровяном русле и межклеточном пространстве, позволяет неинвазивно и количественно оценивать ряд физиологических и биохимических процессов. В этом и состоит принципиальное отличие ПЭТ-исследования, которое называют «функциональной томографией», от КТ и МРТ, оценивающих структурные изменения тканей [14]. Биохимические процессы нарушаются фактически при всех заболеваниях, и эти нарушения обычно предшествуют анатомическим изменениям. ПЭТ-исследование дополняет диагностический процесс информацией о физиологических и метаболических расстройствах в очагах поражения, что существенно уточняет характеристику заболевания, позволяет уточнить диагноз и способствует выбору правильного протокола лечения.

Метод ПЭТ позволяет изучать на молекулярном уровне биохимические процессы организма в томографическом режиме. В онкологической практике ПЭТ дает возможность выявлять опухолевые очаги и количественно оценивать их активность [15]. Принцип функциональной визуализации опухолей выгодно отличает ПЭТ-исследование от анатомо-топографических методов лучевой диагностики (ультразвуковой томографии, рентгеновской компьютерной и магнитно-резонансной томографии), которые оценивают динамику опухолевых субстратов по изменению их размеров и структуры. Специфичность ПЭТ-исследования заключается в возможности визуализации жизнеспособной опухолевой ткани и оценки ее биологической активности по степени интенсивности накопления в тканях метабо-

лического РФП. Таким образом, ПЭТ-исследования обеспечивают возможность получения уникальной информации, в частности, позволяют проводить достоверную дифференциальную диагностику злокачественных опухолей, доброкачественных новообразований и неопухолевых заболеваний, обеспечивают точное определение регионарной и отдаленной распространенности опухолевого процесса «во всем теле» и за одно исследование, объективную оценку эффективности проводимого лечения, а также раннее выявление рецидивов.

В применении ПЭТ-исследований исключительно с ФДГ выявлены ограничения, связанные, в частности, с неспособностью визуализации опухолей малых размеров, некоторых опухолей мозга и опухолей мочеполовой системы, а также с трудностями дифференцирования злокачественного новообразования и воспалительных изменений в окружающих тканях [11, 16]. Поэтому актуальной является задача разработки новых РФП с повышенной тканеспецифичностью и особенно с более высокой туморотропностью. Ведутся работы как по созданию новых РФП, меченых ^{18}F (для устранения перечисленных недостатков ФДГ), так и РФП, меченых другими позитронно-излучающими радионуклидами.

Кроме изучения метаболизма опухолей и выявления истинной распространенности опухолевого процесса ПЭТ-исследования в онкологии имеют существенное значение для количественной оценки перфузии опухолей (для планирования системной или регионарной химиотерапии, определения проницаемости гематоэнцефалического барьера при лечении больных, имеющих опухоли головного мозга), а также для исследований фармакокинетики меченых противоопухолевых химиотерапевтических агентов.

Таким образом, по общепринятой оценке ведущих специалистов в области лучевой диагностики, ПЭТ-исследования являются чрезвычайно перспективными функциональными методами молекулярной визуализации опухолевых очагов у больных злокачественными новообразованиями [6, 10].

ПЭТ-исследование «всего тела» не включает исследование головного мозга. Эта область обследуется по специальной программе; в ряде случаев при опухолевых поражениях мозга иные методы исследования (КТ, МРТ) могут быть не менее информативными.

Ценнейшая информация, получаемая при обследовании больных злокачественными новообразованиями, позволяет считать ПЭТ-исследование одним из ведущих диагностических методов [10]. Это обстоятельство привело к резкому возрастанию относительной доли этих исследований в онкологической практике (до 90 % исследований в мире).

Самой значимой оценкой эффективности и практической важности диагностического метода является

его рейтинг у страховых медицинских компаний. ПЭТ-исследования в онкологии с 1998 г. признаны обоснованными и начали оплачиваться страховой медициной. Вначале — при новообразованиях легких, в последующем — при раке толстой кишки, злокачественных лимфомах, меланоме, а с 2000-х гг. — при раке пищевода, молочной железы, опухолях области головы и шеи [6]. Обсуждается целесообразность включения в этот перечень ПЭТ-исследований для диагностики опухолей головного мозга, рака поджелудочной железы, мелкоклеточного рака легкого, рака шейки матки, рака яичников, злокачественных опухолей яичка. Дополнительным обоснованием применения ПЭТ в клинической практике являются показатели эффективности метода: чувствительность, специфичность и точность.

Высокая прогностичность отрицательного результата при ПЭТ-исследовании означает, что истинно доброкачественный узел не накапливает РФП и такой пациент не нуждается в дальнейшем обследовании. Высокая прогностичность положительного результата означает, что все пациенты с позитивным результатом ПЭТ-исследования должны проходить дальнейшее обследование в связи с высокой вероятностью злокачественной опухоли.

Приведем некоторые примеры эффективности применения ПЭТ в клинической диагностике.

В исследовании Schoder H. и соавт. [15] чувствительность ПЭТ с мечеными йодом-124 моноклональными антителами (G250) в диагностике светлоклеточного рака почки была 94 % (15 случаев из 16). У 9 больных с другими видами опухолей почки результаты ПЭТ-исследования были отрицательными, что свидетельствует о высокой прогностической значимости этого метода для определения менее агрессивных типов рака и о 100 %-ной специфичности. «ПЭТ-исследование с использованием антител может поставить точку в изменении стандартов лечения рака почки, — считает доктор Пол Руссо (Paul Russo), уролог-онколог из Мемориального онкологического центра им. Слоуна-Кеттеринга (Memorial Sloan-Kettering, штат Нью-Йорк). — Высокая чувствительность и специфичность этого метода позволяют использовать его, чтобы определить тактику лечения опухолей почки без клинических признаков метастазирования, а также в качестве альтернативы диагностической биопсии» [13].

В ряде исследований было показано, что накопление ФДГ в первичной опухоли при протоковом раке молочной железы было значительно интенсивнее, чем при дольковом раке [17]. Что касается предоперационного стадирования рака молочной железы, то, по данным ряда зарубежных авторов, чувствительность ПЭТ-исследования при диагностике мультифокального поражения оказалась вдвое выше, чем при комби-

нированном применении маммографии и УЗИ (63 и 32 % соответственно). Также сообщается, что чувствительность и специфичность ПЭТ-исследования метастатического поражения аксиллярных лимфатических узлов составляют 79 и 92 % соответственно.

Влияние результатов ПЭТ-исследования на установление стадии заболевания и выбор тактики лечения больных раком молочной железы проанализировано в ряде зарубежных работ. Авторы указывают, что с учетом находок при исследовании клиническая стадия была изменена в 36 % наблюдений (28 % — в сторону увеличения, 8 % — в сторону уменьшения), вид лечения был скорректирован у 28 %, а объем лечения — у 30 % больных. При оценке эффективности диагностики отдаленных метастазов было установлено, что ПЭТ-исследование имеет аналогичную скинтиграфии скелета чувствительность (77,7 %), однако обладает более высокой специфичностью (97,6 и 80,9 % соответственно). Диагностическая чувствительность и специфичность ПЭТ-исследования у пациентов с подозрением на рецидив рака молочной железы, имеющих асимптоматическое повышение уровня опухолевых маркеров, составляют 96 и 90 % соответственно.

Проведение ПЭТ-исследования предполагает наработку радионуклидов на циклотроне, метку ими специфических РФП, введение этих РФП пациенту с последующей визуализацией процессов их накопления и метаболизма в организме при ПЭТ-сканировании. Технология ПЭТ-исследования требует создания специального подразделения радионуклидной диагностики — ПЭТ-центра, предназначенного для производства РФП и проведения диагностической процедуры ПЭТ/КТ. Такой центр должен иметь циклотрон для наработки позитронно-излучающих изотопов, радиохимический комплекс для производства РФП, меченых этими изотопами, и радиодиагностическое отделение, оснащенное ПЭТ или ПЭТ/КТ томографами. Этот комплекс создается как отдельно контролируемая зона, недоступная для посторонних лиц, включая пациентов. Процессы наработки изотопов и синтеза РФП происходят под контролем дистанционной системы наблюдения, что максимально сокращает время контакта персонала ПЭТ-центра с радиоактивными веществами [19].

Процесс получения РФП осуществляется автоматизировано, без непосредственного участия радиохимика. Поскольку позитронно-излучающие изотопы быстро распадаются, из соображений рентабельности ПЭТ-центр целесообразно оснащать минимум тремя ПЭТ-сканерами, чтобы одновременно исследовать сразу нескольких пациентов.

Использование ПЭТ в клинической практике предъявляет определенные требования к характеристикам и производительности аппаратуры, компью-

терному оборудованию и программному обеспечению цифровой обработки, которые отличаются от таковых у систем, используемых в исследовательской деятельности. Разрешающая способность позитронно-эмиссионного томографа должна быть сбалансирована приемлемым уровнем шума на изображениях и достаточно высокой пропускной способностью системы. Для большинства используемых сегодня ПЭТ-систем приемлемым является внутреннее разрешение, равное приблизительно 6 мм по всем пространственным направлениям. При таком разрешении после реконструкции могут быть получены высококачественные изображения с конечным разрешением в 8—10 мм. Такие системы имеют показатель расстояния дискретизации, равный 3 мм по всем пространственным направлениям. Относительно однородное разрешение и дискретизация обеспечивают их пригодность к проведению настоящей трехмерной визуализации. Это имеет большое значение, к примеру, при проведении кардиоисследований, где существует необходимость реориентировать данные вдоль «продольной» оси.

Позитронно-эмиссионный томограф должен позволять проводить исследования не только одного органа или анатомической области, например, головного мозга или сердца, но и любых по протяженности анатомических областей, включая исследования всего тела. Большинство современных позитронно-эмиссионных томографов позволяют выполнять такие исследования. Поле обзора таких систем, равное 60 см, дает возможность проводить исследования практически любым пациентам. Аксиальное поле обзора большинства современных позитронно-эмиссионных томографов ограничивается приблизительно 10 см, что накладывает некоторые ограничения на определенные визуализирующие исследования, которые могут проводиться в клинике, и требует более точной укладки пациента по сравнению с другими методами исследования в ядерной медицине. Для систем, используемых в клинических исследованиях, желательнее расширить аксиальное поле обзора до 15—20 см. Это позволит, к примеру, проводить визуализацию всего головного мозга или всего сердца в одном кадре и повысит эффективность при исследованиях всего тела. Однако из-за того, что детекторы во многом определяют общую стоимость оборудования, возникает вопрос о предельной приемлемой стоимости позитронно-эмиссионного томографа.

Одним из важных параметров является выход изотопа, т. е. количество определенного изотопа, которое можно получить при облучении мишеней. Выход изотопа зависит от многих факторов: силы тока при облучении мишени, конструкции и объема мишени. Так, при увеличении тока, с которым «бомбардируют» материал мишени, увеличивается и выход изотопа, при этом мишень начинает сильнее нагреваться, поэтому

очень важной задачей является эффективное охлаждение мишени.

Клинический позитронно-эмиссионный томограф должен поддерживать широкий диапазон скоростей счета без существенных потерь в разрешающей способности и линейности. В большинстве клинических исследований, таких как, например, ФДГ-исследование головного мозга или исследования жизнеспособности миокарда с использованием ФДГ или NH_3 , вводимая активность не требует скоростей счета, близких к пределу «мертвого времени» сканера. В исследованиях с высокими скоростями счета, такими как, например, кардиоисследования с ^{82}Rb , вводимая активность РФП может быть высокой, что приводит к существенным ограничениям возможности аппаратуры. Большинство систем имеют встроенную систему коррекции «мертвого времени», таким образом, обеспечивая линейную реакцию на вводимую активность РФП.

В настоящее время существует множество различных РФП для ПЭТ-исследований, что позволяет по праву рассматривать этот метод как инструмент для изучения биологических процессов *in vivo* [18]. Так, например, аналоги природной глюкозы — ^{18}F -фтордезоксиглюкоза (^{18}F -ФДГ), [^{11}C]-D-глюкоза — используются для оценки скорости метаболизма глюкозы, меченая [^{15}O] вода предназначена для оценки мозгового кровотока, [$^{15}\text{O}_2$] — для оценки метаболизма кислорода. [^{11}C]-метил-L-метионин, [^{11}C]-лейцин, [^{18}F]-тирозин, ^{18}F -фторхолин применяются для оценки уровня метаболизма и транспорта аминокислот и синтеза белков, ^{18}F -фтортимидин — для оценки скорости пролиферации опухолевых клеток, ^{18}F -фтормизонидазол — для выявления тканевой гипоксии. [^{11}C]-L-3,4-дигидроксифенилаланин (^{11}C -L-DOPA), ^{18}F -DOPA и [O-метил- ^{11}C]-раклоприд используются для изучения пре- и постсинаптических процессов в дофаминергической системе, а [^{18}F]-флюмазенил — в бензодиазепиновой.

Таким образом, разнообразие существующих РФП позволяет выбрать оптимальный вариант в зависимости от целей исследования для наиболее адекватной ПЭТ-методики. В последние годы появились сообщения об успешном применении ^{18}F -холина и ^{11}C -ацетата в исследованиях рака предстательной железы и опухолей мозга; ^{18}F -DOPA — нейроэндокринных и гломусных опухолей, феохромоцитомы, медуллярного рака щитовидной железы; ^{11}C -метионина — опухолей области головы и шеи, легких, молочной железы, но этих данных пока недостаточно. Поэтому в клинических исследованиях используется ограниченное количество РФП, а в подавляющем большинстве случаев применяется ^{18}F -ФДГ, с которой проводится порядка 90 % всех ПЭТ-исследований. В мире потребность в ФДГ неуклонно растет. В развитых странах суще-

ствует структура поставок ФДГ удаленным пользователям, и один циклотрон обеспечивает потребности в ФДГ нескольких ПЭТ-центров. В России ожидается бурный рост количества ПЭТ-центров и потребности в ФДГ будут расти. В связи с этим при приобретении циклотрона нужно рассматривать долгосрочную перспективу.

Важным аспектом клинической ПЭТ (чем зачастую пренебрегают) является необходимость в быстром и эффективном программном и аппаратном обеспечении, отвечающем за цифровую обработку. После завершения сбора информации программное обеспечение должно позволять формировать предварительные изображения до ухода пациента. Конечные изображения при стандартных исследованиях должны быть готовы в течение одного часа после окончания исследования. Это подразумевает максимальную автоматизацию программного обеспечения и минимальное участие оператора в процессе. Так как в клинических ПЭТ-центрах проходят исследования 8—10 пациентов в день, то маловероятно, что на компьютере, отвечающем за сбор информации, останется свободная оперативная память на обработку уже проведенных исследований. Для того, чтобы были обработаны все данные, необходима дополнительная мощность в обработке, реализуемая путем установки дополнительной рабочей станции или станций. Это, в свою очередь, подразумевает, что компьютеры будут объединены в единую сеть для обмена информацией между станциями сбора и обработки.

Исследования с использованием короткоживущих радионуклидов в ядерной медицине помогают практикующим врачам изучать метаболические процессы, происходящие в организме пациента. На современном этапе развития ядерных технологий в медицине радионуклидная диагностика все активнее применяет такие радионуклиды, которые без потери информационной значимости наносят меньший ущерб здоровью пациентов и менее опасны для персонала [19]. Заболевание в первую очередь нарушает метаболические процессы, и обычно эти изменения происходят до появления анатомических отклонений, которые распознаются классическими рентгенографическими методами. Таким образом, раннее обнаружение метаболических изменений может дать более убедительные основания для медицинского или хирургического вмешательства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Радионуклидная диагностика для практических врачей / Под ред. Ю. Б. Лишманова, В. И. Чернова. Томск: STT. 2004: 394.
2. Барановский О. А., Киринок С. Д. Радионуклидная диагностика при раке щитовидной железы. Новости лучевой диагностики, Минск, 2000; Том 2: 90—91.
3. Тюрин И. Е. Диагностическая онкорadiология. Практическая онкология. 2007; 8 (4): 188—193.

4. Бекман И. Н. Курс лекций ядерная медицина. Лекция 5. Позитронная эмиссионная томография. <http://profbeckman.narod.ru/MED5.htm>.
5. Радионуклидная диагностика / Под ред. Ф. М. Лясса. М.: Медицина, 1983. 304 с.
6. Sharp P. F., Gemmel H. G., Smith F. W. Practical Nuclear Medicine. Oxford university press. Oxford, 2005: 188—190.
7. Грот Ш. Использование ядерных методов в здравоохранении: постоянные выгоды. Бюллетень МАГАТЭ 2000; 42 (1): 33—40.
8. Иванов С. И., Акопова Н. А., Ермолина Е. П. Гигиенические аспекты обеспечения радиационной безопасности при радионуклидной диагностике. Здравоохранение и медицинская техника 2005; № 2 (16) / <http://medafarm.ru/php/content.php?id=6065/>.
9. Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) позволяет выявлять агрессивный рак почки, требующий хирургического вмешательства. UroWeb.ru 16.05.2007 г. Перевод Сорокин К. В. Москва, 2007.
10. Nuclear Medicine (Special section). Medical Imaging 2000; 6: NM37-NM56.
11. Рудас М. С., Насникова И. Ю., Матякин Г. Г. Позитронно-эмиссионная томография в клинической практике. Учебно-методическое пособие. Центральная клиническая больница УДП РФ. М., 2007. С. 45.
12. Kostakoglu L., Hardoff R., Mirtcheva R., Goldsmith S. J. PET-CT Fusion Imaging in Differentiating Physiologic from Pathologic FDG Uptake. RadioGraphics 2004; 24: 1411.
13. Alavi A., Lakhani P., Mavi A., Kung J. W., Zhuang H. PET: a revolution in medical imaging. Radiol. Clin. North Amer. 2004; 42: 983.
14. Positron Emission Tomography—Computed Tomography (PET/CT); Radiology Info. <http://www.radiologyinfo.org/en/info.cfm?PG=pct>.
15. Schoder H., Yeung H. W. D., Gonen M., Kraus D., Larson S. M. Head and Neck Cancer: Clinical Usefulness and Accuracy of PET/CT Image Fusion. Radiology 2004; 231: 65.
16. Kostakoglu L., Agress H., Goldsmith S. J. Clinical Role of FDG PET in Evaluation of Cancer Patients. Radio Graphics 2003; 23: 315.
17. Shiue C. Y., Welch M. J. Update on PET radiopharmaceuticals: life beyond fluorodeoxyglucose. Radiol. Clin. North Amer. 2004; 42: 1033.
18. Zhuang H., Kumar R., Mandel S., Alavi A. Investigation of thyroid, head, and neck cancers with PET. Radiol. Clin. North Amer. 2004; 42: 1101.
19. Наркевич Б. Я. Дозиметрия внутреннего облучения при диагностическом и терапевтическом использовании радиофармпрепаратов. Итоги науки и техники. Радиационная биология. М.: Изд-во ВИНТИ, 1991: 91—132.

Сведения об авторах:

Баранов Алексей Владимирович

руководитель отдела испытаний радиационной техники ЗАО «НИИМТ», г. Москва, Россия, канд. мед. наук

Вахрушев Дмитрий Валерьевич

генеральный директор ЗАО «НИИМТ», г. Москва, Россия

Адрес для переписки:

115162, г. Москва, ул. Шухова, д. 14

Телефон: +7 (495) 660-30-39

E-mail: baranov@niimt2.ru

POLICY AND MANAGEMENT IN HEALTHCARE

Upgrading Healthcare

Selected Characteristics of High Technology Diagnostic Methods in Nuclear Medicine

A. V. Baranov, D. V. Vahrushev

This review covers the most informative modern high technology diagnostic methods used in nuclear medicine. Delivery of high quality medical care for a wide range of nosologies is impossible without establishment of the verified diagnosis. However application of only standard visualization techniques is not enough for evaluation of the pathological process. With that the current methods of determination of pathological lesion functions do not always allow determining exact localization and anatomical verification even of the primary lesions. Simultaneous application of two, sometimes even more methods gives clinicians an opportunity not only to improve the quality of diagnostics but also to recognize on the early stages nearly invisible pathological lesions located outside of the primary diseased tissues. Application of radionuclide visualization methods allows assessment of the functional characteristics of the diseased organs and systems and choosing the most adequate treatment protocol. The authors present comparative analysis of effectiveness and diagnostic value of certain methods taking into consideration their technical input. They discuss engineering designs and technology schemes implemented in practice in the Russian Federation and other countries.

KEYWORDS: positron emission tomography, nuclear medicine, radionuclide.