

ОБЗОР

Развитие медицинской физики в России

А.П. Черняев,^{1,2,*} А.А. Ким,^{1,2} Е.Н. Лыкова,^{1,2} Ф.Р. Студеникин,^{1,2} А.А. Щербаков^{1,2}¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына,
отдел ядерно-физических методов в медицине и промышленности
Россия, 199991, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 2²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
физический факультет, кафедра физики ускорителей и радиационной медицины
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 04.07.2025; после доработки 29.12.2025; подписана в печать 21.01.2026)

Настоящий обзор посвящен истории развития медицинской физики в России и Московском университете. В нем выделены основные исторические вехи ее развития. Особо отмечена историческая роль Московского университета в развитии физических методов и технологий в медицине. Отмечены яркие идеи российских ученых, положенные в основу высокотехнологичных приборов и систем, работающих в медицине, а также яркие моменты истории развития ядерно-физических технологий для этих целей. Описываются этапы создания и совершенствования радиационных высокотехнологичных физических установок, методов и технологий в отечественной медицине. Прослеживаются тенденции развития радиационных технологий в медицине в России и мире, а также потребности российского здравоохранения для его устойчивого развития в нынешних условиях. В обзоре описано состояние кадрового обеспечения этого направления медицины и представлены принципы построения системы подготовки и переподготовки кадров в Московском университете для реализации задачи развития и внедрения в медицинскую практику радиационных технологий. Проводится анализ тенденций применения ядерно-физических методов в российской медицине. Предлагаются эффективные подходы обеспечения технологической независимости экономики нашей страны.

PACS: 29.20.-c, 87.56.-v УДК: 539.1

Ключевые слова: медицинская физика, лучевая терапия, ядерная медицина, ускорители.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.81.2610701](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.81.2610701)

ВВЕДЕНИЕ

Как было в истории развития цивилизации, начиная с древних времен, так и сейчас физические знания, законы, открытия реализуются в первую очередь, наряду с промышленностью и военными целями, в медицине. В настоящее время разработка физических идей (методик, приборов, установок) для медицины ведется в большом количестве промышленных, научных организаций, учебных заведений. Существует множество специализированных научно-производственных предприятий, реализующих эти задачи. В медицине действует очень большое число приборов, устройств и технологий, основанных на физических методах. Они простираются от простых устройств для измерения, например, температуры и давления до сложных радиоволновых, акустических, лазерных, рентгеновских, а также устройств, работающих на основе ядерно-физических принципов. Так, в России использование физических методов на основе постоянного электрического тока началось в клинике Московского университета в конце XVIII века (в XIX веке

Ф. Белявский ввел понятие гальваноионотерапии), а воздействие на организм переменного тока осуществлено в конце XIX века французским биофизиком Ж.А. д'Арсонвалем.

Физические методы в медицине условно делят на неионизирующие и ионизирующие. К неионизирующим методам относятся: электротерапия, акустические, лазерные и магнитно-резонансные. Электротерапия использует для лечения электрическую энергию, то есть постоянные и переменные токи, радиоволны вплоть до СВЧ-частот, формирующие широкий спектр физиотерапевтических процедур [1]. Акустические методы включают в себя УЗИ-приборы и технологии для диагностики внутренних органов и тканей без хирургического вмешательства, методы нелинейной акустики в диагностике и использовании мощных акустических импульсов в медицине для разрушения почечных камней (литотрипсия), звуковой удар и др. [2, 3]. Лазерные технологии успешно применяются не только в диагностике, создании имплантантов, но и в хирургии для рассечения тканей с помощью лазера, коррекции зрения, а также в фотодинамической терапии для уничтожения, например онкологических клеток [4, 5]. Магнитно-резонансные установки и технологии являются одним из самых уникальных до-

* E-mail: a.p.chernyaev@yandex.ru

стижений физиков, химиков и врачей. К ионизирующим методам и технологиям относятся рентгеновские, радиоуклидные, а также использующие пучки частиц. Их мы рассмотрим ниже. Упомянутые выше методы легли в основу создания для медицинских целей большого количества устройств, приборов, крупных диагностических и терапевтических систем. На основе данных о закупках медицинской техники в настоящей работе сделана попытка хотя бы грубо оценить соотношение общего объема медицинской техники на базе методов разных разделов физики, перечисленных выше и представленных на рис. 1.

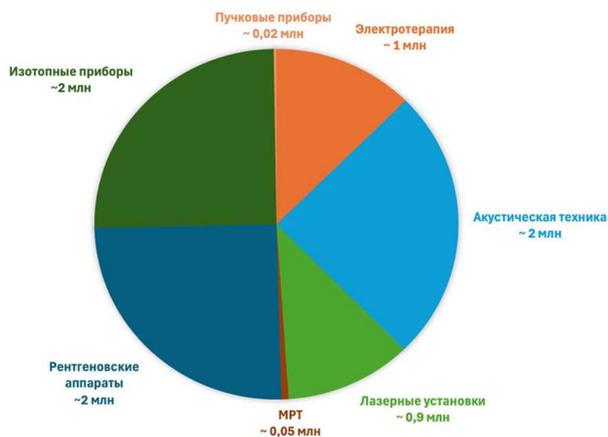


Рис. 1. Медицинская техника в мире

Видно, что общее число такой техники превышает 9 миллионов единиц, причем вполне естественно, что чем она сложнее и дороже, тем меньше ее. Более того, на принципах каждого из крупных разделов физики работает сравнимое по порядку ее количество. Настоящий обзор посвящен истории развития медицинской физики в России и Московском университете. Он является продолжением серии обзоров, подготовленных ранее [6–10].

1. ВОЗНИКНОВЕНИЕ МЕДИЦИНСКОЙ ФИЗИКИ В РОССИИ

Применение физических явлений в медицине уходит корнями в дальние века мировой истории. Для лечения люди использовали, например, свет и тепло, что помогало излечивать ряд болезней. Шаг вперед был сделан в эпоху Возрождения, когда великий ученый-энциклопедист Леонардо да Винчи стал заниматься исследованиями механики движения человеческого тела и стал использовать механические приспособления для вытягивания конечностей после переломов. А в XVIII веке, как отмечалось выше, после открытия в 1791 г. электрического тока великими итальянскими учеными Л. Гальвани и А. Вольта в медицину был внедрен спектр методов с использованием электрического тока. Так в Европе и России появляется новый метод врачевания — электролечение. Спустя лишь два года после

открытия электричества в России появляются первые упоминания о таких методах в медицине, которые относятся к городу Богородицку Тульской губернии, а также к Старо-Екатерининской больнице в Подмоскowie (ныне ГУ МОНКИ им. М.Ф. Владимирского). Уже в 1793 г. один из самых выдающихся современников и фаворит Екатерины II, ученый и управляющий по предписанию императрицы Богородицкой и Бобриковской волостями А.Т. Болотов, изучая физику и медицину, собственноручно пишет и издает «Краткий электрический лечебник» и труд «История моего электризования и врачевания разных болезней оним».

В России в 1808 г. возникает первое медицинско-физическое общество в виде «Высочайше утвержденного при Московском Императорском Университете общества соревнования врачебных и физических наук». Его основным организатором и первым председателем стал заслуженный профессор анатомии и хирургии Франц Францевич Керестури. В том же году вышел в свет и первый отечественный журнал по медицинской физике — «Российский медико-физический журнал», издаваемый секретарем общества, профессором университета Иваном Фёдоровичем Венсовичем. Цель журнала и общества, как было написано в первом выпуске журнала, — «новейшие медико-физические открытия...» и «...помощь врачам в борьбе с заблуждениями и догмами мнимой трансцендентальной медицины». Журнал и общество просуществовали менее четверти века, но они продемонстрировали важность для своего развития тесного взаимодействия между собой физиков и врачей и стали прообразом будущих ассоциаций медицинских физиков в мире.

Эпохальным моментом во взаимодействии физики и медицины стала цепь уникальных фундаментальных научных открытий физиков на рубеже XIX–XX веков: 1895 г. — В. Рентген открывает X-лучи, 1896 г. — А. Беккерель открывает радиоактивность, 1897 г. — Дж. Томсон открывает электрон, 1898 г. — Мария и Пьер Кюри открывают первые радиоактивные химические элементы полоний и радий, 1899 г. — Э. Резерфорд открывает альфа- и бета-лучи, 1900 г. — П.У. Вилард открывает гамма-лучи, возникающие при распаде радия [11–14]. В результате этих открытий была создана рентгеновская трубка, а также прототип радиоизотопного устройства. Практически одновременно с обнаружением новых излучений начиналась апробация их медицинского применения. Рентгеновское излучение уже в январе 1896 г. было применено в США для диагностики переломов костей, а также учеными было замечено повреждающее действие рентгеновского излучения на кожу. В ноябре того же года Леопольд Фройнд провел спланированное облучение волосяного невуса. В 1901 г. П. Кюри впервые высказал идею использования радиоактивности для лечения онкологических заболеваний [15]. В том же году французский ученый А. Данлос использовал радиоизотопы при лечении больного туберкулезом [16], а в 1903 г. А. Белл стал распола-

гать источники радия непосредственно в опухоли или около нее [17].

Российская наука оказалась в гуще этих событий. В первых числах января 1896 г. В. Рентген разослал отписки своей статьи коллегам в несколько стран, в том числе в Московский университет приват-доценту физики П.Н. Лебедеву. В конце месяца П.Н. Лебедев прочитал лекцию «Об открытых Рентгеном X-лучах», сопровождая ее показом рентгенограмм, которые сделал в ходе совместных опытов с Н.В. Доброхотовым и Н.Н. Георгиевским [18, 19]. В феврале 1896 г. в России физики А.С. Попов и С.С. Колотов создали рентгеновскую трубку по собственным чертежам и сделали ряд снимков, в том числе и кисти руки. В ноябре 1897 г. при участии А.С. Попова был открыт первый морской рентгеновский кабинет. В 1902 г. он создал прибор для измерения «напряжения электрического поля атмосферы с помощью ионизационного действия солей радия». В Петербургском университете с 1900 г. стали исследовать свойства радиоактивного излучения, а профессор Московского университета А.П. Соколов исследовал радиоактивность минеральных вод Кавказа. Он же создал первый в стране практикум по радиоактивности [20]. В 1903 г. в Санкт-Петербурге радионуклидные источники были применены для лечения онкологического заболевания — базальноклеточной карциномы [21]. В этом же году Мария и Пьер Кюри посетили онкологический институт (в настоящее время МНИОИ имени П.А. Герцена), открывшийся в Московском университете по инициативе профессора московского университета Л. Левшина на пожертвования промышленников Морозовых. Они подарили институту несколько радиевых игл, которые стали использоваться для лечения онкологических заболеваний. В том же году в институте был открыт первый в России отдел лучевой терапии, а спустя три года его руководитель Дионисий Решетилло выпустил первое в России учебное пособие для врачей и студентов «Лечение лучами Рентгена с изложением рентгенологии и рентгенодиагностики». В 1923 г. онкоцентр использовал при лечении онкологических заболеваний уже два рентгенотерапевтических аппарата. Первой крупной монографией, посвященной радиобиологии и медицинской радиологии, стала книга русского ученого Е.С. Лондона «Радий в биологии и медицине», изданная в 1911 г. В русско-японской войне 1903–1904 гг. на известном крейсере Аврора и госпитальном судне Монголия действовали рентгеновские кабинеты, позволяющие диагностировать у участников сражений переломы и ранения осколками и пулями.

В 1918 г. через несколько месяцев после Октябрьской революции, когда в стране был голод, разруха, практически безвластие и гражданская война, в Петрограде создается Государственный рентгенологический и радиологический институт с физикотехническим отделением, возглавляемый А.Ф. Иоффе (ныне всемирно известный Радиевый институт). В 1921 г. при Академии наук была организована

радиевая лаборатория. В Радиевом институте в 1922 г. В.Г. Хлопиным был впервые получен отечественный препарат радия [22]. В 1928 г. на заводе «Буревестник» был выпущен первый советский медицинский рентгеновский аппарат, что было началом серийного производства рентгеновской техники в стране.

На рубеже тридцатых годов прошлого столетия для экспериментального исследования структуры атомных ядер был создан целый спектр уникальных физических установок-ускорителей: каскадный ускоритель (1929 г.), линейный ускоритель Видероэ (1928 г.) [23], генератор Кокрофта–Уолтона (1924 г.) [24], электростатический ускоритель Ван-де-Граафа (1931 г.) [25], циклотрон (1931 г.) [26]. А в 1937 г. в Лондоне в госпитале Святого Варфоломея (St. Bartholomew's Hospital) был построен ускоритель электронов [27] для лечения онкологических больных. Энергия полученного на нем тормозного γ -излучения не превышала 1 МэВ, а размеры установки достигали 10 м. Использование ускорителей в медицине превратилось со временем в самое крупное на сегодняшний день направление прикладных ядерно-физических технологий — дистанционную лучевую терапию.

Создание циклотрона Э. Лоуренсом и С. Ливингстоном предопределило условия для наработки на нем искусственных радиоизотопов. Этим способом было получено большое количество искусственных радиоактивных изотопов, применяющихся в ядерной медицине и лучевой терапии. Среди них одним из первых — радионуклид ^{60}Co , синтезированный в 1937 г. на циклотроне в Беркли Д. Ливингдом и Г. Сиборгом [28], а также ^{99}Tc , открытый в 1939 г. Г. Сиборгом и Е. Сержем [29]. Эти достижения ядерной физики стали преддверием эры ядерной медицины, играющей существенную роль в развитии радионуклидной диагностики и терапии, в первую очередь для лечения опухолей. Полученные на циклотронах радионуклиды радия ^{226}Ra и цезия ^{137}Cs стали базой для развития еще одного крупного ядерно-физического направления в медицине — контактной лучевой терапии закрытыми радиоактивными источниками (в настоящее время этот метод называют брахитерапией). С этими радиоактивными источниками были разработаны внутривенные и внутритканевые методики для лечения различных новообразований.

Запуск первого ядерного реактора в 1942 г. [30] существенно расширил терапевтическое и диагностическое использование радионуклидов, поскольку стала реальной возможностью интенсивной наработки разнообразных радиоактивных изотопов и их поставка потребителям. Начало таких регулярных поставок радионуклидов в медицину в 1946 г. считается датой зарождения ядерной медицины. Одним из первых примеров осуществления методов ядерной медицины является успешный опыт использования изотопа йода ^{131}I для лечения рака щитовидной железы [31]. Появление радионуклидов послужило базой для развития методов визуализа-

ции органов человека с помощью радиофармпрепаратов (РФП). В 1948 г. была осуществлена поточечная регистрация изображения щитовидной железы, а в 1949 г. Д. Коуплендом и Э. Бенджаменом [32] предложена идея первого диагностического прибора на основе открытых радиоактивных источников — гамма-камеры, представляющей собой двухкоординатный сканер с сцинтилляционными счетчиками. Таким образом, человечество открыло, помимо рентгеновского излучения, второй уникальный способ исследования внутренних органов человека без хирургического вмешательства. Рентгеновское излучение стало основой двух направлений использования в медицине: рентгенодиагностики и рентгенотерапии, а ядерная физика стала базой для возникновения трех больших направлений в медицине: лучевой терапии, лучевой диагностики и ядерной медицины.

Рентгеновское оборудование и технологии в России

Как уже отмечалось выше, развитие рентгеновской техники и технологий в России началось практически одновременно с открытием рентгеновского излучения. Их развитию в стране уделяется пристальное внимание. Рентгеновское оборудование поставляется на внутренний рынок примерно полтора десятками отечественных производителей (~2–4 тыс. единиц в год), имеющих собственные разработки и производственную базу. Потребности медицинских учреждений удовлетворяются по разным видам техники от 24% до 70%. Так, в учреждения здравоохранения поставляется ~70% отечественных флюорографов, ~40% рентгенодиагностических стационарных и передвижных комплексов, ~30% рентгеновских аппаратов с С-дугой, ~24% маммографов. Это примерно 50% единиц всей рентгеновской техники, используемой в медицинских учреждениях страны. Ангиографы и КТ-томографы почти полностью иностранного производства. Поэтому наиболее острая задача — запуск производства собственных КТ, ангиографов, увеличение объемов выпуска маммографов, а также интенсификация разработок других современных собственных высокотехнологичных рентгеновских установок без оглядки на их импорт. В табл. 1 представлено соотношение рентгеновских установок в России и мире. Обеспечение учреждений здравоохранения страны компьютерными томографами, медицинскими рентгеновскими терапевтическими аппаратами, маммографами и другим рентгеновским оборудованием соответствует мировому уровню.

В России в медицине сегодня действует более 78 тысяч рентгеновских установок и приборов, причем с 2007 г. их общее количество выросло примерно на 25%. Основной недостаток в обеспечении рентгеновскими установками учреждений здравоохранения страны — явно недостаточное количество даже импортных КТ последних поколений,

несмотря на соответствие их общего числа (~2222) мировому уровню.

Радионуклиды в отечественной медицине

Во всех разработанных ядерно-физических методах на основе радионуклидов используется не отдельно взятый радионуклид, а медицинский препарат, в который его «вживляют». Это очень непростая радиохимическая и радиобиологическая задача. Необходимо, чтобы клетка или организм в целом не отторгали этот препарат или раствор. Радионуклид должен быть доставлен в соответствующий орган или клетку. Для этого он вводится в состав радиофармпрепарата (РФП). В мире для медицинских целей их создано более 200 наименований. На основе радионуклидов реализуются сотни миллионов терапевтических и диагностических процедур без хирургического вмешательства. Это позволяет проводить 13 млн процедур, 100 млн лабораторных тестов, создавать более 50 тыс. терапевтических доз. В нашей стране нарабатывается значительная доля радионуклидов, используемых в мире [36]. Однако полный цикл производства продукции из радионуклидов не создан. Поэтому большая часть радионуклидов поставляется за рубеж, а к нам возвращается в виде готовой продукции, например радиофармпрепаратов (РФП). В России используется лишь 22 вида РФП, в том числе 6 видов РФП для ПЭТ.

Можно выделить несколько основных направлений использования радионуклидов в медицине. Это диагностическое радионуклидное оборудование: гамма-камеры, ОФЭКТ и ПЭТ. Терапевтическое оборудование для контактной и дистанционной лучевой терапии: кобальтовые установки, гамма-ножи, установки брахитерапии и системы для нейтрон-захватной терапии. Кроме того, изотопы используются, как сказано выше, в терапии, в виде РФП. Также стоит отметить, что РФП, применяемые в диагностике и терапии, используют открытые источники, в отличие от дистанционной и контактной лучевой терапии, где используются закрытые источники. Сравнение числа оборудования на основе радионуклидов представлено в табл. 2. Анализ показывает, что в XX веке лучше всего у нас обстояли дела с применением в лучевой терапии кобальтовых установок, а также с применением в лучевой терапии установок гамма-нож, но они также импортируются из-за рубежа. Число радионуклидных установок — гамма-камер, ОФЭКТ и ПЭТ — у нас порядка 1% от общего их числа в мире (которые к тому же в нашей стране и не производятся). У нас хорошая ситуация лишь с использованием установок для брахитерапии, причем есть и собственные разработки, о которых подробнее расскажем ниже. Разработанный учеными из Новосибирска в институте ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН метод бор-нейтрон-захватной терапии активно внедряется в медицинскую

Таблица 1. Медицинская рентгеновская техника в России и мире [33–35]

Тип аппаратуры	В мире	В России	Доля России, %
Рентгеновские медицинские аппараты	~2000000	60669	~1.5
Компьютерные томографы	93773	2222	2.37
Маммографы	57913	3714	6.4
Установки рентгеновской терапии	732	86	11.7

практику в ФГБУ «НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина». В табл. 2 представлено медицинское оборудование на основе радионуклидов. В нашей стране производится лишь часть его: приборы для брахитерапии, кобальтовые установки и развивается метод бор-нейтрон-захватной терапии.

Кобальтовые установки

Установки для дистанционной лучевой терапии на основе источника ^{60}Co были созданы в начале 1950-х годов. В это время в медицине работали в основном ускорители электронов с невысокими энергиями 1–5 МэВ. Облучение на них проводилось пучками тормозных фотонов. Их средняя энергия составляла примерно половину этой энергии (1–2 МэВ). При распаде ядра ^{60}Co возникают квазимонохроматические фотоны со средней энергией 1.25 МэВ (точнее двух близких энергий фотонов 1.18 и 1.33 МэВ), то есть почти такой же, как на ускорителях 50-х годов выпуска. Этот факт также делает кобальтовые установки вполне конкурентоспособными действующим ускорителям. К тому же они просты в управлении. Были опробованы и другие изотопы ^{226}Ra , ^{137}Cs , в которых возникают фотоны с энергией 0.19 и 0.66 МэВ соответственно, но они уступают кобальту в энергии источника. Поэтому кобальтовые установки остались единственными в медицинском использовании. В 1960-х годах в НПО «Агат» под руководством инженера-конструктора А.Э. Атовмьяна был создан комплекс лучевой терапии на основе изотопов ^{60}Co «РОКУС». В 1967 г. началось его серийное производство на Ленинградском электромеханическом заводе «Равенство». Аппарат был усовершенствован и продолжил его выпуск под названием «Рокус-Р». Для различных методов облучения глубоко расположенных опухолей в 1968 г. в НИИТФА был разработан и запущен в производство гамма-терапевтический аппарат АГАТ-Р с высокой активностью источника. В медицинской практике и в настоящее время осталась ниша для использования кобальтовых гамма-аппаратов.

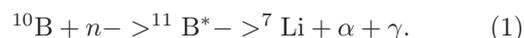
Приборы брахитерапии

Как отмечалось выше, история развития брахитерапии в нашей стране начиналась с 1903 г. У нас

накоплен многолетний опыт собственных разработок таких аппаратов. В 1970 г. был разработан комплекс внутрисполостных шланговых аппаратов серии АГАТ-В, предназначенных для лечения конкретных локализаций опухолей путем введения источника излучения в патологический очаг. В течение десятилетия такими аппаратами были оборудованы более 100 клиник страны. Они неоднократно модифицировались, и сейчас успешно работают в онкологических учреждениях РФ аппараты АГАТ-ВТ. В 2013 г. ОАО МСМ разработан гамма-терапевтический комплекс для брахитерапии «НУКЛЕТРИМ», соответствующий лучшим зарубежным аналогам. В российских онкологических центрах в 2013–2014 гг. были установлены и действуют 5 таких комплексов. В 2021 г. подразделением ГК Росатом НИИТФА разработан другой уже полностью российский гамма-терапевтический аппарат для брахитерапии «БРАХИУМ» с значительной частью отечественных комплектующих. В медицинских учреждениях сейчас работает уже 10 таких комплексов. Их особенность — использование первой российской системы планирования, обеспечивающей возможность решения широкого спектра задач планирования процедур облучения. В обоих проектах основные разработчики — выпускники МГУ.

Физика нейтрон-захватной терапии

Нейтрон-захватная терапия — современный метод радиотерапии с использованием ядерных реакций под действием нейтронов с радиофармпрепаратами, поглощенными онкологическими клетками. Он успешно развивается в нашей стране. Суть метода заключается в том, что перед облучением для повышения чувствительности опухоли к потоку нейтронов в нее вводят препараты, содержащие бор, а затем воздействуют потоком тепловых нейтронов. Сечение поглощения тепловых нейтронов изотопом ^{10}B составляет 3837 барн, в то время как сечение поглощения нейтронов большинством элементов — порядка единиц барн. В результате поглощения нейтрона ядром ^{10}B бора происходит ядерная реакция с большим выделением энергии в клетке:



Образуется возбужденное ядро ^{11}B , которое распадается за 10^{-12} с на ядро ^7Li , α -частицу и γ -квант

Таблица 2. Количество медицинских установок с использованием радионуклидов

Тип установки	В мире	В России	Доля России, %
Кобальтовые установки	~1500	~150	10
Гамма-камеры и ОФЭКТ [37, 38]	27180	220	0.81
ПЭТ-сканеры [37, 39]	5671	60	1.06
Бор-нейтрон-захватная терапия [40]	33	2	6.06
Гамма-нож [41]	396	7	1.8
Брахитерапия [35]	3470	153	4.41

(рис. 2). В 6% случаев их суммарная энергия составляет 2.8 МэВ, а в 94% — 2.3 МэВ, причем 0.48 МэВ уносится фотоном. Эти заряженные частицы быстро теряют энергию. Соответственно ядро лития тормозится на пути 5 мкм, α -частица — на 8 мкм. Поскольку размер клетки порядка 10 мкм, если внутри нее находится ядро бора, поглотившего нейтрон, то 80% энергии ядерной реакции выделяется именно в ней и она погибает.

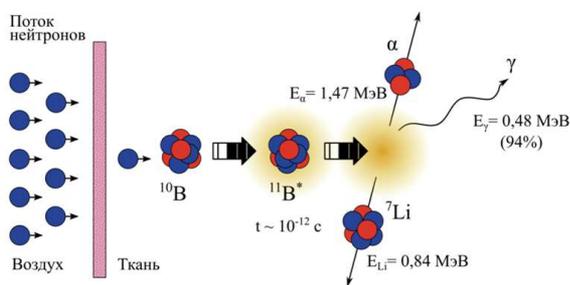


Рис. 2. Схема взаимодействия нейтронов с изотопом бора в тканях пациента

Этот оригинальный метод не получил пока широкого распространения в мире. В основном он носит характер исследовательского проекта. При совершенствовании радиофармпрепаратов, доставляющих нуклиды в опухолевые клетки, их использование в ядерной медицине весьма перспективно. В нашей стране такой проект реализован в Новосибирском ИЯФ. В настоящее время новосибирские физики этот метод внедряют в практическое применение в РОНЦ им. Н.Н. Блохина.

Высокотехнологичные установки на базе ускорителей в медицине

В медицине используется для лечения онкологических заболеваний и диагностики [35, 40, 42–44] больше трети (~17006 ускорителей электронов и 123 — протонов и ионов) всех действующих в мире ускорителей, причем они работают в 156 странах. У нас в стране медицинских ускорителей электронов 555, протонов — 5. В табл. 3 представлены ускорительные комплексы для разных целей медицинского применения: дистанционной лучевой тера-

пии, кибер-ножи, установки томотерапии, ускорители протонов и ионов для лучевой терапии и наработки радионуклидов. Мы сравнимы с наиболее обеспеченными в этом отношении ведущими странами мира. НИИЭФА в конце 1960-х годов прошлого века поставил первый российский медицинский ускоритель с энергией 6 МэВ, установленный в Онкоцентре им. П.А. Герцена. Всего в НИИЭФА было выпущено около 100 ускорителей для медицинских целей. В НИИЯФ МГУ для лучевой терапии создан компактный ускоритель электронов с энергией, непрерывно меняющейся в интервале 2.5–6 МэВ. На его основе Росатомом, лабораторией электронных ускорителей МГУ и НПО «Торий» создан опытный образец комплекса лучевой терапии «ОНИКС». Он позволяет с использованием пучка тормозного излучения осуществлять стереотаксическую и дистанционную лучевую терапию злокачественных и доброкачественных новообразований. В нем предусмотрено получение диагностических проекционных изображений с целью точного позиционирования облучаемого объема на пучке тормозного излучения с энергией 2,5 МэВ. В 2022 г. осуществлена его регистрация.

В табл. 4 представлены все наиболее распространенные типы установок на основе источников ионизирующих излучений. Всего в мире в лучевой терапии работает почти 23 тысячи единиц такого оборудования. Из них почти 18400 единиц — медицинские ускорители (табл. 4), включая и 1268 циклотронов, нарабатывающих радионуклиды. Отметим, что Россия в этом списке седьмая из 14 ведущих стран (в 2018 г. наша страна была 13-я).

2. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ МЕДИЦИНЫ

Новые физические идеи и технологии развиваются в нашей стране для их возможного использования в медицине. Отметим некоторые наиболее яркие разработки ведущих российских научных центров.

Таблица 3. Установки с медицинскими ускорителями в России и мире

Тип установки	В мире	В РФ	Доля РФ, %
Медицинские ускорители электронов [35]*	17006*	555*	3.6
Установки кибер-нож [43]	413	10	2.4
Установки томотерапии [42]	639	3	0.5
Ускорители для интраоперационной лучевой терапии [44]	260	12	4.6
Ускорители протонной и ионной терапии [35]	123	5	4.1
Медицинские протонные циклотроны для наработки изотопов [40]	1268	60	4.7

* — это значение по данным МАГАТЭ включает и кобальтовые установки, которые не выделяются из этого числа, их около в мире примерно 1200, а у нас — ~100.

Таблица 4. Высокотехнологичные установки в медицине

Страна	Мед. ускорители электронов*	Установки кибер-нож	Установки гамма-нож	Ускорители интраоперац. лучевой терапии	Томо-терапия	Мед. протонные циклотроны для наработки изотопов	Ускорители протонной терапии	Брахи-терапия	Рентгено-терапия
США	3879	120	115	72	162	249	42	772	6
Китай	1604	39	48	13	84	175	7	12	122
Япония	1067	47	53	?	98	218	24	239	0
Индия	790	12	6	2	29	25	1	413	5
Франция	570	40	7	12	28	31	4	100	2
Германия	563	12	10	63	12	43	7	229	114
Россия	555	10	7	12	3	60	5	153	86
Италия	436	9	11	5	26	46	3	61	14
Бразилия	374	1	4	4	1	14	0	133	39
Великобритания	357	6	10	11	10	27	7	58	49
Канада	288	4	8	2	6	28	0	52	14
Турция	287	11	18	4	34	20	0	31	0
Испания	283	3	7	3	10	21	3	147	13
Австралия	224	2	8	3	4	19	0	11	6
...
Всего	17006	413	396	260	639	1268	123	3469	720

* — это значение, по данным МАГАТЭ, включает и кобальтовые установки, которые не выделяются из этого числа, их в мире примерно 1500, а у нас — ~150.

Терапия на пучках протонов и ионов

В России исторически было создано три центра протонной лучевой терапии: ОИЯИ (Дубна) — 1967 г., ИТЭФ — 1969 г., ЛИЯФ (Гатчина) — 1975 г., которые внесли примерно 40% мирового опыта протонной лучевой терапии. В филиале ФИАН в Протвино создан российский медицинский ускоритель протонов на базе синхротрона (комплекс «Прометеус»). Он установлен в филиале ФГБУ НМИРЦ Минздрава России в Обнинске, в Протвинской городской больнице, а также в США и Словакии, планируется установка его в Израиле. В институте физики высоких энергий (ИФВЭ) в г. Протвино более 20 лет ведутся исследовательские работы по созданию пучка углерода с энергией 450 МэВ/нуклон для ионной лучевой терапии. И к настоящему времени физики максимально приблизились к своей цели. В 2025 г. на базе ИФВЭ

планируется запустить первый в России центр ионной лучевой терапии на пучке углерода.

Достижения ядерной физики для медицины в ОИЯИ (г. Дубна)

Как отмечалось выше, в 1967 г. в ОИЯИ был запущен первый в СССР и один из первых в мире центров протонной лучевой терапии. Эти передовые традиции дубненских ученых продолжают и сейчас. В конце этого года будет запущен ускоритель на встречных пучках тяжелых ионов NICA. На нем планируется целый блок медико-биологических исследований. В рамках проекта создан новый тип магнитов на высокотемпературном сверхпроводящем (ВТСП) материале ReBCO и иттриевой керамики YBa₂Cu₃O–7. Такие ВТСП-магниты могут стать основой МРТ-сканеров будущего, которые позволяют получить более детальные, по сравнению с современным МРТ, изображения, помогая

врачам ставить более точные диагнозы. Следом за ним на заключительную проектную стадию выходит и создание компактного сверхпроводящего циклотрона на энергию 230 МэВ. Создание и совершенствование компактных сверхпроводящих ускорителей — это важное направление современной мировой прикладной науки. Важно, что данный проект полностью российский и реализуется ОИЯИ совместно с НИИЭФА.

Радионуклиды для ядерной медицины

Значительная часть радионуклидов, используемых в ядерной медицине, производится в России. Однако у нас остается одна многолетняя проблема — не налажен замкнутый производственный цикл. Радионуклиды поставляются за рубеж, а оттуда возвращаются в виде необходимых для медицины препаратов. Поэтому исключительно важной задачей остается создание полного цикла работ по производству радиоизотопов медицинского назначения и радиофармпрепаратов в России без участия зарубежных фирм на конечном этапе создания продукта. Только в этом случае мы займем передовые позиции в создании нового поколения РФП (био РФП) для терапии и диагностики. Но последние годы в рамках пробных проектов радионуклиды нарабатывают на ускорителях электронов. Для целого ряда изотопов цена такой наработки оказывается сравнимой с наработкой на ускорителях протонов. Но возможность использования для этих целей медицинских ускорителей электронов, расположенных в отделениях радиотерапии онкологических учреждений, делает такой подход весьма привлекательным. Он расширяет возможности применения в диагностике и терапии короткоживущих изотопов. Например, в последние годы активно ведутся работы по наработке фотоядерным методом $^{131}\text{Cs}(\gamma, 2n)$, ^{89}Zr , $^{177}\text{Lu}(\gamma, p)$ и $^{179m2}\text{Hf}$, $^{180m}\text{Hf}(\gamma, \gamma')$ [45–47].

Источник монохроматического рентгеновского излучения

НИИЯФ МГУ, лаборатория электронных ускорителей МГУ, НПО «Торий» совместно спроектировали и планируют строительство российского источника монохроматического рентгеновского излучения с варьируемой энергией до 200 кэВ. Его использование в медицинских целях может создать новый виток развития компьютерной томографии, лучевой терапии, ангиографии и др. Лучевая терапия с использованием монохроматического рентгеновского излучения может осуществляться путем накопления в патологическом очаге (опухоли) поглощающего вещества, например йода, и облучение его этим монохроматическим излучением, томография — с изменением энергии рентгеновского излучения. В нашей стране приступили к созданию пер-

вой масштабной научной установки Национального центра физики и математики (НЦФМ, Саров) — источника (квази)монохроматических γ -квантов, основанного на эффекте обратного комптоновского рассеяния фотонов на релятивистских электронах. Помимо большого спектра фундаментальных задач физики ядра и частиц, установка позволяет исследовать большой спектр прикладных задач в области медицины, в том числе и упомянутых выше. На первой стадии проекта на линейном ускорителе и накопительном кольце с $E_e \sim 70 - 120$ МэВ будет генерироваться монохроматическое рентгеновское излучение с $E_\gamma \sim 10 - 500$ кэВ [48].

Флэш-терапия

Последние десятилетия одним из оригинальных направлений исследований ядерной физики в лучевой терапии является изучение влияния характеристик пучка на величину терапевтического интервала. Оказывается, этот интервал зависит от типа частиц, их энергии и интенсивности. Физики и радиобиологи изучают способы увеличения этого интервала для более надежного сохранения здоровых тканей. В пределах терапевтического интервала передача дозы патологическому очагу может осуществляться несколькими способами. В первом классическом случае лучевой терапии на пучках тормозных фотонов доза делится на фракции, а общая доза за весь курс лечения составляет 60–80 Гр (2 Гр в одной фракции). При этом мощность дозы тормозного излучения не превышает 10 Гр/мин (~ 0.2 Гр/с). При такой дозе происходит эффективное восстановление здоровых тканей, а раковые клетки погибают. Во втором случае — в стереотаксической хирургии уменьшают облучаемый объем тканей и повышают точность попадания в него пучка частиц. При этом в одной фракции повышают передаваемую дозу до ~ 80 –120 Гр. Рост величины передаваемой дозы в одном сеансе происходит в результате облучения мишени с большого числа направлений. Общая доза в одном сеансе остается примерно такой же, как и в классическом случае, но уменьшается число сеансов.

Физиками был предложен в 2014 г. новый метод радиотерапии, получивший название флэш-терапия [49]. В нем происходит очень быстрая доставка дозы, которая превышает мощность дозы при классической лучевой терапии в 200–500 раз. На порядки величины сокращается время облучения до 10^{-6} – 10^{-2} с, а средняя мощность дозы превышает 40–80 Гр/с. Это достигается за счет изменения частоты и длительности импульсов. Результаты многих экспериментальных исследований показывают, что использование очень коротких импульсов (1–10 нс) высокой интенсивности позволяет увеличить терапевтический интервал. Эти исследования приводят к заключению, что полноценное восстановление нормальных тканей после вредного воздействия ионизирующего излучения происходит

эффективнее, чем в классической лучевой терапии. При этом онкологические клетки патологического очага подавляются лучше.

Физический смысл флэш-терапии заключается в следующем. Доза биологическому объекту (например, белковой молекуле) передается за разное время в зависимости от тока заряженных частиц в ускорителе. Ток может быть импульсным или непрерывным. В современных линейных ускорителях электронов с ярким пучком он может достигать 400 мА в импульсе, на ускорителях протонов — 600 нА. Мощность или градиент дозы тем выше, чем короче импульс. Например, при длине импульса 10 нс и энергии 10 МэВ можно достичь градиента дозы в интервале 10^2 до 10^7 Гр/с и выше. Флэш-терапия может осуществить сеанс облучения за секунды. Это особенно важно для постоянно движущихся органов, как, например, легких. При этом уменьшается как длительность одного сеанса, так и общее их число, а весь организм находится в условиях радиационного фона существенно меньшее время. Поэтому развитие флэш-терапии может стать новой ветвью радиационной онкологии, применяющей эти технологии для лечения человека. Несмотря на то, что в настоящее время мало ускорителей, способных получить мощность дозы 50 Гр/с, современные технические возможности модернизации ускорителей электронов и протонов позволяют достигнуть мощности дозы вплоть до 200 Гр/с.

В нашей стране экспериментальные исследования на флэш-пучках протонов проводят в ИЯИ РАН. Учеными предложен новый режим облучения: ультра-флэш-режим (single flash therapy [50]), который позволяет подвести дозу 40–50 Гр за 100 нс, то есть в 5 тысяч раз быстрее, чем в обычном флэш-режиме. (За это время можно облучить опухоль массой до 1 кг.) Оказалось, что при таком ультракоротком облучении нормальные клетки повреждались в 5–6 раз меньше, чем при обычной лучевой терапии. Лучевое повреждение радиорезистентных опухолевых клеток оказалось в 1.5–2 раза сильнее, чем нормальных [50] (эксперимент прошел в декабре 2019 г.). В НИИЯФ МГУ для ОИВТ РАН для проведения экспериментов по флэш-терапии на тормозном излучении создается ускоритель с энергией 6 МэВ и импульсным током ускоренного пучка 700 мА при этой энергии.

Мы отметили в настоящей работе лишь наиболее яркие современные проекты, реализующие ядерно-физические технологии в медицине. По описанным уникальным отечественным проектам мирового уровня видно, что они у нас есть. Их реализация требует существенного ускорения в реализации собственных возможностей и создание условий не только технологической независимости нашего государства, но развития опережающих методов и технологий.

3. ПОДГОТОВКА КАДРОВ ДЛЯ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В МЕДИЦИНЕ

Вряд ли стоит обсуждать развитие ядерной физики для медицины, если не готовить кадры. Необходимость в этом возникла еще в тридцатые годы, когда в заметном числе случаев были отмечены отрицательные результаты лучевого лечения. Врачи обратились к инженерам-физикам, обслуживающим рентгеновские установки, помочь точнее оценить дозы, получаемые пациентами. Хотя дозы фактически оценивались физиками «на пальцах», результаты лечения заметно улучшились. Появилась необходимость в специалистах, рассчитывающих дозы для рентгенотерапии. Их позднее назвали медицинскими физиками. Первые дипломированные медицинские физики были выпущены в 1955 г. в университете Упсала (Швеция). С годами их число стремительно увеличивалось. В 1963 г. в Чикаго (США) была образована ассоциация медицинских физиков. В настоящее время действует международная ассоциация медицинских физиков ИОМР (International Organization for Medical Physics), которая объединяет национальные ассоциации 86 стран мира. Общее число медицинских физиков в мире составляет около 25 тысяч. Больше всего их в США — около 10 тыс. Ассоциация медицинских физиков России (АМФР) образовалась в 1993 г. Она насчитывает примерно 700 медицинских физиков и 250 инженеров, а потребность в России составляет около 2500 специалистов.

Подготовку медицинских физиков страны ведут МГУ, МИФИ, Томский политехнический университет, Воронежский ГУ, СпбГУ, Санкт-Петербургский политехнический университет, Новосибирский ГУ, Казанский ФУ, Уральский ГУ, СВФУ и ряд других университетов. Первые учебные программы подготовки студентов для работы медицинскими физиками начали действовать в МИФИ. Вузская специальность «Медицинская физика» была открыта в России в 2000 г. благодаря руководителю УМО физического факультета МГУ Б.С. Ишханову. По ней стали выпускать физиков из МГУ, МИФИ, Казанского, Уральского и других университетов. Она действовала до 2013 г., когда Госдумой были приняты изменения в закон «О высшем образовании РФ». В Министерстве здравоохранения РФ для работы физиков в медицинских учреждениях специальным постановлением был определен круг физических специальностей, которые имеют право работать медицинскими физиками. Поэтому возникла настоятельная необходимость в создании специальных программ послевузовского дополнительного образования.

На базе Московского университета создана уникальная школа подготовки кадров — система программ вузовской подготовки, а также послевузовского дополнительного образования: разных форм повышения квалификации и переподготовки физиков для последующей работы в должности «меди-

цинский физик». Слушатели данных учебных программ имеют возможность не только получать фундаментальные знания и практические навыки для работы в отделениях лучевой терапии, но и возможность совместного проведения передовых научных исследований в области радиационной медицины со многими ведущими ядерно-физическими и онкологическими центрами России.

Программы высшего образования в МГУ имени М.В. Ломоносова

На физическом факультете МГУ реализуются три образовательные программы высшего образования: две из них — магистратура и специалитет «Физика ускорителей и радиационной медицины»; третья — «Радиационная медицинская физика» для магистратуры. Они позволяют готовить специалистов в области радиационной медицинской физики для отделений лучевой терапии. В них выделяются три составляющие: фундаментальные знания в области физики, медико-биологических основы лучевой терапии, которые укрепляются научно-исследовательской работой, и практические занятия в научных лабораториях или лечебных учреждениях. Как правило, такие научные исследования проводятся в онкологических центрах г. Москвы. Среди них МНИОИ имени П.А. Герцена, НМИЦ онкологии имени Н.Н. Блохина, НМИЦ нейрохирургии имени академика Н.Н. Бурденко, Московский областной онкологический диспансер, НМИЦ ДГОИ имени Дмитрия Рогачева, ФМБЦ имени А.И. Бурназяна, Европейский медицинский центр (ЕМЦ), Городская клиническая больница имени Д.Д. Плетнева (№ 57), МКНЦ имени А.С. Логинова и др. Обучение по данным программам позволяет выпускникам работать на высокотехнологичном оборудовании: медицинских ускорителях и других источниках ионизирующего излучения; решать задачи, связанные с лечением больных, проведением радиобиологических экспериментов и инновационных исследований в области радиационной медицинской физики и совершенствования имеющихся технологий. К 2025 г. кафедрой физики ускорителей и радиационной медицины физического факультета МГУ подготовлено 220 студентов, из которых более 110 работают в радиологических отделениях.

Программы дополнительного образования

В МГУ разработана система программ профессиональной переподготовки и повышения квалификации для лучевой терапии. Они включают в себя модули теоретических знаний, знакомство с современными достижениями ядерных технологий для медицины в стране и мире. Это важно для решения актуальной проблемы — нехватки квалифицированных медицинских физиков в России. Программы основаны на модульном принципе построения образова-

тельного процесса, ориентированном на практику, и опираются на потребности отделений лучевой терапии. Важную роль играет программа профессиональной переподготовки специалистов для отделений лучевой терапии, созданная в Московском университете в 2017 г. Она направлена прежде всего на восполнение острого дефицита квалифицированного персонала в регионах. Ее длительность составляет 530 ч, в т.ч. 180 ч аудиторной (очной и дистанционной) и 180 ч самостоятельной работы, а также в течение месяца 100 ч очной практики в ведущих онкологических лечебных учреждениях г. Москвы. По этой программе прошли подготовку 56 слушателей из регионов России (Новосибирска, Донецка, Орска, Рязани, Калуги, Архангельска, Чебоксар, Хабаровска и др.), а также из Узбекистана. Выпускники этой программы получают право пройти первичную специализированную аккредитацию. Для периодической аккредитации создан ряд коротких программ повышения квалификации 18 ч, 72 ч и 144 ч, которые реализуются в дистанционном режиме.

Аккредитация специалистов в области медицинской физики

Физики, работающие в медицинских учреждениях в должности «медицинский физик», по закону обязаны проходить первичную специализированную и периодическую аккредитацию. Однако до настоящего времени такая аккредитация в России не проводилась. В МГУ создан первый в стране центр первичной специализированной аккредитации. Для проверки теоретических знаний создан комплекс оценочных средств, включающий разработанный банк из 2000 вопросов. Для проверки практических навыков медицинских физиков отечественные разработчики из компаний ООО «РТ 7» и ООО «Градиация» предоставили специально разработанные учебные модули на основе разработанного ими программного обеспечения, которое используется в настоящее время в отделениях лучевой терапии. В июле 2024 г. первая такая аккредитация в России состоялась в Московском университете. К марту 2025 г. на базе Аккредитационного центра МГУ оценку профессиональных знаний и навыков получили специалисты из 9 регионов России (Москвы, Томска, Воронежа, Тюмени, Новосибирска, Краснодара, Кемерово, Санкт-Петербурга и Архангельска).

Подготовка кадров высшей квалификации

Важное достижение Московского университета — создание условий для продолжения профессионального роста медицинских физиков. Совместно с радиохимиками и радиобиологами в МГУ создан специализированный докторский Совет. К тому же медицинские физики получили возможность

поступить в аспирантуру МГУ, продолжая работать в онкологическом учреждении. Экспериментальная часть диссертационной работы выполняется непосредственно на медицинских ускорителях, а теоретическая и вычислительная — в МГУ. Таким образом защищено около 30 кандидатских и одна докторская диссертация. Московский университет последние годы превращается в общероссийский центр научных исследований по радиационной

медицинской физике. Здесь ставятся задачи и темы диссертаций аспирантам и соискателям. Многие научные идеи физиков, работающих в онкологических учреждениях, проходят научную огранку и реализуются в них на практике. Главное, что большая часть защищенных специалистов продолжает работать в онкологических учреждениях на ускорителях и томографах, причем по всей России. Это повышает качество медицинского обслуживания пациентов, внедряя в практику научные достижения.

- [1] *Finsen N.R.* Ueber die Bedeutung der chemischen Strahlen des Lichtes für Medicin und Biologie. Drei Abhandlungen. Leipzig: F.C.W. Vogel (1899).
- [2] *Руденко О.В.* // УФН **176**, 77 (2006). (*Rudenko O.V.* // *Phys. Usp.* **49**, No 1. 69 (2006)).
- [3] *Руденко О.В.* // УФН **177**, 374 (2007). (*Rudenko O.V.* // *Phys. Usp.* **50**, No 4. 354 (2007)).
- [4] *Щербakov И.А.* // УФН **180**, 661 (2010). (*Shcherbakov I.A.* // *Phys. Usp.* **53**, No 6. 629 (2010)).
- [5] *Панченко В.Я., Лебедев Ф.В.* Современные лазерно-информационные технологии. М.: Интерконтакт Наука (2015).
- [6] *Черняев А.П.* // Физика элементарных частиц и атомного ядра **43**, 500 (2012). (*Chernyaev A.P.* // *Phys. Part. Nucl.* **43**, No 2. 217 (2012)).
- [7] *Черняев А.П., Лыкова Е.Н.* // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. № 1, 1 (2023). (*Chernyaev A.P., Lykova E.N.* // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **78**, No 1. 1 (2023)).
- [8] *Черняев А.П., Варзарь С.М.* // Ядерная физика **77**, 1 (2014). (*Chernyaev A.P., Varzar S.M.* // *Phys. At. Nucl.* **77**, No 1. 1 (2014)).
- [9] *Черняев А.П., Лыкова Е.Н., Борцеговская П.Ю.* Радиационная медицинская физика. М.: Издательство Московского университета (2023).
- [10] *Черняев А.П., Варзарь С.М., Белоусов А.В.* и др. // Ядерная физика **82**, 425 (2019). (*Chernyaev A.P., Varzar S.M., Belousov A.V.* et al. // *Phys. At. Nucl.* **82**, No 4. 399 (2019)).
- [11] *Rontgen W.C.* // *Science* **3**, No 59. 227 (1896).
- [12] *Becquerel H.* // *Compte Rendus Hebdomadaires des Seances de l'Academie des Sciences* **122**, 420 (1896).
- [13] *Curie P., Sklodowska-Curie M.* // *CR Acad. Sci. Paris* **127**, 175 (1898).
- [14] *Rutherford E.* // *Science* **50**, No 1300. 467 (1919).
- [15] *Becquerel H., Curie P.* // *Compt. Rend. Acad. Sci. Paris* **132**, 1289 (1901).
- [16] *Zimmermann R.* Nuclear Medicine: Radioactivity for Diagnosis and Therapy. Les Ulis: EDP Sciences (2007).
- [17] *Bell A.G., Sowers Z.T.* // *Nature* **68**, 320 (1903).
- [18] *Рейнберг С.А.* Очерки развития медицинской рентгенологии. 50-летие развития медицинской рентгенологии. М.: Медгиз (1948).
- [19] *Tomas V.K.* // *Soviet Physics Uspekhi* **9**, No 6. 913 (1967).
- [20] *Яковлев К.П.* К истории первых работ по радиоактивности в Физическом ин-те МГУ (1900–1930). Т. 2. М., (1963).
- [21] *Baltas D., Sakelliou L., Zamboglou N.* The physics of modern brachytherapy for oncology. Boca Raton: CRC Press (2007).
- [22] *Хлопин В.Г.* // УФН **3**, 99 (1922).
- [23] *Wideroe R.* // *Archiv für Elektrotechnik* **21**, No 4. 387 (1928).
- [24] *Cockcroft J.D., Walton E.T.S.* // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A* **136**, No 829. 619 (1932).
- [25] *Van de Graaff R.J.* // *Phys. Rev.* **38**, 1919 (1931).
- [26] *Laurence E.O., Livingston M.S.* // *Phys. Rev.* **40**, No 1. 19 (1932).
- [27] *Allibone T.E., Bancroft F.E., Innes G.S.* // *Journal of the Institution of Electrical Engineers* **85**, No 515. 657 (1939).
- [28] *Livingood J.J., Fairbrother F., Seaborg G.T.* // *Phys. Rev.* **52**, No 2. 135 (1937).
- [29] *Seaborg G.T., Segre E.* // *Phys. Rev.* **55**, No 8. 808 (1939).
- [30] *Fermi E.* // *Proc. Am. Philos. Soc.* **90**, No 1. 20 (1946).
- [31] *Seidlin S.M., Marinelli L.D., Oshry E.* // *J. Am. Med. Assoc.* **132**, No 14. 838 (1946).
- [32] *Copeland D.E., Benjamin E.W.* // *Nucleonics* **5**, No 2. 44 (1949).
- [33] *Горский А.А., Ш И.Г.* Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2022 год. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора (2023).
- [34] *Обухова О.* Подходы к оценке эффективности использования медицинского оборудования на примере аппаратов для маммографии. М.: ФГБУ «ЦНИИОИЗ» Минздрава России (2022).
- [35] *IAEA.* Directory of Radiotherapy Centres (DIRAC) (2024).
- [36] *World Nuclear Association.* Radioisotopes in Medicine (2024). <https://wna.org/information-library/non-power-nuclear-applications/radioisotopes-research/radioisotopes-in-medicine.aspx>
- [37] *IAEA.* IMAGINE - IAEA Medical imAGIng and Nuclear mEdicine global resources database (2024). <https://humanhealth.iaea.org/HHW/DBStatistics/IMAGINEMaps.html>
- [38] *Росатом.* Ядерные технологии на страже здоровья россиян (2023). <https://www.rosatom.ru/journalist/smi-about-industry/yadernye-tehnologii-na-strazhe-zdorovya-rossiyan/>
- [39] *Anon.* Обеспечение доступности ПЭТ/КТ диагностики в России (2022). <https://pet-uu.ru/obespechenie-dostupnosti-pet-kt-dagnostiki-v-rossii/>

- [40] IAEA. Accelerator Knowledge Portal (2024). <https://accelerator-knowledge-portal.iaea.org/>
- [41] Elekta. Elekta (2024). <https://www.elekta.com>
- [42] Accuray. Accuray (2024). <https://www accuray.com>
- [43] Accuray. CyberKnife (2024). <https://cyberknife.com/>
- [44] Vaidya J.S., Vaidya U.J., Baum M., Bulsara M.K., Joseph D., Tobias J.S. // *Front. Oncol.* **12**, 786515 (2022).
- [45] Zheltonozhsky V.A., Savrasov A.M., Zheltonozhskaya M.V., Chernyaev A.P. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **476**, 68 (2020).
- [46] Zheltonozhskaya M.V., Zheltonozhsky V.A., Lykova E.N. et al. // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **470**, 38 (2020).
- [47] Zheltonozhskaya M.V., Remizov P.D., Chernyaev A.P. et al. // *Phys. Part. Nucl. Lett.* **20**, No 6. 1433 (2023).
- [48] Григоренко Л.В., Антоненко Н.В., Артюков И.А. и др. // *Физмат* **1**, № 1. 123 (2023).
- [49] Favaudon V., Caplier L., Monceau V. et al. // *Sci. Transl. Med.* **6**, 245ra93 (2014).
- [50] Акулиничев С.В., Васильев В.Н., Гаврилов Ю.К. и др. // *Известия РАН. Серия физическая* **84**, № 11. 1542 (2020). (Akulinichev S.V., Vasiliev V.N., Gavrillov Yu.K. et al. // *Bull. Russ. Acad. Sci. Phys.* **84**, No 11. 1386 (2020)).

Development of Medical Physics in Russia

A.P. Chernyaev^{1,2,a}, A.A. Kim^{1,2}, E.N. Lykova^{1,2}, F.R. Studenikin^{1,2}, A.A. Shcherbakov^{1,2}

¹Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics,
Department of Nuclear Physics Methods in Medicine and Industry
Moscow, 119991, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics,
Department of Accelerator Physics and Radiation Medicine
Moscow, 119991, Russia

E-mail: ^aa.p.chernyaev@yandex.ru

This review focuses on the history of the development of medical physics in Russia and Moscow University, highlighting the key developmental milestones. A special emphasis is placed on Moscow University's historical role in advancing physical methods and technologies in medicine. Prominent ideas of Russian scientists that underlie high-tech medical devices and systems used in medicine are noted, as well as significant moments in the the development of nuclear physics technologies for these purposes. The stages of creation and improvement of high-tech radiation physical installations, methods, and technologies in domestic medicine are described. Trends in the development of radiation technologies in medicine in Russia and worldwide are traced, as well as the needs of Russian healthcare for its sustainable development under the current conditions. The review outlines the state of staffing in this field of medicine and presents the principles of constructing a system for personnel training and retraining at Moscow University to facilitate the development and implementation of radiation technologies in medical practice. Finally, an analysis of the trends in the application of nuclear physics methods in Russian medicine is conducted and effective approaches to ensuring the technological independence of our country's economy are proposed.

PACS: 29.20.-c, 87.56.-v

Keywords: medical physics, radiation therapy, nuclear medicine, accelerators.

Received 04 July 2025.

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2026. **81**, No. 1. Pp. .

Сведения об авторах

1. Черняев Александр Петрович — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, зав. отделом; e-mail: a.p.chernyaev@yandex.ru.
2. Ким Андрей Александрович — мл. науч. сотрудник; e-mail: kim@srd.sinp.msu.ru.
3. Лыкова Екатерина Николаевна — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: iv-kate@yandex.ru.
4. Студеникин Феликс Рикардович — канд. физ.-мат. наук, ассистент, зав. лабораторией; e-mail: f.studenikin@gmail.com.
5. Щербakov Алексей Александрович — мл. науч. сотрудник, программист первой категории; e-mail: scherbakov.aa15@physics.msu.ru.