

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ, ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ В РОССИИ

© 2025 г. А. П. Черняев^{1,2),*}, А. А. Ким^{1,2)}, В. В. Розанов^{1,2)},
Ф. Р. Студеникин^{1,2)}, А. А. Щербаков^{1,2)}

Поступила в редакцию 30.09.2024 г.; после доработки 30.09.2024 г.; принята к публикации 26.11.2024 г.

Представлен анализ состояния и использования различных видов источников ионизирующих излучений в науке и отраслях народного хозяйства России за 15 лет (2007–2022 гг.). Обзор базируется на объективных данных из научных журналов, печатных/онлайн источников МАГАТЭ и некоторых государственных структур нашей страны. Сопоставлено наличие и использование источников ионизирующих излучений в России и мире. Рассмотрено состояние и перспективы применения установок, работающих на основе ионизирующих излучений как в фундаментальной науке, так и в промышленности, сельском хозяйстве и медицине. Исследовано соотношение высокотехнологичных установок и приборов: ускорителей (на встречных пучках, высоких, средних и низких энергий), реакторов (энергетических, промышленных и исследовательских), термоядерных установок, рентгеновского оборудования, изотопных устройств и приборов. Изучены тенденции применения источников ионизирующих излучений в науке и экономике России. Предложены эффективные меры по созданию условий технологической независимости экономики нашей страны.

Ключевые слова: ионизирующие излучения, высокотехнологичные установки

DOI: 10.31857/S0044002725010159, **EDN:** GRPGLI

1. ВВЕДЕНИЕ

Фундаментальные научные исследования второй половины 19 в. привели к открытию источников ионизирующих излучений: катодные лучи (Ю. Плюккер, 1859 г.) [1], X -лучи (В. Рентген, 1895 г.) [2]. Работы А. Беккереля с ураном (1896 г.) [3] и последующие исследования М. Кюри и П. Кюри с полонием и радием [4] привели к открытию явления радиоактивности. Итогом этих открытий стало появление первого прибора, создающего ионизирующие излучения, – рентгеновской трубки (в России первый такой прибор создал в 1896 г. известный ученый А.С. Попов) [5]. Уже к 20 в. он получил широкое распространение в медицине.

В 1901 г. французский ученый А. Данлос использовал радиоизотопы при лечении больного туберкулезом, т.е. разработал прототип радиоизотопного устройства [6]. В 1903 г. А. Белл стал применять источники радия в онкологии [7], располагая их непосредственно в опухоли или около нее. Изотопы стали источником частиц для экс-

периментального исследования структуры атомных ядер. В 1919 г. Э. Резерфорд использовал радиоактивный источник радия для осуществления первой реакции под действием α -частиц в лабораторных условиях [8].

При расширении экспериментов по исследованию ядер возникла необходимость в увеличении энергии и интенсивности потока используемых в них частиц. Это привело к созданию в 1920-х гг. уникальных устройств – ускорителей элементарных частиц для получения ионизирующих излучений. На рубеже тридцатых годов прошлого столетия был создан целый ряд разных ускоряющих частицы устройств: в 1919 г. разработана принципиальная схема умножителя с удвоением напряжения швейцарским физиком Г. Грайнахером [9], линейный ускоритель Видероз (1928 г.) [10], генератор Кокрофта–Уолтона (1924 г.) [11], электростатический ускоритель Ван де Граафа (1931 г.) [12], циклотрон (1931 г.) [13]. В результате к началу тридцатых годов учеными-ядерщиками созданы три вида источников ионизирующих излучений (ИИИ): рентгеновские трубки, радиоизотопные источники и ускорители заряженных частиц.

За более чем вековую историю ИИИ, особенно ускорители, претерпели кардинальные изменения, а для их использования созданы уникаль-

¹⁾ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына, Москва, Россия.

²⁾ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, Москва, Россия.

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

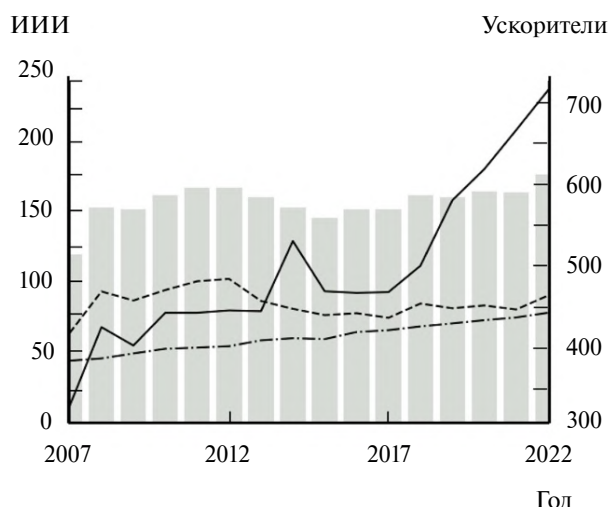


Рис. 1. Количество ИИИ в России в период 2007–2022 гг. Кривые показывают количество ИИИ различных типов: сплошная — ускорители заряженных частиц (правая вертикальная ось), штриховая — радионуклидные, штрихпунктирная — рентгеновские источники, диаграмма — общее число ИИИ, уменьшенное в 10^3 раз (левая вертикальная ось).

ные установки с самыми передовыми технологиями. Цель настоящего обзора — не просто уточнение данных, скомпонованных в [14–17] и частично содержащих достаточно грубые оценки, о состоянии наличия и использования ИИИ в России. На основе вновь собранных данных из научных журналов, источников МАГАТЭ и некоторых государственных структур России (2007–2022 гг.) в обзоре прослежено не только состояние, но и тенденции по распространению и использованию ИИИ в нашей стране по сравнению с мировыми.

2. ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ В РОССИИ И МИРЕ

В настоящее время общее количество ИИИ в мире приближается к 10 млн единиц. Среди ИИИ наибольшее количество составляют радионуклидные источники ~ 5 –6 млн единиц. В это число входят как созданные (излучение нарабатывается в реакторах и на ускорителях), так и естественные радионуклиды, которые выделяют из геологических пород полезных ископаемых. Рентгеновских установок в мировом хозяйстве примерно 4 млн единиц.

Особую роль играют высокотехнологичные ИИИ, поскольку именно они определяют уровень научного и экономического развития каждой страны. К ним относятся ускорители заря-

женных частиц, реакторы всех типов и назначений, разные типы томографов (КТ, ОФЭКТ, ГК, ПЭТ, МРТ) и другие установки, использующие ИИИ. Их общее число в мире не превышает 200–300 тыс.

В России соотношение всех используемых в народном хозяйстве ИИИ и динамика изменений их количества с 2007 по 2022 гг. представлены на рис. 1. Общее количество ИИИ в России по данным [18] на 2022 г. составляет 178323. По сравнению с данными [19] за 2012 г. число ИИИ за 10 лет увеличилось на $\sim 6\%$. На рис. 1 представлена динамика изменений рентгеновских, радионуклидных источников и ускорителей с 2007 по 2022 г. [18–33]. За этот период число ускорителей выросло почти в 2.3 раза, рентгеновских установок — в ~ 2.5 раза. Количество радиоизотопных источников в течение 15 лет сильно менялось год от года, но по сравнению с 2007 г. возросло в 1.4 раза в соответствии с потребностями в народном хозяйстве. Это свидетельствует о положительной тенденции развития российской экономики даже в сложных современных внешнеэкономических условиях.

В табл. 1 представлено соотношение различных типов ИИИ в России и мире в 2022 г. Нам представляется, что доля в 1.5–2.0% соответствует достойному уровню обеспечения высокотехнологичными установками любого типа ИИИ.

2.1. Рентгеновские приборы и установки

В табл. 2 приводятся данные [18–20, 28] о наиболее развитых направлениях использования рентгеновского оборудования в России (их число за 15 лет выросло почти в 2 раза с 44 до 80 тыс.). Анализируя данные об источниках рентгеновского излучения, видно, что в промышленности их используют преимущественно в дефектоскопии для неразрушающего контроля, таможенных терминалах и, конечно, в медицине. Число установок за обсуждаемый период возросло в 1.7–1.9 раза.

Количество рентгеновских досмотровых комплексов за 15 лет выросло более чем в 5 раз. В целях безопасности они устанавливаются в последние годы не только в аэропортах и на железнодорожных вокзалах, но и в государственных учреждениях, на объектах культурно-просветительского, спортивного, медицинского профиля, местах массового скопления людей. Возросло качество оборудования: пространственное разрешение, контрастность, чувствительность, надежность работы, сократилось время получения снимков. Этот рост создает условия для повышения безопасности: надежность предотвращения терактов, ускоренный поиск

Таблица 1. Источники ионизирующих излучений в России и мире в 2022 г.

Типы ИИИ	Число в мире	Число в России	Доля России, %
Рентгеновские установки	~ 4000000	78556	1.96
Радиоизотопные источники	~ 6000000	90899	1.51
Ускорители заряженных частиц	~ 45000	725	1.61
Неионизирующие установки (МРТ)	51498	750	1.46

Таблица 2. Рентгеновские установки в народном хозяйстве России

Типы установок	2007	2012	2017	2022
Дефектоскопы рентгеновские	6008	7691	9194	11149
Досмотровые рентгеновские установки	1295	2951	4745	6738
Рентгеновские медицинские аппараты	36722	43835	52079	60669
Всего	44025	54477	66018	78556

Таблица 3. Медицинская рентгеновская техника в России и мире

Тип рентгеновских установок	Число в мире	Число в России	Доля России, %
Компьютерные томографы	93773	2222	2.37
Рентгеновские медицинские аппараты	~ 4000000	60669	~1.5
Установки рентгеновской терапии	732	86	11.7
Маммографы [42]	57913	3714	6.4

взрывчатых веществ и досмотра даже такого крупногабаритного транспорта как фуры и железнодорожные вагоны. Большая часть этого оборудования производится в России.

В медицине количество и качество рентгеновского оборудования (более 60000 установок) вполне соответствует международному уровню. Рентгеновское оборудование широко вошло в повседневную работу практически любого медицинского учреждения. Внедряется все большее число медицинских рентгеновских приборов с детекторами высокого разрешения и высокой скоростью анализа рентгеновских снимков. В России производится в среднем 44% используемых рентгеновских приборов и установок, флюорографов выпускается 70% от их общего числа, а, например, маммографов – всего 24%. Сложная рентгеновская техника в основном ввозится из-за рубежа (ангиографы и КТ-томографы полностью иностранного производства).

В табл. 3 показана доля действующих рентгеновских установок в России в общемировом количестве. Видно, что число КТ-томографов и медицинских рентгеновских аппаратов, включая терапевтические, соответствует мировому уровню. Маммографами и терапевтическими установками наша страна обеспечена на уровне высокоразвитых стран мира. Необходимо увеличить долю КТ-установок последних поколений. Наиболее актуальная задача – запуск производства

отечественных КТ и современных высокотехнологичных рентгеновских установок.

2.2. Радиоизотопные приборы и установки

Основным способом получения радионуклидов является их наработка в реакторах, а также на ускорителях заряженных частиц. В подавляющем большинстве это циклотроны с энергией 4–70 МэВ. Но последние годы в рамках пробных проектов их нарабатывают на ускорителях электронов. Для целого ряда изотопов цена такой наработки оказывается сравнимой с наработкой на ускорителях протонов. Тем не менее, использование медицинских ускорителей электронов, расположенных в отделениях радиотерапии онкологических учреждений, делает наработку на них радиоизотопов весьма привлекательной. В последние годы активно ведутся исследования по наработке изотопов цезия, циркония и гафния с помощью фотоядерных реакций $^{131}\text{Cs}(\gamma, 2n)$; ^{89}Zr , ^{177}Lu , $^{179\text{m}2}\text{Hf}(\gamma, p)$; $^{180\text{m}}\text{Hf}(\gamma, \gamma')$ [34–36].

Технологии с использованием радиоактивных изотопов весьма разнообразны прежде всего в промышленности и ядерной медицине (в радионуклидной диагностике и терапии). В табл. 4 представлены данные об изменении количества устройств, приборов на основе радионуклидов, а также закрытых радионуклидных источников, используемых в наиболее продвинутых направлениях в течение 15 лет. Число гамма-дефектоскопов и гамма-установок изменилось

незначительно. Количество закрытых радионуклидных источников возросло почти в 2 раза, а радиоизотопных приборов — уменьшилось в 2 раза. Причина этого, по-видимому, в утилизации старых радионуклидных источников и приборов и замена их новыми. В целом число радионуклидных источников выросло в 1.5 раза.

В медицинских применениях использование радионуклидов позволило без хирургического вмешательства осуществлять диагностические и терапевтические процедуры (табл. 5). На этой базе создан ряд уникальных томографов, начиная с гамма-камеры, ОФЭКТ, и завершая наиболее точными на данный момент диагностическими приборами — позитрон-эмиссионными томографами (ПЭТ). Однако использование в диагностике радионуклидных установок — гамма-камер, ОФЭКТ и ПЭТ (которые к тому же у нас в стране не производятся) — достаточно сильно отстает от уровня стран Евросоюза.

Брахитерапия развивается у нас на уровне ведущих стран мира. Исследуется практика применения метода бор-нейтрон-захватной терапии в институте ядерной физики имени Г.И. Будкера СО РАН и ФГБУ “НМИЦ онкологии им. Н.Н. Блохина”.

3. УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Ускорители — как реактор и любое изотопное устройство — являются уникальными творениями физиков-ядерщиков 19–21 вв. Они стали не только инструментом для исследования микромира, но и неотъемлемой частью большого числа технологических процессов в промышленности, сельском хозяйстве и медицине. Достижением развития ускорительных ядерно-физических методов является их использование в смежных областях науки и техники: электронике, форвакуумной технике, физике сверхвысоких частот, науке о материалах, включая космическое материаловедение, и т.д., создание на основе этих исследований новых устройств, приборов, технологий.

Современные ускорители уменьшились в размерах, а их характеристики стали меняться в широких пределах, расширяя спектр решаемых задач. В табл. 6 представлено количество ускорителей по данным МАГАТЭ, используемых в науке, промышленности, сельском хозяйстве, медицине в мире и России, а табл. 7 иллюстрирует динамику изменения их числа в России. Видно, что общее число ускорителей (как электронов, так и тяжелых заряженных частиц) возросло с 2007 г. примерно в 2.3 раза. Количество ускорителей электронов существенно возросло преж-

де всего в медицине (почти в 3 раза) и достигло ~400 без учета кобальтовых установок. В России стало больше — 106 — ускорителей тяжелых заряженных частиц.

3.1. Ускорители в науке

Особо выделим достижения российской ускорительной техники в фундаментальной науке. В мире в науке используются сложнейшие установки и ускорительные комплексы (синхротроны, коллайдеры, линейные ускорители), позволяющие ускорять частицы до сверхвысоких энергий — сотни ГэВ и даже единицы ТэВ.

В фундаментальной науке российские ускорительные комплексы занимают самые передовые позиции. Из восьми действующих и четырех планируемых в мире таких комплексов на встречных пучках — российских три (табл. 8): два в Новосибирске и единственный в мире комплекс NICA, запущенный в 2024 г. в ОИЯИ (Дубна).

Россия на передовых позициях в фундаментальных и прикладных исследованиях на пучках синхротронного излучения (СИ) [37]. Из 58 центров СИ в мире (табл. 9) у нас в стране шесть центров имеют источники СИ: ФИАН (Москва), НИЦ “Курчатовский институт” (Москва), ИЯФ СО РАН (Новосибирск), ОИЯИ (Дубна), НИИФП им. Ф.В. Лукина (Зеленоград), Томский политехнический университет (Томск). Например, на источнике синхротронного излучения “КИСИ-Курчатов” проводят исследования в области нанодиагностики и биотехнологий, конструируют трехмерные модели материалов, изучают объекты культурного наследия и воздействие лекарственных препаратов на опухоли.

3.2. Ускорители в промышленности

В промышленном производстве широко применяются разные типы ускорителей электронов (с энергиями 0.02–10 МэВ), протонов (с энергиями 4–70 МэВ), ионов (с энергиями 0.01–5 МэВ). Количество промышленных комплексов, использующих радиационные технологии на базе ускорителей, в мире составляет несколько сотен. У нас в стране их число приближается к 80.

В мире в промышленности более 11 тысяч ускорителей ионов (с энергией от единиц до 5000 кэВ) применяют для имплантации тяжелых ядер при изготовлении полупроводниковых материалов, элементов радиосхем, микросхем, печатных плат, компьютерных чипов. Ускорители протонов применяются для создания генераторов нейтронов и неразрушающего анализа материалов (всего более 4000). Ускорители электронов используют для обработки материалов и об-

Таблица 4. Количество установок с радионуклидами в России [18–20, 28]

Типы установок	2007	2012	2017	2022
Гамма-дефектоскопы	1238	1742	1268	1334
Закрытые радионуклидные источники	39137	77767	58068	76366
Мощные гамма-установки	205	200	231	201
Радиоизотопные приборы	23338	23225	15359	12998
Всего	63918	102934	74926	90899

Таблица 5. Количество медицинских установок с использованием радионуклидов

Тип установки	Число в мире	Число в России	Доля России, %
Гамма-камеры и ОФЭКТ [43, 44]	27 180	220	0.81
ПЭТ-сканеры [43, 45]	5671	60	1.06
Бор-нейтрон-захватная терапия [37]	33	2	6.06
Гамма-нож [46]	396	7	1.8
Оборудование для брахитерапии [47]	3470	153	4.41

Таблица 6. Ускорители электронов, протонов и ионов в экономике мира и России в 2022 г.

Область использования	Число в мире	Число в России
Научные исследования	~1000	79–120**
Промышленность	~27000	226–246**
Сельское хозяйство (радиационная обработка с/х продукции)	~1500	18
Медицина	16959*	558*
Всего	~45000	725

Примечание. *Это значение по данным МАГАТЭ включает примерно 1500 кобальтовых установок (из них около 150 в России).

**Ускорители могут использоваться как в научных, так и прикладных исследованиях.

Таблица 7. Ускорители в народном хозяйстве России в 2007–2022 гг. [18–20, 28]

Тип ускорителей	2007	2012	2017	2022
Протонов и ионов	45	52	76	106
Электронов	284	397	396	619
Всего	329	449	472	725

лучения их электронным пучком (их число 7500 и 3000 соответственно).

В России 598 генераторов нейтронов нашли применение в основном в геологоразведочной и добывающей промышленности (443) и 32 в других отраслях. На промышленных предприятиях работает более 100 ускорителей, в таможнях — 65. Большая их часть создана в НИИЯФ МГУ (в отделе профессора В.И. Шведунова) совместно с НПО “Торий”. Из 221 ускорителя в учебно-научных учреждениях больше половины используется в прикладных целях (медицина и промышленность). Из более чем 770 установок, используемых в промышленной дефектоскопии, ускорители электронов составляют лишь небольшую часть (несколько десятков).

3.3. Ускорители в сельском хозяйстве

Главной задачей действия ионизирующего излучения при обработке сельскохозяйственной продукции (в том числе и продуктов питания) является уничтожение при дозах 10–20 кГр более 70% различных видов бактерий, а при дозе 100 кГр — 100% всех видов патогенов и достижение полной стерильности продукции. Важно отметить, что радиационное воздействие осуществляется при комнатной температуре. При дозах до 10 кГр ни вкусовые, ни биохимические характеристики продукции практически не меняются. Это позволяет эффективно уничтожать вредителей, существенно повысить качество сельскохозяйственной продукции и значительно про-

Таблица 8. Ускорительные комплексы на встречных пучках [48, 49]

Статус	Название	Страна	Год запуска	Тип частиц	Длина орбиты, м	Максимальная энергия, ГэВ	Светимость, $10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$
Работающие	ВЭПП-4М	Россия	1992	e^+, e^-	366	6	до 100
	ВЭПП 2000	Россия	2006	e^+, e^-	24	1	100
	RHIC	США	2000	p , ионы	3833	100 /нуклон	p : 14 Au: 0.1
	BEPC-II	Китай	2007	e^+, e^-	238	1.89	1000
	LHC (CERN)	Европа	2008	p , ионы	26 659	p : 7700 Pb: 1380/нуклон	pp : 1.7×10^4 Pb-Pb: 0.002
	DAΦNE	Италия	1999	e^+, e^-	98	0.7	450
	NICA	Россия	2023	p , ионы	500	12.6 4.5 /нуклон	10^{30}
	SuperKEKB	Япония	2016	e^+, e^-	3016.315	e^- : 7, e^+ : 4	800 000
Планируемые	eRHIC	США	нет информации	e^-, p ,	3834	10–30 (e^-), 250 (p), 130/нуклон (Au)	1000 (e, p)
	FCC (CERN)	Европа	2040	p, p , e^+, e^-	100	100 000 (p, p), 175 (e^+, e^-),	1 000 000
	ILC	Япония	2026	e^+, e^-	30–50	500	нет информации
	CEPC	Китай	2035	e^+, e^-	100	240	нет информации

Таблица 9. Страны с центрами, имеющими источники СИ [37]

Страна	Количество центров	Страна	Количество центров
Япония	11	Индия	2
США	8	Италия	2
Германия	5	Тайвань	2
Китай	5	Франция	2
Россия	5	Великобритания	1
Австралия, Армения, Бразилия, Дания, Испания, Иордания, Иран, Канада, Корея, Польша, Сингапур, Таиланд, Мексика, Швейцария, Швеция		1	
Всего		58	

длить срок ее годности. Кроме того, под действием ИИИ замедляется прорастание семян, а для повышения урожая осуществляется их предпосевная стимуляция и радиационная обработка почв. За полвека радиационная генетика позволила вывести более 200 видов новых растений.

В мировом сельском хозяйстве для этих целей работает 1500 ускорителей и 300 кобальтовых установок, в России их насчитывается 18 и 4 соответственно. Рентгеновских установок работает значительно больше — порядка нескольких тысяч, и это число быстро возрастает.

Прогнозируется, что к 2030 г. радиационными методами будет обрабатываться около 1 млн т пищевой продукции (около 100 видов продуктов) на сумму выше 10 млрд долл. [38].

В России действует 18 центров радиационной обработки продуктов питания и стерилизации предметов медицинского назначения. К сожалению, большая их часть (порядка 15) размещены в научно-исследовательских учреждениях. Строительство 30–40 таких центров выведет Россию на объемы обработки порядка 250 тыс. т в год сельскохозяйственной продукции, что в значительной степени удовлетворит потребности экономики.

3.4. Ускорители в медицине

В медицине в настоящее время для диагностики и лечения онкологических заболеваний используется треть всех действующих в мире ускорителей. Всего медицинские ускорители работают в 156 странах мира. В табл. 10 представ-

Таблица 10. Установки с медицинскими ускорителями в России и мире

Типы медицинских ускорителей	Число в мире	Число в России	Доля России, %
Медицинские ускорители электронов [47]	16959*	553*	3.6
Установки кибер-нож [50]	413	10	2.4
Установки томотерапии [51]	639	3	0.5
Ускорители интраоперационной лучевой терапии [52]	260	12	4.6
Ускорители протонной терапии [47]	123	5	4.1
Медицинские протонные циклотроны для наработки изотопов [37]	1268	60	4.7

Примечание. *Это значение по данным МАГАТЭ включает кобальтовые установки, которые не выделяются из полного числа, их в мире примерно 1500, в России – ~150.

лены ускорительные установки для лучевой терапии: линейные ускорители, кибер-ножи, установки интраоперационной и томотерапии, ускорители протонов для наработки радионуклидов и лучевой терапии. Таких установок в России с учетом кобальтовых почти 460. Видно, что только количество установок томотерапии у нас явно недостаточно. По остальным ускорительным комплексам мы сравнимы с наиболее обеспеченными в этом отношении странами мира. В 14 ведущих странах работает 10839 медицинских ускорителей (табл. 11), причем Россия по общему числу поднялась с 13-го места в 2018 г. на 7-е место в 2024 г. Важно отметить, что это место Россия сохраняет и по числу всех наиболее высокотехнологичных типов установок на основе ИИИ, хотя еще 5–10 лет назад по таким установкам наша страна не входила даже в десятку ведущих стран мира.

4. ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ КАК ИСТОЧНИКИ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Ядерная энергетика – одна из наиболее развитых отраслей народного хозяйства России. Именно в России создаются самые передовые технологии мировой ядерной энергетики. Наша страна строит и обслуживает множество разнообразных типов ядерных реакторов, в том числе и за рубежом.

Следует отметить, что около трети эксплуатируемых в мире ядерных реакторов используются не для выработки электроэнергии (в дальнейшем энергетические), а для научных исследований, учебно-образовательных целей и производства радиоизотопов. В мире 229 исследовательских и 417 энергетических реакторов [39–41] (табл. 12). Доля ядерной энергетики в мире составляет около 10.3% на 2023 г. [40]. Атомная энергетика в национальном производстве энергии наибольшую долю составляет во Франции (64.8%) и Словакии

(61.3%). Россия и США делят 15 и 16 места с показателем в 18.5% [40].

В мире в основном используются реакторы с легководным (89.5%) и тяжеловодным (6%) замедлителем и теплоносителем. Примерно 2% реакторов используют графитовый замедлитель и газовое охлаждение. В России используются реакторы с легководным и графитовым замедлителем, а также реакторы на быстрых нейтронах (БН) без замедлителя. Именно последний тип реакторов наиболее перспективен, поскольку в них отработавшее ядерное топливо превращается в новое топливо для реакторов на тепловых нейтронах. Два таких реактора работают на Белоярской АЭС с 2016 г.

В России из общего числа 145 реакторов 44 – энергетические и 6 из них работают на промышленных предприятиях. В табл. 13 представлена динамика изменения количества исследовательских, промышленных и энергетических реакторов за 15 лет. Остальные (101 реактор) относятся либо к исследовательским (56), либо к промышленным (45).

В России в настоящее время работает 24 энергоблока с водо-водяными реакторами, 11 энергоблоков с реакторами канального типа и два энергоблока с реакторами на быстрых нейтронах. На большинстве АЭС используются реакторы типа ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор), в которых в качестве теплоносителя и замедлителя используется вода. К этому же типу относятся два судовых реактора на плавучей электростанции “Академик Ломоносов”. К канальному типу относят реакторы РБМК (реактор большой мощности канальный) с водным теплоносителем и графитовыми замедлителями. Они используются на Смоленской, Курской и Ленинградской АЭС. На Билибинской АТЭЦ четыре канальных реактора типа ЭГП (Энергетический гетерогенный петлевой реактор) используются для производ-

Таблица 11. Высокотехнологичные установки в медицине

Страна	Медицинские ускорители электронов	Установки кибер-нож	Установки гамма-нож	Ускорители интраоперационной лучевой терапии	Томотерапия	Медицинские протонные циклотроны для наработки изотопов	Ускорители протонной терапии	Брахи-терапия	Рентгено-терапия
США	3892	120	115	72	162	249	42	772	6
Китай	2931	39	48	13	84	175	7	12	122
Япония	1069	47	53	?	98	218	24	239	0
Индия	794	12	6	2	29	25	1	413	5
Франция	570	40	7	12	28	31	4	100	2
Германия	566	12	10	63	12	43	7	229	114
Россия	555	10	7	12	3	60	5	153	86
Италия	523	9	11	5	26	46	3	61	14
Бразилия	374	1	4	4	1	14	0	133	39
Великобритания	358	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	262	3	7	3	10	21	3	147	13
Австралия	224	2	8	3	4	19	0	11	6
...
Всего	16959	413	396	260	639	1268	123	3469	720

Таблица 12. Энергетические (ЭР) и исследовательские (ИР) реакторы в мире

Страна	Число ЭР	Число ИР	Всего
США	94	50	144
Франция	56	2	58
Китай	56	16	72
Россия	38	56	94
Корея	26	2	28
Индия	20	5	25
Канада	19	4	23
Украина	15	3	18
Япония	12	6	18
Великобритания	9	1	10
Испания	7	0	7
Чехия	6	4	10
Пакистан	6	2	8
Швеция	6	0	6
Всего в мире	417	229	646

Таблица 13. Число исследовательских, энергетических и промышленных реакторов в России в период 2007–2022 гг. [18–20, 28]

Типы ядерных реакторов	2007	2012	2017	2022
исследовательские	35	52	50	56
энергетические	76	92	71	89
Всего	111	144	121	145

ства электроэнергии и для теплоснабжения г. Библино (Чукотский автономный округ).

5. УСТАНОВКИ ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

Заслуживают внимания установки для термоядерного синтеза, предназначенные для решения одной из фундаментальных проблем цивилизации — возможности осуществления термоядерного синтеза в земных условиях. А как прямое следствие — решение важнейшей стратегической задачи — обеспечение человечества энергией на многие столетия и тысячелетия в будущем. Это токамаки, стеллараторы и геллиотроны, инерциальные установки, являющиеся ИИИ. Таких установок в мире 145, а информация о их распределении по странам представлена в табл. 14.

Физический принцип действия этих уникальных устройств и различия их между собой заключаются в следующем.

Токамак (тороидальная камера с магнитными катушками) — установка для магнитного удержания плазмы с целью достижения условий, необходимых для протекания управляемого термоядерного синтеза (УТС). В ней плазма удерживается не стенками камеры, которые не способны выдержать необходимую для термоядерных реакций температуру, а специально создаваемым ком-

бинированным магнитным полем — тороидальным внешним и полем тока, протекающего по плазменному шнуру. Использование электрического тока для разогрева и удержания плазменного шнура — главная особенность токамака.

Принципиальное отличие стелларатора, второго подхода к решению проблемы термоядерного синтеза, от токамака заключается в том, что магнитное поле для изоляции плазмы от внутренних стенок тороидальной камеры создается только внешними катушками. Создаваемое магнитное поле представляет систему замкнутых вложенных друг в друга тороидальных магнитных поверхностей. В инерциальной установке дейтерий-третиевая смесь сжимается пучками с разных сторон. Смесь разогревается равномерно, чтобы термоядерные реакции начались до разлета мишени. Этот подход — термоядерная спичка.

Усилия ученых России сосредоточены на развитии идеи токамака. Наша страна — в тройке ведущих стран мира по развитию термоядерных установок (отечественных 13). В США, Японии и Франции для задачи реализации УТС используют разные типы установок.

Таблица 14. Термоядерные установки в мире [53]

Страна	Общее число	Токамак	Стеллараторы, гелиотроны	Инерциальные	Альтернативные
США	36	8	6	4	18
Япония	25	13	3	2	7
Россия	13	7	—	—	6
Китай	11	9	1	—	1
Великобритания	9	6	—	2	1
Франция	5	2	1	1	1
Германия	4	1	2	1	—
Италия	4	2	—	—	—
Пакистан	4	4	—	—	—
Бразилия	3	3	—	—	—
Всего	145	77	17	11	40

6. ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ РАДИАЦИОННЫХ УСТАНОВОК В РОССИИ

Соотношение количества ИИИ, используемых в нашей стране, характеризуется следующими цифрами: рентгеновские — 46.1%, радионуклидные — 53.4%, высокотехнологичные (ускорители, реакторы и термоядерные установки) — 0.5%. Такое соотношение примерно соответствует мировым тенденциям.

Анализ сложившейся ситуации в России показывает следующее. Общее количество радиационных установок в народном хозяйстве страны в среднем за 15 лет возросло от 120 до 180 тыс. единиц (причем очень неравномерно год от года, но в среднем на 1–10% ежегодно). Количество рентгеновских приборов увеличилось с 43 до 79 тыс. (почти равномерно на 5.3–5.7 % ежегодно). Число радионуклидных источников и приборов выросло с 63 до 93 тыс. единиц (крайне неравномерно, временами уменьшаясь, но в среднем — увеличение на 3.2% ежегодно). Очевидно, происходит постоянное обновление радионуклидных источников и оборудования.

Особое положение занимают ускорители. Их число (причем как ускорителей электронов, так и протонов) выросло за этот период с 329 до 725 (в ~2.2 раза). Ускорители больше всего олицетворяют высокие технологии в экономике. Они сложны как в управлении, так и в обслуживании. Именно ускорители аккумулируют достижения науки и техники в разных областях и позволяют значительно продвинуть высокие радиационные технологии в различные области отечественного и мирового хозяйства.

Можно отметить некоторые успехи в применении радиационных технологий в промышленно-

сти, хотя до сих пор в промышленности реализовано относительно небольшое число проектов с использованием ИИИ.

К таким проектам относится, прежде всего, неразрушающий анализ материалов. Здесь широко используется и рентгеновская техника, и ускорители, и радиоактивные источники, причем отечественного производства. Быстро развивается создание новых досмотровых комплексов российского производства на разных типах источников. На базе рентгеновского излучения число таких комплексов значительно выросло за последние 15 лет с 1295 до 6738 (в 5.2 раза). Около 10 лет назад началось создание досмотровых установок на базе ускорителей электронов. Число таких отечественных досмотровых комплексов превысило 59.

Еще один проект — электронно-лучевая сварка, которая широко внедрена в высокотехнологичных отраслях (авиационной, космической, оборонной).

Большая часть радионуклидов, используемых в мировой экономике, производится в России. До сих пор не налажен полный замкнутый цикл отечественного производства радиофармпрепаратов, в результате чего конечный продукт возвращается в Россию в большинстве случаев из-за рубежа. Медленно развивается радиационная стерилизация биоимплантатов, медицинских изделий и обработка сельскохозяйственной продукции. По всему спектру радиационных технологий наша страна пока отстает от стран Евросоюза, США, Китая, Японии.

Задача технологической независимости нашего государства требует существенного увеличения темпов внедрения радиационных технологий в разные отрасли народного хозяйства.

В фундаментальной науке Россия на самых передовых позициях. В нашей стране три исследовательских комплекса на встречных пучках, лучшая в мире атомная промышленность с самыми передовыми технологиями. По установкам с синхротронным излучением, термоядерным комплексам Россия сегодня в десятке самых передовых стран мира. Наша страна — активный участник международного проекта по созданию экспериментальной установки для осуществления управляемого термоядерного синтеза.

Применение ускорителей в народном хозяйстве России заметно отличается от мирового, так что количество ускорителей, прежде всего в промышленности, необходимо увеличивать в несколько раз.

Создание собственных производств радиоактивных, рентгеновских приборов и установок у нас остается на удовлетворительном уровне, хотя многие производства либо закрылись в 1990-е—2000-е годы, либо существенно устарели.

Самая сложная ситуация в медицине. Несмотря на вполне удовлетворительное обеспечение высокотехнологичным терапевтическим и диагностическим оборудованием медицинских учреждений в среднем по России, обращает на себя внимание неравномерность его распределения по регионам. Кроме того, наиболее высокотехнологичные установки в нашей стране не производятся. В диагностическом оборудовании это относится к томографам (КТ, ОФЭКТ, ПЭТ, МРТ), а также к совмещенным томографическим системам ПЭТ/КТ, ПЭТ/КТ/ОФЭКТ, которые позволяют одновременно визуализировать и анализировать функциональные и морфологические характеристики тканей и органов.

Несмотря на то что работы по разработке и изготовлению некоторых видов томографов, медицинского ускорителя электронов “ОНИКС” ведутся предприятиями Росатома, необходимо уделить особое внимание на государственном уровне решению важнейшей общенациональной задачи — развитию производственных мощностей по выпуску высокотехнологичного промышленного и медицинского оборудования.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленном обзоре показано, что в России сохранились собственные многолетние традиции и успешный отечественный научно-технологический опыт создания, использования и развития радиационных технологий. Многие физические основы современных радиационных технологий, приборы и устройства первоначально

но разрабатывались в России, а затем внедрялись в мировую практику. В их создании участвовали научные и производственные коллективы учебных, научных и промышленных организаций страны при постоянной целенаправленной государственной поддержке.

Важно и сейчас, в это судьбоносное время стремиться не догонять, а упреждать появление в мире новых радиационных технологий. Потенциал российской науки и промышленности вполне достаточен для решения таких задач.

Крайне важно, чтобы современный уровень научно-технических разработок и оборудования, достигнутый в области радиационных технологий, стал не конечной целью, а базой для перспективных инновационных отечественных исследований и разработок. Именно это в результате приведет к технологическому суверенитету России, росту промышленного производства, обеспечению безопасности страны, благосостоянию народа и к укреплению позиций России в мировой науке и экономике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Plucker, Ann. Phys. Chem. **107**, 497 (1859).
2. W. C. Rontgen, Science **3**, 277 (1896).
3. H. Becquerel, Comptes Rendus. **122**, 420 (1896).
4. P. Curie and M. Sklodowska-Curie, Comptes Rendus. **127**, 175 (1898).
5. Л. И. Золотинкина. *С. Попов в Санкт-Петербурге и в Кронштадте: Путеводитель* (СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, 2008).
6. R. Zimmermann, *Nuclear Medicine: Radioactivity for Diagnosis and Therapy* (EDP Sciences, 2007).
7. A. G. Bell and Z. T. Sowers, Nature **68**, 320 (1903).
8. E. Rutherford, Science **50**, 467 (1919).
9. H. Greinacher, Z. Phys. **4**, 195 (1921).
10. R. Wideroe, Archiv fur Elektrotechnik **21**, 387 (1928).
11. J. D. Cockcroft and E.T.S. Walton, Proc. Roy. Soc. London Ser. A **136**, 619 (1932).
12. R. J. Van de Graaff, Phys. Rev. **38**, 1919 (1931).
13. E. O. Lawrence and M. S. Livingston, Phys. Rev. **40**, 19 (1932).
14. А. П. Черняев, ЭЧАЯ **43**, 500 (2012) [Phys. Part. Nucl. **43**, 262 (2012)].
15. А. П. Черняев, С. М. Варзарь, ЯФ **77**, 1 (2014) [Phys. At. Nucl. **77**, 1203 (2014)].
16. А. П. Черняев, С. М. Варзарь, А. В. Белоусов, М. В. Желтоножская, Е. Н. Лыкова, ЯФ **82**, 425 (2019) [Phys. At. Nucl. **82**, 513 (2019)].
17. А. П. Черняев, Е. Н. Лыкова, Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. № 1, 1 (2023) [Mosc. Univ. Phys. Bull. **1**, 1 (2023)].
18. А. А. Горский, И. Г. Шевкун, *Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2022 год* (Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, Москва, 2023).

19. А. А. Горский, *Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2012 год* (Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, Москва, 2013).
20. А. А. Горский, *Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2007 год* (Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, Москва, 2008).
21. А. А. Горский, *Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2008 год* (Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, Москва, 2009).
22. А. А. Горский, *Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2009 год* (Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, Москва, 2010).
23. А. А. Горский, *Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2010 год* (Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, Москва, 2011).
24. А. А. Горский, *Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2011 год* (Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, Москва, 2012).
25. А. А. Горский, *Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2013 год* (Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, Москва, 2014).
26. А. Ю. Попова, *Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2014 год* (Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, Москва, 2015).
27. И. Г. Шевкун, *Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2015 год* (Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, 2016).
28. И. Г. Шевкун, *Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2016 год* (Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, 2017).
29. И. Г. Шевкун, *Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2017 год* (Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, 2018).
30. И. Г. Шевкун, *Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2018 год* (Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, 2019).
31. И. Г. Шевкун, *Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2019 год* (Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, 2020).
32. И. Г. Шевкун, *Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2020 год* (Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Москва, 2021).
33. И. Г. Шевкун, *Результаты радиационно-гигиенической паспортизации в субъектах Российской Федерации за 2021 год* (Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, Москва, 2022).
34. О. Обухова, *Подходы к оценке эффективности использования медицинского оборудования на примере аппаратов для маммографии* (ФГБУ «ЦНИИОИЗ» Минздрава России, Москва, 2022).
35. M. V. Zheltonozhskaya, V. A. Zheltonozhsky, E. N. Lykova, A. P. Chernyaev, and V. N. Iatsenko, Nucl. Instrum. Methods B **470**, 38 (2020).
36. V. A. Zheltonozhsky, A. M. Savrasov, M. V. Zheltonozhskaya, and A. P. Chernyaev, Nucl. Instrum. Methods B **476**, 68 (2020).
37. М. В. Желтоножская, П. Д. Ремизов, А. П. Черняев, В. Н. Яценко, С. Л. Бурцев, Письма в ЭЧАЯ **20**, 1471 (2023) [Phys. Part. Nucl. Lett. **20**, 1433 (2023)].
38. IAEA 2024 IMAGINE — IAEA Medical Imaging and Nuclear Medicine Global Resources Database, <https://humanhealth.iaea.org/HHW/DBStatistics/IMAGINEMaps.html>
39. Rosatom 2023, <https://www.rosatom.ru/journalist/smi-about-industry/yadernye-tehnologii-na-strazhe-zdorovya-rossiyan/>
40. 2022 Pet-uu, <https://pet-uu.ru/obespechenie-dostupnosti-pet-kt-diagnosticski-v-rossii/>
41. IAEA 2024 Accelerator Knowledge Portal, <https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/Interactive-Map-of-Accelerators.aspx>
42. Elekta 2024, <https://www.elekta.com>
43. IAEA 2024 Directory of RAdiotherapy Centres (DIRAC), <https://dirac.iaea.org>
44. V. Shiltsev and F. Zimmermann, Rev. Mod. Phys. **93**, 015006 (2021).
45. В. Д. Шильцев и др., УФН **182**, 10 (2012) [Phys. Usp. **55**, 965 (2012)].
46. Н. С. Андреева, *Радиационные технологии: взгляд из России* (Ассоциация радтех, Москва, 2015).
47. Accuray 2024 CyberKnife, <https://cyberknife.com/>
48. Accuray 2024 Accuray, <https://www accuray.com>
49. J. S. Vaidya, U. J. Vaidya, M. Baum, M. K. Bulsara, D. Joseph, and J. S. Tobias, Front. Oncol. **12**, 786515 (2022).
50. IAEA 2024 Research Reactor Database (RRDB), <https://nucleus.iaea.org/rrdb/#/home>
51. IAEA 2024 Power Reactor Information System (PRIS), <https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>
52. IAEA 2024 Country Nuclear Power Profiles (CNPP), <https://cnpp.iaea.org/public/>
53. IAEA 2024 Fusion Device Information System (FusDIS), <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspxBr>

CURRENT STATE AND PROSPECTS OF USING IONIZING RADIATION SOURCES IN RUSSIA

© 2025 A. P. Chernyaev^{1),2)}, A. A. Kim^{1),2)}, V. V. Rozanov^{1),2)},
F. R. Studenikin^{1),2)}, A. A. Shcherbakov^{1),2)}

¹⁾Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University, Russia

²⁾Faculty of Physics Lomonosov Moscow State University, Russia

An analysis of the status and use of various types of ionizing radiation sources in science and industries of the national economy of Russia for 15 (2007–2022) years is presented. The review is based on objective data from scientific journals, printed/online sources of the IAEA and some governmental structures of our country. Availability and use of ionizing radiation sources in Russia and in the world are compared. The state and prospects of application of installations based on ionizing radiations both in fundamental science and in industry, agriculture and medicine are considered. The correlation of high-tech installations and devices is studied: accelerators (on counter beams, high, medium and low energies), reactors (power, industrial and research), thermonuclear installations, X-ray equipment, isotope devices and instruments. Trends of application of ionizing radiation sources in science and economy of Russia are studied. Effective measures to create conditions for technological independence of our country's economy are proposed.