



Ускорительные и радионуклидные технологии в клинической медицине

Черняев А.П.^{1,2} • Варзарь С.М.¹

Черняев Александр Петрович – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета¹; заведующий лабораторией пучковых технологий и медицинской физики²

Варзарь Сергей Михайлович – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета¹
✉ 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1/2, физический факультет МГУ, Российская Федерация
Тел.: +7 (495) 939 49 46.
E-mail: varzar@physics.msu.ru

В клиническую практику современной медицины все активнее проникают методы, основанные на использовании ускорительных и радионуклидных технологий. Цель данного обзора – показать роль ядерно-физических методов в лечении и диагностике заболеваний. Проанализированы данные, опубликованные в течение последних 50 лет в научных статьях, отчетах и других открытых источниках. Рассмотрены особенности применения

в лучевой терапии и ядерной медицине ускорителей электронов и тяжелых заряженных частиц, приведены сведения о распространенности ускорителей и другой высокотехнологичной медицинской техники в России и в мире.

Ключевые слова: медицинская физика, ионизирующие излучения, медицинские ускорители, ядерная медицина

doi: 10.18786/2072-0505-2016-44-2-260-268

¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»; 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, Российская Федерация

² Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова; 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1/2, Российская Федерация

В конце XIX века исследование строения вещества привело к открытию излучений, проникающих через непрозрачные среды. В 1895 г. В. Рентген обнаружил, что при попадании на анод катодных лучей возникают X-лучи – рентгеновское излучение, в 1896 г. А. Беккерель открыл способность испускать излучение солями урана. Оба вида лучей при прохождении через вещество ионизировали его и приводили к изменению его структуры.

Практически с момента открытия ионизирующих излучений началось их использование в различных отраслях мирового хозяйства, и в первую очередь в медицине. Структура применения ионизирующих излучений в медицине включает в себя несколько основных направлений: рентгеновскую диагностику и терапию, лучевую терапию и ядерную медицину (рисунок).

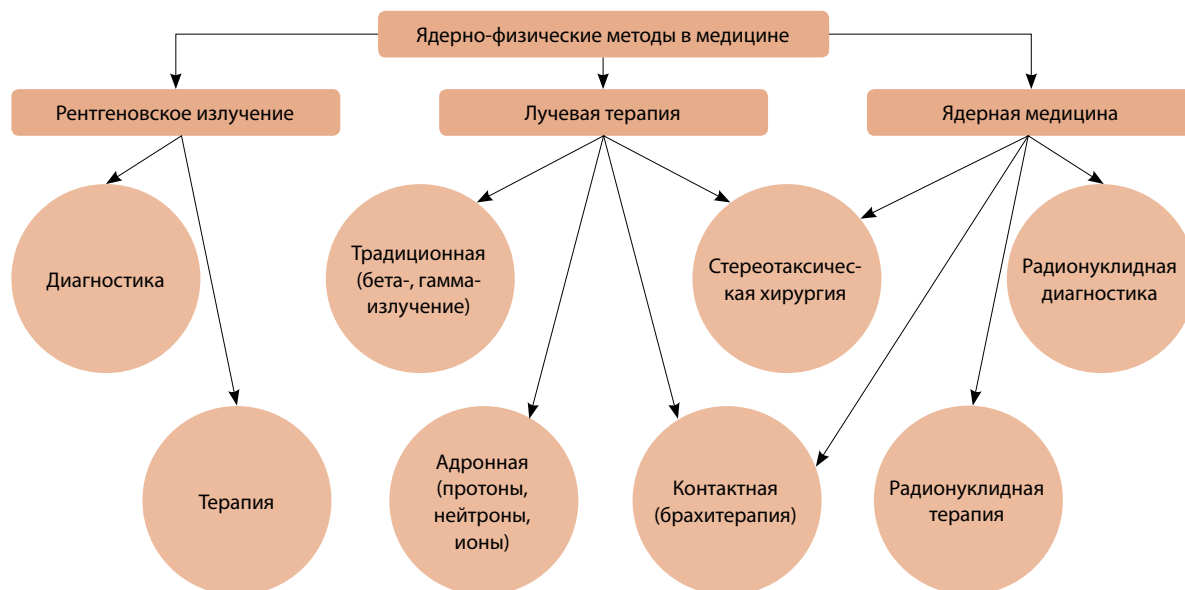
По последним оценкам [1, 2, 3], в медицине, не считая рентгеновские аппараты, используются более 110 тысяч единиц техники, действие которых основано на технологиях ядерной физики, в том числе около 14 000 ускорителей

электронов и протонов, порядка 100 реакторов, 1500 кобальтовых установок, примерно по 300 гамма-ножей и кибер-ножей, более 2200 аппаратов для брахитерапии. Кроме того, существует диагностическое оборудование: порядка 30 000 установок магнитно-резонансной томографии, 40 000 компьютерных томографов и 4000 позитронно-эмиссионных сканеров, входящих в состав 600 центров позитронно-эмиссионной томографии.

Ниже приводится анализ данных о распространенности в области медицины методов, основанных на использовании пучковых и радионуклидных технологий.

Медицинские ускорители

По мере развития науки для экспериментального исследования вещества и явлений на субатомном уровне стало не хватать энергии и интенсивности пучков частиц от естественных изотопов. В конце 20-х – начале 30-х гг. прошлого века были разработаны и запущены первые ускорители: линейный ускоритель Видероэ (1928), каскадный



Структура использования ионизирующих излучений в медицине

ускоритель (1929), электростатический генератор Ван де Граафа (1931), циклотрон (1931).

Ускорители в медицине начали использовать менее чем через 10 лет после их создания. Уже в 1937 г. в Лондоне высоковольтный ускоритель был применен для лечения онкологических заболеваний. Активное проникновение ускорительной техники в медицину связывают с 1970-ми [4]. К этому времени в данной отрасли работало уже более 300 ускорителей различных типов (157 бетатронов, 118 линейных ускорителей, 22 ускорителя Ван де Граафа и 9 резонансных трансформаторов). Были проведены пробные эксперименты по использованию ускорителей протонов – их действовало 4, в том числе 2 в нашей стране.

С 1980-х гг. линейные ускорители электронов существенно уменьшились в размере и стали удобными для использования в лучевой терапии [2]. Они начали вытеснять доминировавшие до этого бетатроны и кобальтовые установки. Уже к 2000 г. в мире количество медицинских ускорителей достигло 5000 [5, 6, 7], сегодня возросло почти до 12000 [1, 3, 8, 9, 10, 11]. Если темпы роста числа медицинских ускорителей сохраняются, то, к примеру, к 2020 г. их будет более 20000.

Сегодня медицинские ускорители есть в 117 странах мира, причем подавляющее большинство – более 9500 аппаратов – сконцентрированы в 17 ведущих государствах. По данным Международного агентства по атомной энергии, из 17 стран, использующих в области медицины более 100 ускорителей, Российская Федерация

занимает 13-е место по числу аппаратов и 15-е по количеству жителей на один ускоритель (табл. 1) [10].

С начала 1990-х гг. основными производителями ускорительной техники стали компании Varian, Elekta, IBA, до некоторого времени – Siemens и Philips. Бурный рост продаж медицинских ускорителей способствовал тому, что их суммарный выпуск составил от 700 до 1000 аппаратов в год.

Роль ускорительной техники постоянно повышается. Такая тенденция наблюдается не только в медицине, но и в других отраслях мирового хозяйства. Сегодня в мире действует около 40 тысяч ускорителей [1, 3]. Из них в фундаментальной науке работает чуть более 3%, в то время как в промышленности и сельском хозяйстве – более 60%, а в медицинских учреждениях – 35%. По некоторым оценкам, к 2020 г. их общее количество может превысить 50 тысяч единиц.

Согласно имеющимся данным [10, 12], в России по состоянию на начало 2014 г. действовало примерно 400 ускорителей электронов и 50 ускорителей протонов. В нашей стране распределение ускорителей по отраслям народного хозяйства значительно отличается от мирового. Так, в науке задействовано около 20% работающих в стране аппаратов, в промышленности – 43%, в медицине – 37%. Основная часть (около 90%) медицинских ускорителей используется для лучевой терапии, остальные – для протонной или ионной лучевой терапии, а также производства

**Таблица 1.** Медицинские ускорители в ведущих странах мира (по данным Международного агентства по атомной энергии, источник [10])

Государство	Население на 1 ускоритель, тыс. жителей	Население страны, млн чел.	Количество ускорителей, шт.
США	79	321,3	4085
Китай	1231	1374,9	1117
Япония	152	126,9	833
Германия	158	81,2	515
Франция	140	64,2	458
Италия	156	60,8	389
Великобритания	207	64,8	313
Бразилия	713	203,3	285
Канада	130	34,7	267
Испания	217	46,4	214
Индия	6144	1284,1	209
Турция	440	78,7	179
Россия	909	140	154
Польша	271	38,5	142
Австралия	180	24,8	138
Нидерланды	134	16,9	126
Южная Корея	421	51,4	122
Всего			9546

радиоизотопов в целях диагностики в центрах позитронно-эмиссионной томографии и для технологий ядерной медицины.

Ускорители в лучевой терапии

Из 14 тысяч медицинских ускорителей, работающих в разных странах мира, более 13 тысяч – это линейные ускорители электронов. Ускорителей тяжелых заряженных частиц (протонов и ионов) в медицине используется около тысячи [1, 3].

Ускорители электронов

Как отмечалось выше, линейные ускорители электронов с 1980-х гг. стали основным инструментом лучевой терапии. В подавляющем числе случаев медицинские ускорители используют для получения тормозных фотонов, которые генерируются

при торможении электронов. Обычно максимальная энергия электронов в ускорителе составляет от 6 до 25 МэВ, а для совпадения границ опухоли с максимальной дозой облучения его проводят с нескольких направлений при меняющейся интенсивности пучка фотонов (метод лучевой терапии с модуляцией интенсивности пучка – англ. intensity-modulated radiation therapy, IMRT).

Основной прогресс в конструкции линейных ускорителей электронов был связан с улучшением элементов и систем, генерирующих излучение, а также совершенствованием способов формирования дозового поля. В результате в современных моделях реализован ряд уникальных технологий, к последним из которых относятся метод IMRT и лучевая терапия с визуальным контролем (англ. image-guided radiation therapy, IGRT).

Пучки электронов применяются в лучевой терапии существенно реже и для облучения опухолей, расположенных вблизи поверхности [13]. Тем не менее появляются предложения по расширению применимости электронного излучения в медицине путем повышения энергии и размещения облучаемой области в сильном магнитном поле [14].

Одним из направлений применения электронных пучков выступает интраоперационная лучевая терапия. Подход предполагает облучение пучками электронов во время операции ложа опухоли с целью уничтожения онкологических клеток, оставшихся в ткани после проведения хирургической операции. Метод был опробован примерно в 200 онкологических центрах мира, однако его перспективы оценивались скептически, так как хирургическая операция и последующее облучение на медицинском линейном ускорителе могли проводиться только в разных помещениях: в операционной и ускорительном зале [13]. Это требовало серьезных усилий, направленных на то, чтобы избежать заражения раны при транспортировке пациента из операционной в ускорительный зал и обратно. В 1990-е гг. эта проблема была решена с появлением компактных комплексов, которые могут располагаться непосредственно в операционной комнате. Первым из них, прошедшим все необходимое лицензирование, стал американский комплекс Mobetron.

Имеется задел в области аппаратов для интраоперационной лучевой терапии и в России. Например, в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова совместно с Техническим университетом Каталонии разработан проект комплекса на базе разрезного микротрона с энергией пучка электронов от 4 до



12 МэВ. Уникальность предлагаемого ускорителя заключается в его габаритах, которые позволяют поместить аппарат в небольшом контейнере с геометрическими размерами $24 \times 13 \times 48 \text{ см}^3$. Вес микротрона не превышает 120 кг, а потребляемая от сети мощность составляет около 1 кВт [15].

Последние 10–15 лет характеризуются активным развитием стереотаксической радиохирургии, заключающейся в однократном подведении к опухоли высокой дозы с целью ее полного разрушения. Главными радиохирургическими аппаратами признаны гамма-нож и кибер-нож. Но при некоторых локализациях опухолей необходимые дозы могут быть подведены к мишени с помощью модифицированных медицинских ускорителей, в которых реализуется принцип «двойной дуги»: ускоритель вращается вокруг изоцентра в вертикальной плоскости, а лечебный стол – в горизонтальной.

Гамма-нож основан на создании дозового поля с помощью большого числа кобальтовых источников, излучение которых направлено в одну точку [16, 17]. «Ускорительной» альтернативой гамма-ножу стала система, получившая название «кибер-нож» [18]. Установка содержит два основных элемента: легкий линейный ускоритель и мобильную контролируруемую компьютером роботизированную руку, имеющую 6 степеней свободы. Ускоритель, управляемый компьютером, может в одном сеансе облучать опухоль и множество метастазов (с 1200 возможных направлений), что невозможно в хирургической операции. Энергия ускорителя электронов, на котором базируется установка, составляет 4 или 6 МэВ. При помощи кибер-ножа возможно проводить неизоцентрическое облучение мишени, а также осуществлять несимметричное и в высокой степени конформное облучение мишени с точностью до 0,5 мм. Кибер-нож позволяет облучать большее количество локализаций в теле человека, чем гамма-нож, и представляет собой одно из наиболее ярких достижений ускорительной техники в медицине [19].

Сегодня в мире функционирует более 300 кибер-ножей [20] и 300 гамма-ножей, причем больше половины установок приходится на США и Японию [21]. В России стереотаксическая радиохирургия также значительно продвинулась вперед: по общему количеству таких установок наша страна за последние 3–4 года переместилась с 30–40-х мест на 10-е.

Разрабатываются установки, позволяющие одновременно совмещать методы лучевой терапии с диагностическими. Например, так называемая томотерапия объединяет в себе возможности компьютерной томографии и радиохирургического

уничтожения онкологических очагов пучками тормозных фотонов из ускорителя электронов [22].

Ускорители протонов и ионов

С конца 1950-х гг. физики совместно с медиками стали проводить исследования по использованию в медицине ускорителей тяжелых заряженных частиц – протонов, ионов и пионов [23]. Основным преимуществом таких установок считается то, что энергия частиц передается веществу в конце пробега, то есть в глубинном распределении дозы возникает так называемый пик Брэгга. При энергии протонов 200–250 МэВ пик в биологических тканях располагается на глубине 10–15 см, что оказывается удобным для проведения лучевой терапии. По сравнению с пучком электронов пучки тяжелых заряженных частиц обладают и многими другими преимуществами, например, малым углом рассеяния.

До начала 1990-х гг. в мире работало 23 центра протонной и ионной терапии, которые располагались в научных институтах и использовали пучки из исследовательских ускорителей [24, 25]. Здесь были получены клинические результаты, подтвердившие перспективность и конкурентную способность этого метода лечения. Первый клинический центр протонной лучевой терапии открылся в университете Лома Линда (США) в 1990 г. В наши дни в 19 странах мира действует более 50 центров протонной лучевой терапии, а еще около 50 центров находятся в стадии проектирования или строительства. Пучки ионов углерода используются в 9 центрах, строится еще 5 таких центров [24].

Из примерно 100 действующих и создаваемых (разрабатываемых) центров протонной и ионной лучевой терапии в нашей стране расположено 6. Протонная лучевая терапия продолжает развиваться в Институте теоретической и экспериментальной физики (Москва), в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) и в Петербургском институте ядерной физики им. Б.П. Константинова (Гатчина). Создаются центры протонной терапии на базе ядерных центров Троицка и Димитровграда, углеродной терапии в Институте физики высоких энергий (Протвино) [25]. Для того чтобы достигнуть уровня ведущих стран мира, нам необходимо построить до 20 клинических центров протонной и ионной лучевой терапии.

Ускорители в ядерной медицине

Ядерная медицина включает в себя радионуклидную диагностику и терапию с использованием

радиоактивных изотопов. Для этих целей применяются естественные и искусственные изотопы, которые получают либо при переработке горных пород, либо на ускорителях или в реакторах.

В мире в ядерной медицине [26, 27] для наработки радионуклидов действует около 1000 ускорителей заряженных частиц (в России – 20), а также около 100 реакторов (в России – 7). Большинство этих ускорителей генерируют пучки протонов с энергией от 7 до 70 МэВ, однако в последнее время развивается ряд методик получения изотопов на ускорителях электронов [28].

Как правило, современные центры позитронно-эмиссионной томографии создаются на основе ускорителей, например, циклотронов. В таких центрах разных стран мира работают около 600 протонных ускорителей [27].

Радионуклидные технологии в медицине

Радионуклиды в лучевой терапии

Открытое в 1896 г. А. Беккерелем явление естественной радиоактивности некоторых веществ быстро нашло медицинское применение. Идея использования радиоизотопов в лечении онкологических заболеваний впервые была высказана еще в 1901 г. французским физиком П. Кюри. В 1910 г. американские ученые Д. Пасто и П. Дегрэ разработали методику лечения, обеспечивавшую доставку необходимой дозы радиоактивного вещества к предстательной железе. Немного позднее Б. Барринджер предложил метод введения радиоактивных микроисточников в опухоль с помощью специальных полых игл [1, 2].

Брахитерапия – вид лучевой терапии, в которой небольшой герметично упакованный источник излучения помещают внутрь зоны, требующей лечения, или рядом с ней. Радиоактивные вещества в этом случае не попадают непосредственно в организм, а облучают окружающие ткани через стенки капсулы. Одним из преимуществ брахитерапии по сравнению с дистанционной терапией признается быстрый спад дозы вследствие геометрического ослабления при удалении от радиоактивного источника. Как следствие, при брахитерапии облучению подвергается меньший объем здоровых тканей, и к опухоли можно подводить более высокие дозы, чем в дистанционной лучевой терапии [29, 30].

За всю историю в брахитерапии задействовано около полутора десятков радионуклидов. Начиная с 1930-х гг. в течение длительного периода широко использовали изотопы ^{226}Ra и ^{222}Rn ,

но по соображениям радиационной безопасности их применение почти прекращено. В настоящее время активно используются шесть радионуклидов: ^{60}Co , ^{137}Cs , ^{192}Ir , ^{125}I , ^{103}Pd , $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, существенно реже – ^{198}Au , ^{106}Ru и ^{252}Cf . С точки зрения клинической практики из всех возможных изотопов наиболее удобными считаются ^{125}I , ^{103}Pd , ^{131}Cs и ^{60}Co [30].

В зависимости от специфики применения источники, содержащие радиоизотоп, изготавливаются, как правило, в форме капсул, которые обычно имеют двойные стенки (существуют, однако, и бескапсульные методики). При этом источники размещаются непосредственно в теле пациента. Их производят в виде игл, трубок, гранул, проволоки или таблеток [30, 31].

С 1950-х гг. радионуклиды стали широко применяться в дистанционной лучевой терапии, составив конкуренцию ускорителям. Установки, использующие радиоактивные изотопы, имели сравнимую с ускорителями интенсивность и энергию фотонов, но меньшие габариты. Первый аппарат для лучевой терапии с источником ^{60}Co (период полураспада – 5 лет) был запущен в 1951 г. в Канаде. Особенно широко этот метод развивался в онкологическом институте Торонто. Кроме того, там же использовали источник ^{137}Cs (период полураспада – 30 лет), были попытки задействовать ^{192}Ir , имеющий период полураспада всего 74,5 дня [30].

В 1951 г. Л. Лексел предложил концепцию стереотаксической хирургии облучения мозга при помощи источников ^{60}Co без вскрытия черепа человека, которую реализовал совместно с радиобиологом Б. Ларссоном в установках, получивших название «гамма-нож» [17]. Первая подобная операция была проведена в Стокгольме в 1968 г. Преимущество метода заключается в том, что множество пучков (в первой установке их было 179) от радиоактивных источников направляется в одну точку, где накапливаемая доза во много раз превышает таковую на поверхности тела человека. Таким образом, доза до 10 Гр подводится непосредственно к опухоли, что приводит к ее гибели, а здоровые ткани получают незначительную дозу облучения. Точность наведения пучков гамма-излучения достигает 0,3 мм. Гамма-нож позволяет лечить сосудистые новообразования, опухоли головного мозга, включая метастазы, без хирургического вмешательства и длительного многодневного облучения [17]. За все время было выпущено около 500 таких установок, а всего в мире сейчас эксплуатируется более 300 аппаратов [21].



Радионуклиды в ядерной медицине

Принципиальной особенностью ядерной медицины является использование радиоактивных материалов в виде радиофармпрепаратов для диагностики и терапии заболеваний. Рождение радионуклидной диагностики связывают с именем Дж. Хэвешши, который в 1911 г. провел эксперименты на мышах по метаболизму с ^{210}Bi . В клинической практике радионуклиды, а именно газ радон, впервые были применены в 1927 г. Г. Блумгартом и С. Вейсом для оценки гемодинамики у больных сердечной недостаточностью. Потенциальные возможности радионуклидной диагностики стали очевидны после открытия искусственной радиоактивности и развития методов наработки радионуклидов на ускорителях и в ядерных реакторах. К настоящему времени в диагностических целях используются около 90 изотопов [1, 31].

К современным средствам радионуклидной диагностики относятся гамма-камеры и однофотонные эмиссионные компьютерные томографы, которые регистрируют испускаемые радиоизотопами фотоны, а также позитронно-эмиссионные томографы.

В позитронно-эмиссионной томографии используются радионуклиды ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O и ^{18}F , распадающиеся с испусканием позитронов. Позитроны проходят в окружающих тканях расстояние, равное 1–3 мм, и в момент останковки аннигилируют с электроном среды. В результате аннигиляции образуются два фотона с энергией 0,511 МэВ, разлетающиеся в противоположных направлениях. Фотоны регистрируются двумя противоположно расположенными сцинтилляционными детекторами, а события, соответствующие одновременному приходу фотонов, родившихся в результате одного акта аннигиляции, отбираются схемой совпадений [31, 32].

Среди изотопов, применявшихся на начальном этапе развития радионуклидной терапии (1940–70-е гг.), наибольшее распространение получили ^{32}P , ^{198}Au , ^{131}I , ^{90}Y . Сегодня перечень нуклидов включает около 40 элементов, из них наиболее популярные – изотопы ^{89}Sr , ^{153}Sm , ^{186}Re , ^{188}Re . Интенсивные поисковые исследования ведутся в отношении радиофармпрепаратов на основе ^{67}Cu , $^{117\text{m}}\text{Sn}$, ^{124}I , ^{149}Tb , ^{166}Ho , ^{177}Lu , ^{211}At , ^{212}Bi , ^{225}Ac (^{213}Bi) и др. [33, 34].

Темпы развития направления по использованию радионуклидов в медицине столь велики, что только в США в 2014 г. доход рынка радиофармпрепаратов составил около 8 млрд долларов. По оценкам экспертов, рост мирового рынка

продукции и услуг ядерной медицины в 2015 г. достигнет 84 млрд долларов США [34].

Высокотехнологичные медицинские аппараты в России

К началу XXI века развитие ускорительных и ядерных технологий привело к широкому внедрению в медицину аппаратов, основанных на их применении. В мире общее количество такой техники оценивается в 110 тысяч единиц. Из них 27 тысяч (24,5%) – это установки, нарабатывающие или использующие радионуклиды, причем их большая часть – 23 тысячи – работает в радионуклидной диагностике [1, 2].

В медицинских учреждениях и центрах России число высокотехнологичных медицинских аппаратов и комплексов насчитывает около 1,5 тысяч единиц, что при сравнении с уровнем обеспечения аналогичной техникой медицинских учреждений стран Европы составляет менее 30% (табл. 2) [1, 35, 36]. В стране работает немногим более 400 установок для дистанционной лучевой терапии: до 150 ускорителей электронов, 3 центра протонной терапии (еще 2 в настоящий момент находятся в процессе строительства), 9 кибер-ножей, около 200 дистанционных аппаратов на ^{60}Co и 5 гамма-ножей. Что касается диагностических установок, в нашей стране есть 240 гамма-камер, 100 компьютерных томографов, около 20 сканеров позитронно-эмиссионной томографии и 450 магнитно-резонансных томографов. При этом необходимо учитывать, что значительная

Таблица 2. Количество аппаратов в лучевой терапии и ядерной медицине в России и мире (оценочно)

Техника, штуки	В мире	В России
Ускорители	14 000	150
Кобальтовые аппараты	1 500	200
Гамма-камеры	17 000	240
Компьютерные томографы	40 000	100
Магнитно-резонансные томографы	30 000	450
Сканеры позитронно-эмиссионной томографии	4 000	20
Гамма-ножи	300	5
Кибер-ножи	300	9
Установки для брахитерапии	2 200	150
Комплексы протонной и ионной терапии	50	3

часть этой аппаратуры выработала свой ресурс и требует замены.

Для того чтобы выйти на средневропейский уровень, Российской Федерации необходимо как минимум 400–450 новых медицинских ускорителей электронов, около 100 циклотронов и центров позитронно-эмиссионной томографии, 1000 компьютерно-томографических сканеров (в том числе сканеров позитронно-эмиссионной/компьютерной томографии – около 100), 300 установок однофотонной эмиссионной компьютерной томографии, 1400 магнитно-резонансных томографов и около 300 установок для брахитерапии.

Однако одними закупками новой техники вопрос развития лучевой терапии и ядерной медицины решить не получится. При наличии сопоставимых технологических ресурсов качество медицинской помощи может существенно различаться. Для обеспечения высокого качества лечебного процесса необходимо готовить кадры, способные успешно работать на новом оборудовании. Сегодня в России работают около 1500 врачей-радиотерапевтов и 300 медицинских физиков, что примерно в 6 раз ниже необходимого уровня. Многие из этих специалистов обучены для работы с устаревшим оборудованием. Новых квалифицированных медицинских физиков и инженеров высшие учебные заведения России выпускают в недостаточном количестве, причем при их подготовке отсутствует тесная взаимосвязь с клиническими центрами. Часто выпускники вузов приступают к клинической работе, не имея должной системной практической подготовки, и из-за низкого уровня оплаты труда физиков и инженеров в системе здравоохранения уходят работать по другим специальностям. В совокупности эти причины приводят к 20–30% рентабельности использования

дорогостоящего оборудования. Именно поэтому помимо закупки оборудования вопрос подготовки кадров, в особенности медицинских физиков, представляется ключевым для развития радиотерапии и ядерной медицины в нашей стране. Для его решения необходимы совместные активные усилия медицинских и образовательных ведомств и учреждений.

Заключение

Многолетний опыт применения ускорителей и радионуклидных технологий показал не только их высокую научную значимость, но и экономическую эффективность в случае прикладного использования во многих отраслях мирового хозяйства, особенно в медицине. Благодаря им возникли и динамично развиваются такие области клинической медицины, как рентгенодиагностика, ядерная медицина, лучевая терапия, различные виды томографии и др.

С уверенностью можно сказать, что ядерно-физические технологии получат дальнейшее качественное и количественное развитие в медицине, при этом в ближайшие годы основными тенденциями [1, 2, 37, 38] должны стать следующие:

- быстрый рост количества линейных ускорителей с энергией до 25 МэВ;
- увеличение числа центров протонной и ионной лучевой терапии;
- развитие стереотаксической хирургии, в том числе за счет совершенствования ускорительной техники (уменьшение размеров и веса ускорителей, увеличение мощности пучка);
- масштабное строительство ускорителей для ядерной медицины;
- начало применения в клинической медицине диагностических методов, основанных на свойствах синхротронного излучения. ☺

Литература

1. Черняев АП, Белоусов АВ, Варзарь СМ, Борщеговская ПЮ, Колыванова МА, Николаева АА. Радионуклидные технологии в медицине. Научное издание. 2015;(7):65–74.
2. Черняев АП, Варзарь СМ, Белоусов АВ, Близинок УА, Осипов АС, Загоруйко МВ. Ускорители в медицине. Медицинская физика. 2014;(1):113–20.
3. Hamm RW. Industrial accelerators. In: Chao A, Chou W, editors. Reviews of accelerator science and technology. Singapore: World Scientific; 2008. Vol. 1. Chap. 8. p. 163–84.
4. Комар ЕФ. Использование ускорителей в медицине и народном хозяйстве. Вестник РАН. 1973;(12):23–8.
5. Amaldi U, Bonomi R, Braccinin S, Crescenti M, Degiovanni A, Garlasche M, Garonna A, Magrin G, Mellace C, Pearce P, Pitta G, Puggioni P, Rosso E, Verdu Andres S, Wegner R, Weiss M, Zennaro R. Accelerators for hadrontherapy: From Lawrence cyclotrons to linacs. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2010;620(1–2):563–77.
6. Maciszewski W, Scharf W. Particle accelerators for radiotherapy. Present status and future. Physica Medica. 2004;4:137–45.
7. Trikalinos TA, Terasawa T, Ip S, Raman G, Lau J. Particle beam radiation therapies for cancer. Technical brief No. 1. (Prepared by Tufts Medical Center Evidence-based Practice Center under Contract No. HNSA-290-07-10055.) Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. Revised November 2009. Доступно на: www.effectivehealthcare.ahrq.gov/reports/final.cfm
8. Beringer J et al. (Particle Data Group). Review of Particle Physics. Phys. Rev. D 86, 010001. Published 20 July 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.86.010001>.



9. Chernyaev AP. Nuclear physics-based technologies in medicine. *Physics of Particles and Nuclei*. 2012;43(2):262–72.
10. <http://www-naweb.iaea.org/nahu/dirac/>
11. http://www-elsa.physik.uni-bonn.de/accelerator_list.html
12. Chernyaev AP, Varzar SM. Particle accelerators in modern world. *Physics of Atomic Nuclei*. 2014;77(10):1203–15. doi: 10.1134/S1063778814100032.
13. Hogstrom KR, Almond PR. Review of electron beam therapy physics. *Phys Med Biol*. 2006;51(13):R455–89. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/51/13/R25>.
14. Belousov AV, Varzar' SM, Chernyaev AP. Simulation of the conditions of photon and electron beam irradiation in magnetic fields for increasing conformity of radiation therapy. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2007;71(6):841–3. doi: 10.3103/S1062873807060172.
15. Alimov AS, Ishkhanov BS, Shvedunov VI. Compact linear electron accelerator for radiation technologies. *Moscow University Physics Bulletin*. 2008;63(4):256–8. doi: 10.3103/S0027134908040073.
16. Leksell L. The stereotaxic method and radiosurgery of the brain. *Acta Chir Scand*. 1951;102(4):316–9.
17. Leksell L. *Stereotaxis and radiosurgery: an operative system*. Springfield: Charles C Thomas; 1971.
18. Adler JR Jr, Chang SD, Murphy MJ, Doty J, Geis P, Hancock SL. The Cyberknife: a frameless robotic system for radiosurgery. *Stereotact Funct Neurosurg*. 1997;69(1–4 Pt 2):124–8.
19. Ho AK, Fu D, Cotrutz C, Hancock SL, Chang SD, Gibbs IC, Maurer CR Jr, Adler JR Jr. A study of the accuracy of cyberknife spinal radiosurgery using skeletal structure tracking. *Neurosurgery*. 2007;60(2 Suppl 1):ONS147–56.
20. <http://www accuray.com/treatment-centers>
21. <https://www.elekta.com>
22. Kapatoes JM, Olivera GH, Ruchala KJ, Smilowitz JB, Reckwerdt PJ, Mackie TR. A feasible method for clinical delivery verification and dose reconstruction in tomotherapy. *Med Phys*. 2001;28(4):528–42.
23. Wilson RR. Radiological use of fast protons. *Radiology*. 1946;47(5):487–91. doi: <http://dx.doi.org/10.1148/47.5.487>.
24. <http://www.ptcog.ch>
25. Кленов ГИ, Козлов ЮФ, Хорошков ВС. Шестнадцать лет протонной лучевой терапии: результаты, проблемы и тенденции. *Медицинская физика*. 2015;(1):86–90.
26. International Atomic Energy Agency. *Directory of cyclotrons used for radionuclide production in member states: 2006 Update*. IAEA-DICRP/2006. Vienna: IAEA; 2006. 532 p.
27. International Atomic Energy Agency. *Cyclotron Produced Radionuclides: Physical Characteristics and Production Methods*. IAEA Technical Report Series No. 468. Vienna: IAEA; 2009. 279 p.
28. Belyshev SS, Ermakov AN, Ishkhanov BS, Khankin VV, Kurilik AS, Kuznetsov AA, Shvedunov VI, Stopani KA. Studying photonuclear reactions using the activation technique. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2014;745(5):133–7. doi: 10.1016/j.nima.2014.01.057.
29. International Atomic Energy Agency. *Implementation of high dose rate brachytherapy in limited resource settings*. IAEA Human Health Series No. 30. Vienna: IAEA; 2015. 97 p.
30. Williamson JF. Brachytherapy technology and physics practice since 1950: a half-century of progress. *Phys Med Biol*. 2006;51(13):R303–25.
31. Christian PE, Bernier DR, Langan JK, editors. *Nuclear Medicine and PET: Technology and Techniques*. 5th ed. St. Louis: Mosby; 2004.
32. Ter-Pogossian MM, Phelps ME, Hoffman EJ, Mullan NA. A positron-emission transaxial tomograph for nuclear imaging (PETT). *Radiology*. 1975;114(1):89–98. doi: <http://dx.doi.org/10.1148/114.1.89>.
33. Zhuikov BL. Production of medical radionuclides in Russia: Status and future – a review. *Journal of Applied Radiation and Isotopes*. 2004;84:48–56. doi: 10.1016/j.apradiso.2013.11.025.
34. International Atomic Energy Agency. *Nuclear Technology Review*. IAEA/NTR/2015. Vienna: IAEA; 2015. Доступно на: https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC59/GC59InfDocuments/English/gc59inf_2_en.pdf
35. Корсунский ВН, Кодина ГЕ, Брускин АБ. *Ядерная медицина. Современное состояние и перспективы развития*. Атомная стратегия. 2007;(5):4–6.
36. Костылев ВА. Предложения о системном развитии атомной медицины и медицинской физики в России. *Медицинская физика*. 2008;3:8–29.
37. U.S. Department of Energy. *Accelerators for America's Future*. Washington: US DOE; 2010. 100 p. Доступно на: <http://science.energy.gov/~media/hep/pdf/accelerator-rd-stewardship/Report.pdf>
38. Barletta W, Chattopadhyay S, Seryi A. Educating and training accelerator scientists and technologists for tomorrow. *Reviews of Accelerator Science and Technology*. 2012;5:313–31. doi: 10.1142/S1793626812300125.

References

1. Chernyaev AP, Belousov AV, Varzar' SM, Borshchegovskaya PYu, Kolyvanova MA, Nikolaeva AA. Radionuklidnye tekhnologii v meditsine [Radionuclide technologies in medicine]. *Naukoemkie tekhnologii [Science Intensive Technologies]*. 2015;(7):65–74 (in Russian).
2. Chernyaev AP, Varzar' SM, Belousov AV, Bliznyuk UA, Osipov AS, Zagoruyko MV. *Uskoriteli v meditsine [Medical accelerators]*. *Meditsinskaya fizika [Medical Physics]*. 2014;(1):113–20 (in Russian).
3. Hamm RW. *Industrial accelerators*. In: Chao A, Chou W, editors. *Reviews of accelerator science and technology*. Singapore: World Scientific; 2008. Vol. 1. Chap. 8. p. 163–84.
4. Komar EG. *Ispol'zovanie uskoriteley v meditsine i narodnom khozyaystve [Application of accelerators in medicine and national economy]*. *Vestnik RAN [Bulletin of RAS]*. 1973;(12):23–8 (in Russian).
5. Amaldi U, Bonomi R, Braccinin S, Crescenti M, Degiovanni A, Garlasche M, Garonna A, Magrin G, Mellace C, Pearce P, Pitta G, Puggioni P, Rosso E, Verdu Andres S, Wegner R, Weiss M, Zennaro R. *Accelerators for hadrontherapy: From Lawrence cyclotrons to linacs*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. 2010;620(1–2):563–77.
6. Maciszewski W, Scharf W. *Particle accelerators for radiotherapy. Present status and future*. *Physica Medica*. 2004;4:137–45.
7. Trikalinos TA, Terasawa T, Ip S, Raman G, Lau J. *Particle beam radiation therapies for cancer*. Technical brief No. 1. (Prepared by Tufts Medical Center Evidence-based Practice Center under Contract No. HHS-290-07-10055.) Rockville, MD: Agency for Healthcare Research and Quality. Revised November 2009. Available from: www.effectivehealthcare.ahrq.gov/reports/final.cfm
8. Beringer J et al. (Particle Data Group). *Review of Particle Physics*. *Phys. Rev. D* 86, 010001. Published 20 July 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.86.010001>.
9. Chernyaev AP. Nuclear physics-based technologies in medicine. *Physics of Particles and Nuclei*. 2012;43(2):262–72.
10. <http://www-naweb.iaea.org/nahu/dirac/>
11. http://www-elsa.physik.uni-bonn.de/accelerator_list.html
12. Chernyaev AP, Varzar SM. Particle accelerators in modern world. *Physics of Atomic Nuclei*. 2014;77(10):1203–15. doi: 10.1134/S1063778814100032.
13. Hogstrom KR, Almond PR. Review of electron beam therapy physics. *Phys Med Biol*. 2006;51(13):R455–89. doi: <http://dx.doi.org/10.1088/0031-9155/51/13/R25>.
14. Belousov AV, Varzar' SM, Chernyaev AP. Simulation of the conditions of photon and elec-



- tron beam irradiation in magnetic fields for increasing conformity of radiation therapy. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2007;71(6):841–3. doi: 10.3103/S1062873807060172.
15. Alimov AS, Ishkhanov BS, Shvedunov VI. Compact linear electron accelerator for radiation technologies. *Moscow University Physics Bulletin*. 2008;63(4):256–8. doi: 10.3103/S0027134908040073.
 16. Leksell L. The stereotaxic method and radiosurgery of the brain. *Acta Chir Scand*. 1951;102(4):316–9.
 17. Leksell L. Stereotaxis and radiosurgery: an operative system. Springfield: Charles C Thomas; 1971.
 18. Adler JR Jr, Chang SD, Murphy MJ, Doty J, Geis P, Hancock SL. The Cyberknife: a frameless robotic system for radiosurgery. *Stereotact Funct Neurosurg*. 1997;69(1–4 Pt 2):124–8.
 19. Ho AK, Fu D, Cotrutz C, Hancock SL, Chang SD, Gibbs IC, Maurer CR Jr, Adler JR Jr. A study of the accuracy of cyberknife spinal radiosurgery using skeletal structure tracking. *Neurosurgery*. 2007;60(2 Suppl 1):ONS147–56.
 20. <http://www accuray.com/treatment-centers>
 21. <https://www.elekta.com>
 22. Kapatoes JM, Olivera GH, Ruchala KJ, Smilowitz JB, Reckwerdt PJ, Mackie TR. A feasible method for clinical delivery verification and dose reconstruction in tomotherapy. *Med Phys*. 2001;28(4):528–42.
 23. Wilson RR. Radiological use of fast protons. *Radiology*. 1946;47(5):487–91. doi: <http://dx.doi.org/10.1148/47.5.487>.
 24. <http://www.ptcog.ch>
 25. Klenov GI, Kozlov YuF, Khoroshkov VS. Shest'desyat let protonnoy luchevooy terapii: rezul'taty, problemy i tendentsii [60 years of the proton therapy: results, problems, tendencies]. *Meditinskaya fizika [Medical Physics]*. 2015;(1):86–90 (in Russian).
 26. International Atomic Energy Agency. Directory of cyclotrons used for radionuclide production in member states: 2006 Update. IAEA-DCRP/2006. Vienna: IAEA; 2006. 532 p.
 27. International Atomic Energy Agency. Cyclotron Produced Radionuclides: Physical Characteristics and Production Methods. IAEA Technical Report Series No. 468. Vienna: IAEA; 2009. 279 p.
 28. Belyshev SS, Ermakov AN, Ishkhanov BS, Khankin VV, Kurilik AS, Kuznetsov AA, Shvedunov VI, Stopani KA. Studying photonuclear reactions using the activation technique. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2014;745(5):133–7. doi: 10.1016/j.nima.2014.01.057.
 29. International Atomic Energy Agency. Implementation of high dose rate brachytherapy in limited resource settings. IAEA Human Health Series No. 30. Vienna: IAEA; 2015. 97 p.
 30. Williamson JF. Brachytherapy technology and physics practice since 1950: a half-century of progress. *Phys Med Biol*. 2006;51(13):R303–25.
 31. Christian PE, Bernier DR, Langan JK, editors. *Nuclear Medicine and PET: Technology and Techniques*. 5th ed. St. Louis: Mosby; 2004.
 32. Ter-Pogossian MM, Phelps ME, Hoffman EJ, Mullani NA. A positron-emission transaxial tomograph for nuclear imaging (PETT). *Radiology*. 1975;114(1):89–98. doi: <http://dx.doi.org/10.1148/114.1.89>.
 33. Zhuikov BL. Production of medical radionuclides in Russia: Status and future – a review. *Journal of Applied Radiation and Isotopes*. 2004;84:48–56. doi: 10.1016/j.apradiso.2013.11.025.
 34. International Atomic Energy Agency. Nuclear Technology Review. IAEA/NTR/2015. Vienna: IAEA; 2015. Available from: https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC59/GC59InfDocuments/English/gc59inf-2_en.pdf
 35. Korsunskiy VN, Kodina GE, Bruskin AB. Yadernaya meditsina. Sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya [Nuclear medicine. The present status and perspectives]. *Atomnaya strategiya [Atomic strategy]*. 2007;(5):4–6 (in Russian).
 36. Kostylev VA. Predlozheniya o sistemnom razvitiy atomnoy meditsiny i meditsinskoy fiziki v Rossii [The proposal for systematic development of atomic medicine and medical physics in Russia]. *Meditinskaya fizika [Medical Physics]*. 2008;3:8–29 (in Russian).
 37. U.S. Department of Energy. Accelerators for America's Future. Washington: US DOE; 2010. 100 p. Available from: <http://science.energy.gov/~media/hep/pdf/accelerator-rd-stewardship/Report.pdf>
 38. Barletta W, Chattopadhyay S, Seryi A. Educating and training accelerator scientists and technologists for tomorrow. *Reviews of Accelerator Science and Technology*. 2012;5:313–31. doi: 10.1142/S1793626812300125.

Accelerative and radionuclide technologies in clinical medicine

Chernyaev A.P.^{1,2} • Varzar¹ S.M.¹

Methods based on accelerative and radionuclide technologies are more and more invading clinical practice of modern medicine. The aim of this review is to demonstrate the role of nuclear physics techniques for treatment and diagnostics of various disorders. We analyzed data published in the last 50 years in research papers, reports and other open sources considering particulars of electron accelerators and heavy charged particles

in radiation and nuclear medicine and presenting the information on prevalence of accelerators and other high-tech medical equipment in Russia and worldwide.

Key words: medical physics, ionizing radiation, medical accelerators, nuclear medicine

doi: 10.18786/2072-0505-2016-44-2-260-268

Chernyaev Aleksandr P. – PhD, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Professor, Head of the Chair of Physics of Accelerators and Radiation Medicine, Faculty of Physics¹; Head of the Laboratory of Beam Technologies and Medical Physics²

Varzar' Sergey M. – PhD, Associate Professor, Chair of Physics of Accelerators and Radiation Medicine, Faculty of Physics¹

✉ Faculty of Physics MSU, 1 Leninskie gory, Moscow, 119991, Russian Federation.

Tel.: +7 (495) 939 49 46.

E-mail: varzar@physics.msu.ru

¹ Lomonosov Moscow State University; 1 Leninskie gory, Moscow, 119991, Russian Federation

² Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University; 1 Leninskie gory, Moscow, 119991, Russian Federation