

LXXII МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ЯДРО–2022:  
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИМЕНЕНИЕ ЯДЕРНО–ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ

## Ядерной физике в России 100 лет

А. П. Черняев,<sup>1,2,\*</sup> Е. Н. Лыкова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

<sup>2</sup>Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д. В. Скобельцына  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 14.11.2022; после доработки 08.12.2022; принята к публикации 13.12.2022)

В настоящем обзоре дана краткая история развития ядерной физики с начала XX века. Описаны наиболее значимые внедрения открытий ядерной физики в мировую экономику. Проведен анализ современного состояния внедрений достижений ядерной физики в народное хозяйство России и перспективы их развития в будущем. Обсуждаются наиболее яркие ядерные проекты в российской науке и технике.

PACS: 21.90.+f, 28.90.+i. УДК: 539.17.

Ключевые слова: история развития ядерной физики, наиболее значимые внедрения ядерно–физических методов в мировую экономику, внедрение достижений ядерной физики в народное хозяйство России.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.78.2310101](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.78.2310101)

### ВВЕДЕНИЕ

Ядерная физика — наиболее высокотехнологичная отрасль современной науки. Для ее развития используются достижения большого количества научных и инженерно–физических направлений. Ядерная физика — стимул развития фундаментальных исследований и технологий во многих неядерных областях научных исследований, поскольку аккумулирует в себе их достижения и развивается благодаря им. Поэтому развитие ядерной физики неразрывно связано с общим прогрессом в развитии мирового хозяйства.

Ее зарождение связано с цепью удивительных открытий на рубеже XIX–XX веков. В 1896 г. А. Беккерель установил, что урановая руда испускает невидимые лучи, обладающие большой проникающей способностью. Позднее это явление было названо радиоактивностью. В 1898 г. М. Склодовская и П. Кюри выделили несколько сотых грамма нового вещества — элемента, который излучал  $\alpha$ -частицы. Они назвали его полонием. В декабре того же года они открыли новый элемент — радий. В 1899–1900 гг. Э. Резерфорд и П. Виллард обнаружили  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ -излучения радиоактивных ядер. В 1911 г. Э. Резерфорд открыл атомное ядро, в котором сосредоточена почти вся масса атома, а в 1919 г. — взаимопревращение химических элементов и новую частицу — протон. В 1932 г. Д. Чедвик обнаружил не имеющую электрического заряда нейтральную ядерную частицу — нейтрон.

В России исследования по радиоактивности ста-

ли проводиться почти сразу после открытия А. Беккереля. В Петербургском университете с 1900 г. исследовались свойства радиоактивного излучения, в частности лечебные свойства целебных грязей (И.И. Боргман и А. П. Афанасьев). Профессор физики Московского университета А. П. Соколов исследовал радиоактивность минеральных вод Кавказа. В дальнейшем им был организован первый в стране учебный практикум по радиоактивности. Изобретатель радио А. С. Попов в 1902 г. создал прибор для измерения «напряжения электрического поля атмосферы с помощью ионизационного действия солей радия». В 1902–1903 гг. В. К. Лебединский и И. А. Леонтьев исследовали влияние радиоактивности на искровые разряды, а также одними из первых определили природу  $\gamma$ -лучей. Н. А. Орлов исследовал действие радия на металлы, парафин, легкоплавкие органические вещества. Работы велись также в Медицинской академии, в университетах Новороссийска, Харькова, Одессы и других городов. Из ферганской радиоактивной руды в 1921 г. В. Г. Хлопин получил отечественный препарат радия.

В 1918 г. в Петрограде был организован Государственный рентгенологический и радиологический институт с физико–техническим отделением, возглавляемый А. Ф. Иоффе. В 1921 г. При академии наук была организована радиевая лаборатория.

23 января 1922 г. по инициативе академика В. И. Вернадского Государственным ученым советом Наркомпроса РСФСР был утвержден Устав Радиевого института. Институт объединил имеющиеся к тому времени в Петрограде радиологические учреждения: радиевую лабораторию Академии наук СССР, радиевое отделение Государственного рентгенологического и радиологического ин-

\* E-mail: [a.p.chernyaev@yandex.ru](mailto:a.p.chernyaev@yandex.ru)

ститута и радиохимическую лабораторию. Директором института был назначен В. Г. Хлопин [1–5].

23 января 1922 г. условно считается, несмотря на двадцатидвухлетнюю предысторию, официальной датой рождения ядерной физики в СССР. Открытие института дало толчок дальнейшим исследованиям по ядерной физике. В 1933 г. в Ленинграде была проведена I Всесоюзная конференция по ядерной физике, а в 1935 г. в Радиевом институте был запущен первый в Европе циклотрон с энергией 4 МэВ [5, 6].

В тридцатые годы основное внимание ядерщиков было приковано к проблеме исследования энергии связи нуклонов в ядре. Затем исследователи переключились на изучение расщепления ядер, особенно после открытия в 1939 г. О. Ганом и Ф. Штрассманом деления урана [7, 8]. В том же 1939 г. Ю. Б. Харитон и Я. Б. Зельдович показали возможность осуществления цепной реакции деления ядер урана-235 [9–11]. Предложение об использовании энергии деления урана в цепной реакции в августе 1940 г. выдвинули И. В. Курчатов, Ю. Б. Харитон и Г. Н. Флеров.

В рамках американского атомного проекта (известного как «Проект Манхэттен») Э. Ферми был запущен в 1942 г. первый в мире атомный реактор. Первое в мире испытание ядерного оружия, состоялось 16 июля 1945 г. в штате Нью-Мексико (США), на полигоне Аламогордо. Во время испытания тестировалась плутониевая бомба имплозивного типа, получившая название «Штука» (англ. Gadget). Разрушения, причиненные взрывом бомбы, настолько превосходили ожидаемое, что международный коллектив выдающихся ученых обратился с просьбой к президенту США не применять ее в военных действиях. Тем не менее, состоялись два военных сброса атомных бомб. Бомба «Толстяк» 6 августа 1945 г. была сброшена на Хиросиму, а бомба «Мальш» — 9 августа на Нагасаки [12]. До сих пор в Японии сказываются последствия заражения радиоактивными изотопами, а США остаются единственной страной, использовавшей ядерное оружие.

В СССР работы по реализации ядерного проекта в 1943–45 гг. осуществлялись под руководством И. В. Курчатова. К середине 1945 г. были запущены экспериментальные установки по разделению изотопов и создание атомной бомбы в СССР стало реальностью.

В 1946 г. под руководством Л. П. Берии был создан Специальный комитет по созданию атомной бомбы. В этом же году был запущен первый исследовательский реактор Ф-1 на базе Курчатовского института. Создание советской атомной бомбы РДС-1 завершилось успешным ее испытанием на Семипалатинском полигоне в августе 1949 г. Термоядерная бомба РДС-6с была успешно испытана в августе 1953 г. А в июне 1954 г. в Обнинске была запущена первая в мире атомная электростанция мощностью 5 МВт [13, 14]. Как показало дальнейшее развитие ядерных исследований в на-

шей стране с конца 50-х годов прошлого века по настоящее время СССР всегда находился в мире на самых передовых позициях не только в создании ядерного оружия, но и в достижениях ядерной энергетики. Как будет показано ниже, в этой области Россия также является одной из стран с самой передовой технологией.

Именно к ядерной физике относится и наибольшее количество открытий и работ, за которые вручались Нобелевские премии. Из 597 Нобелевских премий, врученных лауреатам, 78 относятся к достижениям в ядерной физике (63 — по физике, 12 — по химии, 3 — по медицине).

В настоящем обзоре рассматриваются применения достижений ядерной физики в практической сфере.

Фундаментальные исследования как в экспериментальной, так и в теоретической ядерной физике столь обширны, что для их обсуждения нужна отдельная и очень большая работа. Отметим лишь что в фундаментальной области успешно развиваются такие крупные направления, как экспериментальная и теоретическая физика ядерных реакций, физика высоких энергий и элементарных частиц, физика космических лучей, физика нейтрино, астрофизика, физика взаимодействия ионизирующего излучения с веществом, ядерное материаловедение и многие другие.

Среди практических достижений ядерной физики для мирового сообщества наиболее широкое применение получили: открытие радиоактивности; обнаружение деления ядер и освоение энергии деления (создание ядерного оружия и атомных электростанций (АЭС)), создание ядерно-физических приборов и установок (ускорители заряженных частиц, масс-спектрометры, реакторы, детекторы и т.д.); получение материалов с новыми свойствами под действием пучков частиц; получение новых стабильных и нестабильных изотопов; использование изотопов в мировом хозяйстве для атомной и термоядерной энергетики, разработка материалов для электроники, приборов и установок на основе изотопов и т.д.

Развитие ядерных технологий позволило создать и развить новые области знаний и научных исследований: ядерную физику и химию, ядерную энергетику, ядерную медицину, радиобиологию и радиоэкологию, ядерную геологию и археологию и многие другие. Ядерная физика стала основой для создания уникальных установок, приборов и аппаратов (это направление получило название «ядерное приборостроение»).

Общее количество источников ионизирующих излучений в экономике мира выросло в сотни тысяч раз и сейчас составляет 6–8 млн., а в России — около 155 тысяч, то есть примерно 2–2.5% от мирового. Они применяются в широком спектре организаций и учреждений: на АЭС, в геологических и добывающих предприятиях, медицинских, научных, учебных, промышленных и таможенных учреждениях, пунктах захоронения радиоактивных веществ и др.

Только приборов и установок, использующих естественные и искусственные радионуклиды в России ~ 88 тысяч (57%). Это дефектоскопы, содержащие радионуклидные  $\gamma$ -источники (~ 1300), закрытые радионуклидные источники (~ 62 тысячи), радиоизотопные приборы и установки (~ 15 тысяч), 651 хранилище радиоактивных веществ и отходов ядерных реакторов. Рентгеновских установок в России меньше — 42.4%, а сложной техники (ускорители и реакторы) — всего 0.4%. В мировом хозяйстве соотношение источников ионизирующих излучений примерно такое же. Но именно сложная техника — строительство и использование ускорителей и реакторов — стала наиболее ярким достижением ядерной физики, которое свидетельствует об уровне научно-технического развития цивилизации в целом и страны в частности.

## 1. ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Установленный факт, что использование медленных нейтронов позволяет управлять выделением энергии при делении урана-235, поставил перед учеными сложную, но важную задачу — научиться использовать энергию деления урана. В 1946 г. в СССР для этих целей в Москве на территории нынешнего Института атомной энергии имени И.В. Курчатова был построен исследовательский ядерный реактор, в котором была осуществлена самоподдерживающаяся цепная реакция деления урана.

Как уже отмечалось во Введении, ядерная, или по традиции, атомная энергетика, родилась в нашей стране. В июне 1954 г. вошла в строй первая в мире атомная электростанция в подмосковном городе Обнинске, а в 1959 г. спущен на воду первый в мире атомный ледокол «Ленин». Сегодня атомная отрасль России представляет собой мощный комплекс из более чем 350 предприятий и организаций, в которых занято свыше 290 тыс. человек [15, 16]. Госкорпорация «Росатом» является крупнейшей энергетической компанией в России. Выработка электроэнергии на АЭС в 2019 г. составила около 209 млрд кВт·ч [16].

В 2020 г. в России были введены в промышленную эксплуатацию первый в мире усовершенствованный малый модульный реактор и единственная в мире плавучая АЭС «Академик Ломоносов». В 2022 г. в России действуют 11 АЭС, на которых эксплуатируются 37 энергоблоков (включая плавучие энергоблоки) [15, 18]. «Росатом» строит за рубежом 36 атомных энергоблоков на сумму более 130 млрд долларов.

К концу 2021 г. общая мощность мировой ядерной энергетики составила 389.5 ГВт, которые вырабатывают 437 действующих ядерных исследовательских и энергетических реакторов в 32 странах, из них в России работает 37 [17, 18]. Наибольшее число энергетических реакторов работает в США (92), Франции (56) и Китае (54). Россия занима-

ет четвертое место в мире по их числу. На начало 2022 г. доля атомной энергетики в мире составляет около 16.2%. Наибольшую долю в национальном производстве энергии ядерная энергетика занимает во Франции (69%), Украине (55%) и Словакии (52%). Россия и США делят 15 и 16 место с показателем в 20% [18].

Конструкции реакторов с момента зарождения ядерной энергетики постоянно совершенствовались. В настоящее время в мире используются несколько разновидностей реакторов. В основном это реакторы с легководным (89.5%) и тяжеловодным (6%) замедлителем и теплоносителем. В небольшом количестве реакторов используют графитовый замедлитель (2%) и газовое охлаждение (2%). На территории России используются реакторы с легководным и графитовым замедлителем, а также реакторы на быстрых нейтронах (БН), в которых замедлитель отсутствует. Наиболее перспективными являются именно БН реакторы, поскольку они позволяют превращать отработавшее ядерное топливо в новое топливо для АЭС с реакторами на тепловых нейтронах [19, 20]. Первый БН-реактор в России запущен в 2016 г. На сегодняшний день два таких реактора работают на Белоярской АЭС. Всего в России на 2022 г. работает 24 энергоблока с водо-водяными реакторами, 11 энергоблоков с реакторами канального типа и два энергоблока с БН реакторами. На большинстве АЭС используются водо-водяные энергетические реакторы (ВВЭР), в которых теплоносителем и замедлителем является вода. К этому же типу относятся судовые реакторы КЛТ, два из которых производят энергию на плавучей электростанции «Академик Ломоносов». К другому типу относятся канальные реакторы большой мощности (РБМК) с водным теплоносителем и графитовыми замедлителями. Такие реакторы используются на Смоленской, Курской и Ленинградской АЭС. На Билибинской АТЭЦ установлены 4 канальных реактора типа ЭГП (энергетический гетерогенный петлевой реактор), которые осуществляют не только производство электроэнергии, но и теплоснабжение города Билибино [21].

## 2. УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Качественный скачок в развитии ядерных технологий в мировом и российском хозяйстве был связан с созданием ускорителей заряженных частиц. Необходимость увеличения энергии таких частиц физики осознали уже после первых экспериментов Э. Резерфорда с излучением естественных радионуклидов. Были предложены разные методы ускорения частиц. Их целью было обеспечить большую энергию частиц, направленность и высокую интенсивность пучка, а также возможность ускорения разных заряженных частиц (электронов, протонов и ионов) до необходимых энергий. Осуществление

этих целей стало решающим преимуществом ускорителей по сравнению с источниками из естественных радионуклидов.

История разработки ускорителей связывается с созданием в 1929 г. английскими физиками Дж. Кокрофтом и Э. Уолтоном из лаборатории Э. Резерфорда каскадного ускорителя [22], на котором в 1932 г. они осуществили первую ядерную реакцию с искусственно ускоренными протонами<sup>1</sup>. В начале 1930-х гг. американским физиком Э. Лоуренсом был построен резонансный кольцевой ускоритель — циклотрон [23].

В настоящее время в мире действует  $\sim 45\,000$  ускорителей, причем в фундаментальной науке работает лишь 3.5% всех ускорителей ( $\sim 1\,200$ ), в промышленности  $\sim 27\,000$ , в сельском хозяйстве  $\sim 1\,500$  и треть ( $\sim 15\,100$ ) — в медицине. В России развитие ускорительной техники началось почти одновременно с другими ведущими странами мира. Лишь в 1990–2000 гг. их строительство сильно замедлилось. Однако в последнее десятилетие темпы внедрения ускорителей в отрасли народного хозяйства быстро восстанавливаются. В народном хозяйстве России действуют порядка 600 ускорителей. В том числе 300 в науке, промышленности и сельском хозяйстве, а 300 — в медицине.

### 3. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Разработка ядерных технологий для практического применения в промышленности началась уже в 20-е годы прошлого столетия. Спектр применения таких технологий очень широк. Это производство изотопов [24], неразрушающий контроль и активационный анализ [25–27], создание радиационно-стойких материалов для космической, авиа и оборонной промышленности [26, 28], создание новых материалов и укрепление поверхностей металлов [30], радиационная модификация изоляции проводов и термоусадочной оплетки для повышения теплоустойчивости проводов и кабелей [31], радиационная сшивка материалов (полимерных изделий, радиационно-сшитого пенополиэтилена, шин и т.д.) [18, 32], радиационная экология (очистка почвы, воды, газов) [33], микроэлектроника (создание элементов радиосхем — диодов, триодов, микросхем, печатных плат, компьютерных чипов посредством имплантации ионов) [34], сверхточная и прочная лучевая сварка [35], обработка продуктов питания, медикаментов и медицинских изделий [36, 37] и многое другое (см. таблицу). Весьма перспективно использование пучков  $\gamma$ -квантов, получаемых в лазерах на свободных электронах, пучков протонов, а также весьма экзотичные на сегодняшний

день идеи использования пучков нейтрино (например, для осуществления дальней связи).

В ядерной энергетике, которая производит 16.2% мировой электроэнергии и ее доля постоянно растет, ускорители выполняют важную задачу переработки отходов ядерного топлива с целью сокращения радиотоксичности и времени жизни отходов [38]. Разрабатываются технологии, позволяющие использовать пучки заряженных частиц непосредственно при работе реактора, что существенно может повысить их надежность при выработке атомной энергии. Весьма перспективным является использование ускорителей для осуществления термоядерного синтеза [39], радиационно-термического крекинга нефти, а также в радиационной экологии (очистка воды и газов [40, 41], утилизация отходов).

### 4. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Источники  $\gamma$ -излучения на основе радионуклидов  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , а также ускорители электронов применяют для радиационной обработки сельскохозяйственной продукции, при обработке почв. С их помощью эффективно уничтожают вредителей, замедляют прорастание семян, обеспечивают сохранность качества овощей при длительном хранении, осуществляют предпосевную стимуляцию для повышения урожайности. Радиационная генетика и селекция позволили вывести более 200 видов новых растений.

Рост радиационной обработки продуктов питания и сельскохозяйственной продукции обусловлен расширением рынка потребления, потерями продукции при хранении и транспортировке (до 15%), а также большим числом отравлений. Общее количество  $\gamma$ -источников и ускорителей, используемых для радиационной обработки продуктов питания, в последние годы, по данным МАГАТЭ, составляет соответственно 300 и 1500 единиц [42]. Наибольшее количество ускорителей работает в США (более 500), Японии (более 300) и Китае (220).

Облучение любого пищевого продукта с общим средним уровнем дозы до 10 кГр по заключению МАГАТЭ и ВОЗ не создает никакой токсикологической опасности [43, 44]. Обработка пучками электронов до уровня доз 20 кГр не вызывает вкусовых проблем при их потреблении, а также изменений в микробиологическом состоянии облучаемых продуктов. Для радиационной обработки пищевых продуктов разрешено применять  $\gamma$ -излучение ядер  $^{60}\text{Co}$  ( $E_\gamma = 1.25$  МэВ) и  $^{137}\text{Cs}$  ( $E_\gamma = 0.66$  МэВ) и ускорители электронов с энергией не более 10 МэВ [45].

В 40 странах мира ионизирующим излучением облучается более 500 тыс. тонн пищевой продукции (более 80 видов пищевых продуктов), в том числе в Китае — 200 тыс. тонн, в США — 103 тыс. тонн, в Юго-Восточной Азии — 75 тыс. тонн, в Европе —

<sup>1</sup> В 1951 г. английские физики Дж. Кокрофт и Э. Уолтон получили Нобелевскую премию по физике «за применение ускорителей в исследовании ядер атомов». 1932 г. обычно считают началом истории ускорителей.



Таблица. Число ускорителей в секторах мировой промышленности и промышленности России

Промышленность	В мире	В России
Число ускорителей электронов, протонов и ионов	~ 27000	~ 300
<i>В том числе:</i>		
В производстве новых материалов посредством имплантации ионов	~ 11000	~ 10
В электронно-лучевой обработке материалов	~ 7500	102
<i>В том числе сварка и резка:</i>	~ 4500	60
В неразрушающем анализе	~ 2000	90
В производстве изотопов	~ 1500	~ 20
В стерилизации продуктов питания и медицинского оборудования	~ 1500	18

менее 10 тыс. тонн. Это, например, мясо (фарш), овощи, фрукты, какао, кофе, яйца, овсяные хлопья, пиво, консервы, приправы, сгущенное молоко и т.д. Мировая стоимость услуг по облучению продуктов питания и сельскохозяйственной продукции составляет более 4.0 млрд долларов. Прогнозируется увеличение объема услуг по облучению продуктов питания к 2030 г. до 10.0 млрд долларов.

## 5. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА В МЕДИЦИНЕ

Первые факты применения ядерной физики в медицине относятся к началу XX века. Идея использования радиоактивности для лечения онкологических заболеваний впервые была высказана еще в 1901 г. П. Кюри. В том же году А. Данлос использовал радиоизотопы при лечении больного туберкулезом, а в 1903 г. А. Белл стал располагать источники радия в опухоли или около нее [46]. Начало применения радиоизотопов в отечественной медицине связано с Московским университетом, при котором осенью 1903 г. был образован Московский онкологический институт (в настоящее время МНИОИ имени П.А. Герцена). В нем началось лечение с использованием радиевых игл, которые институту подарили лично Мария и Пьер Кюри. В России радионуклидные источники для лечения онкологических заболеваний впервые были применены в 1903 г. в Санкт-Петербурге для лечения базальноклеточной карциномы [47]. Первая в мире крупная монография русского ученого Е.С. Лондона «Радий в биологии и медицине», посвященная радиобиологии и медицинской радиологии, опубликована в 1911 г.

В 1937 г. в Лондоне в госпитале Святого Варфоломея (St. Bartholomew's Hospital) был построен ускоритель электронов [48] для лечения онкологических больных. Энергия полученного на нем тормозного  $\gamma$ -излучения не превышала 1 МэВ, а размеры установки достигали 10 м. Тем не менее именно ускорители электронов стали в будущем осно-

вой для дистанционной лучевой терапии<sup>2</sup> на пучках тормозных фотонов.

Достижения физики ускорителей создали фундамент для применения радиоактивных изотопов. Э. Лоуренс вместе с С. Ливингстоном показали возможность наработки на циклотроне радиоизотопов. Именно на циклотроне было открыто большинство искусственных радиоактивных изотопов, нашедших применение в ядерной медицине и лучевой терапии, в том числе хорошо известный радиоактивный  $^{60}\text{Co}$ , синтезированный на циклотроне в Беркли Д. Ливингудом и Г. Сиборгом в 1937 г. [49] и первый радионуклид  $^{99}\text{Tc}$ , открытый Г. Сиборгом и Е. Сержем в 1939 г. [50]. Эти работы стали преддверием эры ядерной медицины, играющей существенную роль в развитии радионуклидной диагностики и терапии, в первую очередь для лечения опухолей.

С 30-х годов прошлого века стала развиваться контактная лучевая терапия закрытыми радиоактивными источниками (сейчас этот метод называют брахитерапией), которая сначала осуществлялась с использованием в качестве источника радия  $^{226}\text{Ra}$ , а позднее — радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ . В эти же годы были разработаны внутритканевые и внутритканевые методики для лечения различных новообразований.

Широкое терапевтическое использование радионуклидов связано с пуском первого ядерного реактора в 1942 г. [51]. Появилась возможность интенсивной наработки разнообразных радиоактивных изотопов и их поставки потребителям. Время на-

<sup>2</sup> С начала XX века и до середины 1950-х гг. для дистанционной лучевой терапии применялось низкоэнергетическое излучение рентгеновских трубок и  $\gamma$ -излучение радиоактивных изотопов. Установка образцов не была автоматизирована, применялась ручная настройка, энергия излучения была мала для эффективного облучения глубоко лежащих опухолей. Интенсивность природных источников радиационного излучения (радия, урана) была относительно низка.

чала поставок радионуклидов в медицину (1946 г.) считается датой зарождения ядерной медицины, что связано с публикацией в 1946 г. С. Сэйдлином статьи об успешном опыте использования изотопа йода  $^{131}\text{I}$  для лечения рака щитовидной железы [52]. В этой статье впервые вводится термин *ядерная медицина*. Наличие радионуклидов послужило базой для развития методов визуализации органов человека с помощью радиофармпрепаратов.

В 1948 г. была осуществлена поточечная регистрация изображения щитовидной железы. В 1949 г. Д. Коуплендом и Э. Бенджаменом [53] предложена идея первого диагностического прибора на основе открытых радиоактивных источников —  $\gamma$ -камеры, представляющей собой двухкоординатный сканер с сцинтилляционными счетчиками<sup>3</sup>.

Таким образом, ядерная физика стала базой для возникновения двух больших направлений в медицине: лучевой терапии и ядерной медицины<sup>4</sup> (лучевой радионуклидной диагностики и терапии открытыми радиоактивными источниками).

В современной медицине использование техники и методов ядерной физики сформировало структуру, представленную на рисунке. В дальнейшем эти направления обогатились множеством новых высокотехнологичных ядерно-физических установок и технологий.

В России в лучевой терапии к настоящему времени действует  $\sim 300$  ускорителей электронов с энергией 6–20 МэВ, 5 ускорителей протонов с энергией 150–250 МэВ, около 200 радиотерапевтических установок с источниками 60 с энергией фотонов  $\sim 1.25$  МэВ и 16 уникальных установок для стереотаксической хирургии: кибернож и  $\gamma$ -нож (позволяющие «выжигать» опухоль). В контактной лучевой терапии работает 149 установок, а также действует несколько экспериментальных центров лучевой терапии на пучках нейтронов.

В ядерной медицине в радионуклидной диагностике действует  $\sim 280$   $\gamma$ -камер и ОФЭКТ-томографов, в позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) используется 54 сканера, для которых радионуклиды нарабатывают на 18 циклотронах. Всего в мире ядерной медицине применяются  $\sim 30$  реакторных изотопов,  $\sim 50$  циклотронных изотопов, в том числе в диагностических целях используются около 27 видов радионуклидов, в терапевтических целях —  $\sim 33$ . Группа радионуклидов, образующихся при распаде электронов и позитронов, а также

в результате электронного захвата и изомерных переходов, включает 20 радионуклидов.

Эти радионуклиды используются для создания радиофармпрепаратов (РФП). В России на 2018 г. зарегистрированы и используются 22 РФП, а в США на 2016 г. используются 49 и ещё 350 РФП находятся на стадии клинических разработок. В целом объем мирового рынка ядерной медицины на настоящее время составляет 24 млрд долларов, а к 2030 г. предполагается рост до 43 млрд долларов. Лидером на мировом рынке ядерной медицины являются США (40%). Ближайшие конкуренты — Япония и Германия. Россия занимает меньше 5% мирового рынка ядерной медицины, но входит в пятерку крупнейших мировых производителей сырьевых медицинских изотопов, 90% которых уходит на экспорт. В настоящее время 40% мирового парка ядерных реакторов, на которых производятся медицинские изотопы, находится в России.

Число высокотехнологичных установок в России составляет примерно 670 в лучевой терапии и 352 — в радионуклидной диагностике. В 90 гг. прошлого века в стране перестали выпускать такую технику. В силу этого одной из задач ученых, инженеров и руководителей институтов и учреждений, выполняющих работы по прикладной ядерной физике, является обеспечение импортозамещения в этой наукоемкой отрасли, тем более что потенциал для такого замещения вполне достаточен.

## 6. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ В РОССИИ

Ядерная физика в России развивается по двум направлениям: фундаментальные исследования и практические приложения ядерно-физических методов в народном хозяйстве.

К важнейшим фундаментальным исследованиям XXI в. относятся: поиск новых методов, позволяющих ускорить темп увеличения энергии ускорителей (превышающей 100 МэВ/м), уменьшение размеров ускорителей, создание ускорителей на «холодных магнитах» и с «холодными ускоряющими структурами», создание источников синхротронного излучения четвертого поколения и лазеров на свободных электронах.

О мощности фундаментальной науки в нашей стране свидетельствует участие российских ученых практически во всех крупных международных проектах, среди которых:

1. европейская организация по ядерным исследованиям (ЦЕРН), крупнейшая в мире лаборатория физики высоких энергий, основным проектом которой является Большой адронный коллайдер (БАК), на котором реализуется программа исследований столкновений ионов в рамках коллабораций ALICE и CMS;
2. международный проект по созданию самого крупного в мире лазера на свободных электронах (XFEL);

<sup>3</sup> Основной вклад в развитие этого метода сканирования и создание  $\gamma$ -камер, начиная с 1952 г., внесли Х.О. Энгер и Дж.Р. Мэллард.

<sup>4</sup> В современном представлении в ведущих странах мира ядерная медицина включает в себя радионуклидную диагностику и терапию. В России в понятие ядерной медицины включают не только радионуклидную диагностику и терапию, но и дистанционную и контактную лучевую терапию, в том числе и стереотаксическую хирургию и томотерапию.

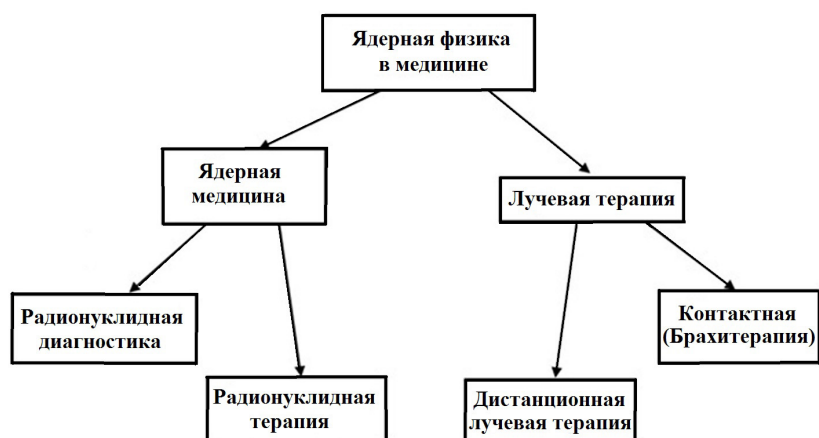


Рисунок. Структура использования технологий и методов ядерной физики в медицине

3. европейский центр по исследованию ионов и антипротонов (FAIR);
4. проекты в физике высоких энергий КЕК и DESY;
5. проект международного экспериментального термоядерного реактора (ITER), задачей которого является демонстрация возможности коммерческого использования термоядерного реактора и решения физических и технологических проблем;
6. различные космические исследования, в которых практически на любом научном космическом аппарате установлено наше оборудование, в том числе:
  - совместный российско–европейский проект по изучению Марса (ExoMars);
  - российско–немецкий проект космической обсерватории (спектр–РГ), изучающий Вселенную в рентгеновском диапазоне из точки Лагранжа L2.

В России развиваются и собственные уникальные проекты. В их числе синтез трансурановых изотопов, открытие новых сверхтяжелых элементов и исследование их свойств в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований (ОИЯИ); строительство на базе ОИЯИ в Дубне коллайдера тяжелых ионов NICA с разработкой программ его экспериментов NICA MPD, NICA SPD и NICA BM@N с целью изучения свойств плотной барионной материи; строительство источника синхротронного излучения четвертого поколения СКИФ, создание лазера на свободных электронах (три очереди) в ИЯФ СО РАН (Новосибирск). В настоящее время в НИИЦ «Курчатовский институт» (ПИЯФ, Гатчина) запущен исследовательский реактор ПИК; развивается программа экспериментов (в дополнение к нейтринным детекторам JUNO, KamLAND) на нейтринном детекторе в озере Байкал (БАЙКАЛ-ГВД). Кроме того, Россия находится на передовых позициях

в теоретических исследованиях в области ядерных моделей *ab initio*, спектроскопических свойств ядерных состояний сложной природы, физике высоких энергий, астрофизике и др.

Многие прикладные идеи ядерной физики внедрялись в технологии и технику в народном хозяйстве нашей страны с 60-х гг. прошлого века. В конце прошлого столетия страна утратила значительное количество этих разработок, а использующиеся устарели. В настоящее время происходит их возрождение. В этом процессе участвует большое количество учебно–научных, промышленных и коммерческих структур при активной поддержке государства.

Анализ сложившейся ситуации для ядерных технологий в России показывает следующее. Ежегодно на 5–7% возрастает число радионуклидных технологий и создаваемых на их основе установок в народном хозяйстве страны, причем меняясь качественно (на новую и более совершенную технику). Использование изотопной техники для решения прикладных задач и отработки новых технологий возрастает с каждым годом. Одним из наиболее развитых направлений радионуклидных технологий в промышленности, медицине и сельском хозяйстве является неразрушающий анализ. В медицине радионуклиды используются в уникальных ядерно–физических установках, таких как однофотонная эмиссионная компьютерная томография (ОФЭКТ) и позитронно–эмиссионная томография (ПЭТ), и особенно в комбинированных системах ПЭТ/КТ, ОФЭКТ/КТ, ПЭТ/МРТ. Однако высокотехнологичное оборудование у нас не производится, так что создание его производства — важнейшая задача в рамках импортозамещения.

Особое положение занимают ускорители, позволяющие значительно повысить внедрение достижений ядерной физики в различные области народного хозяйства России.

В промышленности ускорители используются для электронно–лучевой сварки, получения радиоактивных изотопов, создания новых, в том числе

полимерных, материалов, а также стерилизации медицинских изделий и радиационной обработки сельскохозяйственной продукции. Применение радиационных технологий в других отраслях носит в основном характер отдельных проектов. Для развития отечественной микроэлектроники необходимо значительно ускорить внедрение радиационных технологий, поскольку в этой отрасли Россия существенно отстает от ведущих стран мира.

Распределение ускорителей в отраслях народного хозяйства в нашей стране заметно отличается от мирового: в медицине задействовано 37% ускорителей, в научных и учебных заведениях — 11%, а в народном хозяйстве — лишь 52%. Чтобы соответствовать мировому распределению ускорителей по основным отраслям мировой экономики, в России должно быть ~870 ускорителей в медицине, ~1700 ускорителей в народном хозяйстве и ~100 в фундаментальной науке. Всего должно быть примерно 2600 ускорителей, то есть в ~5.5 раз больше, чем сейчас. Причем если для промышленности наша страна выпускает ускорители, то для потребностей медицины ускорители электронов не выпускаются.

Необходимо запустить производство собственных медицинских линейных ускорителей электронов с энергией 4–25 МэВ, синхротронов и циклотронов для протонной терапии и производства медицинских радионуклидов. В ядерной медицине необходимо создать замкнутый цикл производства изотопов, увеличить число и чистоту производящихся изотопов. Значительно увеличить разработку собственных РФП в нашей стране, не передавая за рубеж

производимые у нас радионуклиды.

Задачей физиков остается поиск методов визуализации, основанных на принципиально новых физических принципах. Необходимо развивать такие передовые работы, как, например, в Пекинском университете, где группа исследователей приступила к реализации проекта по разработке универсальной диагностической установки, совмещающей в себе четыре вида томограмм: КТ, ПЭТ, ОФЭКТ и ФМТ (флюоресцентную молекулярную томографию). России необходимо сократить отставание от ведущих стран в оснащении медицинской техники и разнообразии радиологических процедур.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в работе краткая история развития ядерной физики с начала XX века в мировой науке наглядно демонстрирует, что ядерная физика на протяжении последнего столетия оказала определяющее влияние на развитие не только научных исследований в различных областях знания, но и мировой, в том числе и российской, политики и экономики. Детальный анализ современного состояния внедрений достижений ядерной физики в народное хозяйство России показал, что многое сделано российскими учеными-ядерщиками для науки и народного хозяйства страны, особенно в области ядерной энергетики. Но это только начало. Впереди широкий фронт исследований в новых ядерно-физических направлениях, прекрасных и полезных открытий, а также использование достижений ядерной физики для процветания жизни в нашей стране.

- [1] Черняев А.П., Варзарь С.М. // Альманах клинической медицины. **44**(2), 260–268 (2016).
- [2] Черняев А.П. // ЭЧАЯ **43**. С. 499. (2012). (*Сметуаев А.Р. Phys. Part. Nuclei* **43**, 262–272 (2012))
- [3] Белоусов А.В., Близнюк У.А., Варзарь С.М., А.П. Черняев // Медицинская физика. 2014. **61**. С. 113.
- [4] Яковлев К.П. История и методология естественных наук. Вып.2, С. 298. М.: Изд-во МГУ, 1963.
- [5] АО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина» [Электронный ресурс].
- [6] Алхазов Д.Г., Шилов В.П., Эйсмонт В.П. Первый в Европе: История создания и довоенных лет циклотрона Радиевого института. В 2-х ч. Ч. I. — РИ-175 (Л.: Изд-во РИ, 1982).
- [7] Нейтрон: Предыстория, открытие, последствия. М.: Наука, 1975.
- [8] *Hahn O., Stassmann F.* // Die Naturwissenschaften **27**. 11. (1939).
- [9] Зельдович Я.Б., Харитон Ю.Б. // ЖЭТФ. **9**. С. 1425. (1939).
- [10] Зельдович Я.Б., Харитон Ю.Б. // УФН. **25**. С. 381. (1941).
- [11] Нейтрон. К пятидесятилетию открытия. М.: Наука, 1983.
- [12] *Groves L.R.* Now it can be Told. The story of Manhattan project. Пер. О.П. Бегичева. М.: Атомиздат, 1964.
- [13] Андрюшин И.А., Чернышев А.К., Юдин Ю.А. Укрощение ядра. Страницы истории ядерного оружия и ядерной инфраструктуры СССР. Саров: Изд-во Красный Октябрь, 2003.
- [14] Атомный проект СССР: Документы и материалы / М-во РФ по атом. энергии, РАН; Сост.: Л.И. Кудинова (отв. сост.) и др. Под общ. ред. Л.Д. Рябева. М.: Наука, 1998–2010.
- [15] Государственная корпорация по атомной энергетике «Росатом». [Электронный ресурс].
- [16] Концерн «Росэнергоатом» государственной корпорации «Росатом». [Электронный ресурс].
- [17] Всемирная ядерная ассоциация [Электронный ресурс].
- [18] МАГАТЭ — Международное агентство по атомной энергетике. [Электронный ресурс].
- [19] Левин В.Е. Ядерная физика и ядерные реакторы. Учебник для техникумов. Изд. 3-е, прераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979.
- [20] Кильмов А.Н. Ядерная физика и ядерные реакторы: Учебник для вузов. 2-е изд., прераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- [21] История Росатома [Электронный ресурс].



- [22] *Cockroft J.D., Walton E.T.S.* // Proc. Roy. Soc. A. **137**. 229. (1932).
- [23] *Lawrence E.O., Edlefsen N.E.* // Science. **72**. 376. (1930).
- [24] *Zheltonozhskaya M.V., Zheltonozhsky V.A., Lykova E.N., Chernyaev A.P., Iatsenko V.N.* Nucl. Instrum. Meth. B **470**, 38 (2020)
- [25] *Ворогушин М.Ф., Строкач А.П., Филатов О.Г.* // Письма в ЭЧАЯ **13**. С. 1251. (2016). (*Vorogushin, M.F., Strokach, A.P., Filatov, O.G.* Phys. Part. Nuclei Lett. **13**, 800–803 (2016))
- [26] *Шульга И.* Технопанacea. Атомный эксперт [Электронный ресурс].
- [27] *Черняев А.П.* Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина. М.: Изд-во МГУ, 2019.
- [28] *Virtanen A.* // J. Phys: Conf. Ser. **41**. 101. (2006).
- [29] *Cleland M.R.* Industrial applications of electron accelerators (CAS Proc. Yellow reports, CERN 2006-012, 2006).
- [30] *Калин Б.А.* // Известия ТПУ. **303**. С. 46. (2000). (*Kalinin B.A.* Bull. of the Tomsk Polytech. Univ. **303**. 46. (2000).)
- [31] *Новиков Г.К.* // Вестник ИГТУ. **21**. С. 122. (2017).
- [32] *Кабанов В.Я., Фельдман В.И., Ершов Б.Г.* и др. // Химия высоких энергий. **43**. С. 5. (2009). (*Kabanov, V.Y., Feldman, V.I., Ershov, B.G.* et al. // High Energy Chem. **43**, 1–18 (2009))
- [33] *Хамад Амин М.С.* // Вестник ВГУ. Серия: физика, математика. № 3, 24 (2021).
- [34] *Перинский В.В., Перинская И.В.* // Вопросы электротехники. № 1(26). С. 5. (2020).
- [35] *Латышенко Г.И., Соколовская Д.Д.* // Международный научно-исследовательский журнал. 2020. №6(96). С. 115.
- [36] *Близнюк У.А., Авдохина В.М., Борщезовская П.Ю., Болотник Т.А., Ипатов В.С., Родич И.А., Ихалайнен Ю.А., Студеникин Ф.Р., Черняев А.П., Шинкарев О.В., Юров Д.С.* // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. **87**. С. 5. (2021).
- [37] *Розанов В.В., Хуцистова А.О., Матвейчук И.В., Черняев А.П.* // Известия РАН. Сер. физ. **86**. С. 1099. (2022). (*Rozanov, V.V., Khutsistova, A.O., Matveychuk, I.V.* et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **86**, 908–911 (2022).)
- [38] *Voronin A.A., Voronin A.M.* // Вестник Инженер. НАН РК. 2003. № 1. С. 153.
- [39] *Жуляков Л.А.* // Наука и жизнь. 2000. №1.
- [40] *Яверт Н.* // Бюллетень МАГАТЭ. Сентябрь. С. 12. (2015). (*Jawerth N.* IAEA Bulletin. September 12 (2015).)
- [41] Report by the Director General. IAEA, General Conference. 2004.
- [42] Radiation technologies: view from Russia. Review by Radtech association supported Russian venture company. 2015.
- [43] Safety and nutritional adequacy of irradiated food. World Health Organization (Geneva, 1994).
- [44] Manual of Good Practice in Food Irradiation. Sanitary, Phytosanitary and Other Applications. IAEA Technical report series no. 481.
- [45] *Павлов А.Н., Чиж Т.В., Снегурев А.С.* и др. // Радиационная гигиена. **13**. С. 40. (2020).
- [46] *Birkenhake S., Sauer R.* // Experientia **51**, 681–685 (1995).
- [47] *Baltas D., Sakelliou L., Zamboglou N.* The physics of modern brachytherapy for oncology. CRC Press, 2007.
- [48] *Allibone T.E.* et al. // Electrical Engineers. 1939. **85**. 657.
- [49] *Livingood J.J., Fairbrother F., Seaborg G.T.* // Phys. Rev. **52**, 135 (1937)
- [50] *Seaborg G.T., Segru E.* // Phys. Rev. **55**, 808 (1939)
- [51] *Fermi E.* // Proc. Amer. Phil. Soc. **90**, 20 (1946)
- [52] *Seidlin S.M., Marinelli L.D., Oshry E.* // J. Am. Med. Assoc. **132**, 838 (1946).
- [53] *Copeland D.E., Benjamin E.W.* // Nucleonics. **5**, 44 (1949).

## Nuclear Physics in Russia is 100 Years Old

A.P. Chernyaev<sup>1,2,a</sup>, E.N. Lykova<sup>1,2</sup>

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

E-mail: [a.p.chernyaev@yandex.ru](mailto:a.p.chernyaev@yandex.ru)

This review gives the history of the development of nuclear physics since the 1920s. The most significant discoveries in nuclear physics and their introduction into the world economy are described. The analysis of the current state of the achievements of nuclear physics in the national economy of Russia and the prospects for their development in the future are carried out. The brightest nuclear projects in world and Russian science and technology are discussed.

PACS: 21.90.+f, 28.90.+i.

**Keywords:** the history of the development of nuclear physics, the most significant introduction of nuclear physics methods into the world economy, the introduction of the achievements of nuclear physics into the national economy of Russia.

Received 14 November 2022.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2023. **78**, No. 1. Pp. 1–9.

### Сведения об авторах

1. Черняев Александр Петрович — доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой; e-mail: [a.p.chernyaev@yandex.ru](mailto:a.p.chernyaev@yandex.ru).

2. Лыкова Екатерина Николаевна — канд. физ.-мат. наук, ассистент; e-mail: [iv-kate@yandex.ru](mailto:iv-kate@yandex.ru).