

УДК 537.533.9

DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.12>

Оригинальная статья / Original paper

Мощные промышленные ускорители электронов типа ИЛУ – применение в исследованиях и промышленности

В.В. Безуглов¹, А.А. Брызгин¹, Л.А. Воронин¹, М.В. Коробейников¹, М.А. Михайленко²,
А.В. Сидоров¹, В.О. Ткаченко¹, Е.А. Штарклев¹

¹ Институт ядерной физики СО РАН,
630090, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 11

² Институт химии твердого тела и механохимии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, ул. Кутателадзе, 18

Реферат. Институт ядерной физики Сибирского отделения Российской Академии наук (ИЯФ) проводит фундаментальные исследования и традиционно решает важные для страны задачи в соответствии с национальными целями и приоритетами. Десятки разработанных и изготовленных в ИЯФ мощных высокочастотных импульсных линейных ускорителей электронов типа ИЛУ применяются в исследовательских организациях и промышленных предприятиях России и других стран на протяжении десятилетий. В настоящее время выпускаются ускорители ИЛУ-8 с диапазоном энергии 0,8 – 1 МэВ и мощностью пучка до 20 кВт, ИЛУ-10 с диапазоном энергии 3 – 5 МэВ и мощностью до 50 кВт, ИЛУ-12 с диапазоном энергии 5 – 7,5 МэВ и мощностью пучка до 60 кВт и ИЛУ-14 с диапазоном энергии 7,5 – 10 МэВ и мощностью пучка до 100 кВт. На ускорителях ИЛУ в ИЯФ совместно с Институтом химии твердого тела и механохимии СО РАН, Институтом катализа СО РАН, Институтом цитологии и генетики СО РАН, Томским политехническим университетом, Всероссийским научно-исследовательским институтом радиологии и агроэкологии (ВНИИРАЭ, г. Обнинск) и другими исследовательскими организациями ведутся исследования взаимодействия интенсивных электронных пучков с различными веществами, материалами и химическими соединениями. Эти исследования позволили разработать и отработать радиационные процессы, которые впоследствии стали широко использоваться в промышленности. ИЯФ постоянно взаимодействует с Госкорпорацией «Росатом» и его дочерней структурой «Технологии здоровья». В настоящее время совместно с ними готовится к поставке в Ташкент ускоритель ИЛУ-12.

Ключевые слова: высокочастотные импульсные линейные ускорители электронов, ИЛУ, интенсивный электронный пучок, тормозное излучение, радиационная обработка, радиационная модификация, радиационная стерилизация.

Для цитирования: Безуглов В.В., Брызгин А.А., Воронин Л.А., Коробейников М.В., Михайленко М.А., Сидоров А.В., Ткаченко В.О., Штарклев Е.А. Мощные промышленные ускорители электронов типа ИЛУ - применение в исследованиях и промышленности. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2025;1:164–174. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.12>

Введение

Институт ядерной физики Сибирского отделения Российской Академии наук (ИЯФ СО РАН) всегда решал проблемы народного хозяйства. Десятки разработанных и изготовленных в ИЯФ мощных высокочастотных импульсных линейных ускорителей электронов типа ИЛУ работают в исследовательских организациях и на промышленных предприятиях России и других стран [1]. ИЯФ признан МАГАТЭ одним из немногих в мире надежных поставщиков мощных промышленных ускорителей электронов [2].

В 90-е годы XX века в нашей стране возникала потребность в радиационной стерилизации одноразовых шприцев, и поставленный на АО «Аксион» (город Ижевск) ускоритель ИЛУ-6 обеспечил стерилизацию производимых одноразовых шприцев в потребительской таре на потоке.

Последовавший рост производства и потребления одноразовых медицинских изделий потребовал увеличения энергии и мощности ускорителей, и в ИЯФ был разработан ускоритель ИЛУ-10 с энергией до 5 МэВ и мощностью пучка до 50 кВт. Более десятка таких ускорителей изготовлены и поставлены на настоящий момент.

Во многих странах мира радиационная обработка пищевых продуктов применяется для снижений потерь и продления срока хранения. Для облучения используются изотопные источники и мощные ускорители электронов, обрабатывающие упакованные продукты электронным пучком или тормозным излучением.

Промышленная обработка пищевых продуктов вызвала потребность в дальнейшем увеличении энергии и мощности ускорителей, и были разработаны ускорители ИЛУ-12 с диапазоном энергии 5–7,5 МэВ и мощностью пучка до 60 кВт и ИЛУ-14 с диапазоном энергии 7,5–10 МэВ и мощностью пучка до 100 кВт.

Самовозбуждающиеся высокочастотные (ВЧ) генераторы всех ускорителей ИЛУ работают на мощных импульсных триодах ГИ-50А с импульсной мощностью до 2 МВт. Благодаря режиму самовозбуждения генерация ВЧ-мощности происходит стабильно при вариациях температуры охлаждающей воды в пределах 10–20°C в отличие от других высокочастотных ускорителей, требующих стабилизации температуры охлаждающей воды с точностью до десятых долей градуса. Для производственных процессов важно, что ускорители ИЛУ очень быстро выходят на рабочий режим после запуска – сразу после прогрева накалов ламп и инжектора, в то время как у большинства высокочастотных ускорителей время выхода на режим – от 30 минут до двух часов. В таблице 1 перечислены ускорители типа ИЛУ, поставленные для обработки медицинских изделий и пищевой продукции.

Промышленная радиационная обработка

Повышение энергии электронов в пучке увеличивает глубину проникновения, что позволяет облучать продукцию в больших упаковках. При энергии электронов свыше 10 МэВ резко возрастает количество активируемых изотопов, поэтому МАГАТЭ установлена максимальная энергия электронов 10 МэВ для промышленной радиационной обработки.

Из изотопов с порогами фотоядерных реакций менее 10 МэВ в медицинских изделиях и пищевых продуктах могут оказаться только ^{13}C , ^{25}Mg , ^{29}Si и ^{57}Fe , но их процентное

Таблица 1

Поставки ускорителей ИЛУ для обработки медицинских изделий и пищевой продукции

Ускоритель	Назначение	Место установки	Год начала работы
ИЛУ-6	Стерилизация одноразовых шприцев	Россия, Ижевск, Аксион	1994
ИЛУ-10	Облучение пищевых продуктов	США, Чикаго, Surebeam Corp.	2001
ИЛУ-10	Исследования, стерилизация медицинских изделий	Россия, Новосибирск, ИЯФ	2001
ИЛУ-6	Обеззараживание растительного лекарственного сырья	Россия, Бийск, Эвалар	2007
ИЛУ-10, 2 ускорителя	Стерилизация медицинских изделий и обеззараживание растительного лекарственного сырья	Россия, Биотехнопарк Кольцово, Новосибирский район, SFM (Scientific Future Management)	2013
ИЛУ-10	Стерилизация медицинских изделий	Казахстан, Курчатов, Парк ядерных технологий	2013
ИЛУ-10М	Исследования, обработка алмазов, облучение пищевых продуктов	Индия, Мумбай, BARC	2014
ИЛУ-14	Исследования и стерилизация медицинских изделий	Россия, Москва, ФМБЦ имени А.И. Бурназяна	2014
ИЛУ-10	Исследования и стерилизация медицинских изделий	Россия, Новосибирск, ИЯФ	2014
ИЛУ-10	Исследования и облучение пищевых продуктов	Республика Корея, университет Йонгсама и EbTech	2017
ИЛУ-10	Исследования и стерилизация медицинских изделий	Казахстан, Алматы, Институт ядерной физики	2018
ИЛУ-14	Облучение пищевых продуктов	Вьетнам, Хошимин	2025
ИЛУ-12	Облучение пищевых продуктов	Узбекистан	2025

содержание настолько мало, что даже их активация после обработки не приводит к увеличению изначального радиационного фона продукции.

Работа в режиме генерации тормозного излучения позволяет увеличить глубину проникновения до 30 г/см² (электронный пучок с энергией 5 МэВ обеспечивает 4 г/см² при двухстороннем облучении), но существенно снижает энергетическую эффективность [3].

В большинстве стран мира верхний порог энергии электронного пучка, используемого для генерации тормозного излучения, равен 5 МэВ. Эффективность генерации тормозного излучения и глубина его проникновения прямо пропорциональны энергии электронного пучка. Убедившись в безопасности увеличения этой энергии до 7,5 МэВ для широкого круга продукции, США в 2000 г. повысили этот порог до 7,5 МэВ. Следом за ними повысили этот порог Канада, Индия, Индонезия и Южная Корея. В 2024 г. повысили порог до 7,5 МэВ Австралия и Новая Зеландия. Все эти страны активно используют ускорители и изотопные источники для обработки пищевой продукции.

Поскольку материалом мишени для генерации тормозного излучения, в основном, является тантал, а у ¹⁸¹Ta порог фотоядерной реакции 7,6 МэВ, дальнейшее повышение

порога энергии электронного пучка для генерации тормозного излучения пока не предвидится.

Исходя из вышесказанного, ИЯФ принял решения разработать ускоритель ИЛУ-12 с диапазоном энергии 5–7,5 МэВ для возможности поставки в страны, где остается порог энергии 5 МэВ, но в случае повышения порога до энергии 7,5 МэВ этот ускоритель останется востребованным. А ускоритель ИЛУ-14 с диапазоном энергии 7,5–10 МэВ может быть сразу поставлен в те страны, в которых уже повышен порог энергии электронного пучка для генерации тормозного излучения до 7,5 МэВ. Работающий ускоритель ИЛУ-12 впоследствии может быть модернизирован до ИЛУ-14, так как большинство их узлов унифицированы.

Ускоритель ИЛУ-10

На рисунке 1 показан ускоритель ИЛУ-10, работающий в Биотехнопарке наукограда Кольцово Новосибирской области. Это однорезонаторная машина с вертикальным выпуском пучка. Его диапазон энергии 4–5 МэВ, максимальная мощность пучка 50 кВт, он может работать с конвертером для генерации тормозного излучения. Три таких ускорителя в Новосибирске – в ИЯФ и в Биотехнопарке наукограда Кольцово – обеспечивают потребности в радиационной обработке одноразовой медицинской продукции и растительного сырья в Сибирском федеральном округе.

Благодаря поддержке ИЯФ (гарантировавшего радиационную стерилизацию будущей продукции на ускорителе ИЛУ-10) компания «Здравмедтех» развернула производство одноразового медицинского белья в Новосибирской области. Впоследствии и другие производители развернули производство медицинского белья и стали обрабатывать свою продукцию в ИЯФ, а затем и в Биотехнопарке. В настоящее время Новосибирская область и соседние регионы обеспечивают себя собственными одноразовыми медицинскими изделиями.

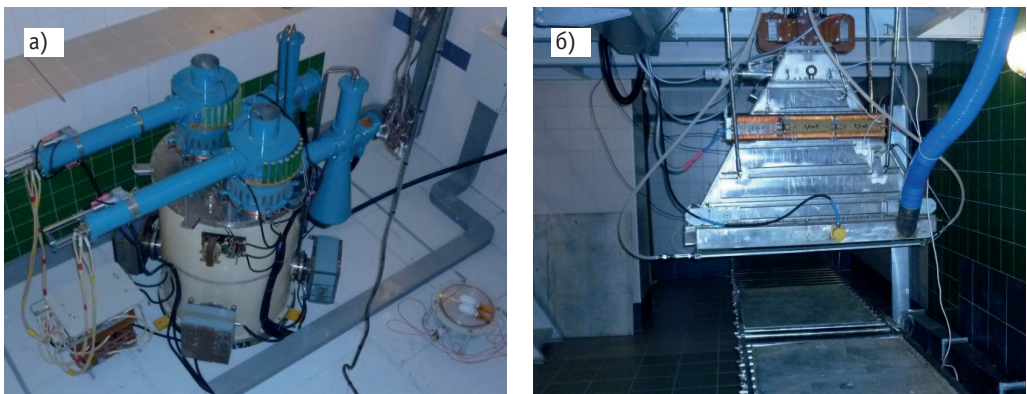


Рис. 1. Ускоритель ИЛУ-10 (а), работающий в Биотехнопарке наукограда Кольцово, и его выпускное устройство (б) над конвейером для обрабатываемой продукции

Ускоритель ИЛУ-14

Ускоритель ИЛУ-10 показал, что энергия 5 МэВ является пределом для однорезонаторной машины вследствие потерь в резонаторе, которые растут пропорционально квадрату энергии. Ускорители ИЛУ-12 с диапазоном энергии 5–7,5 МэВ и ИЛУ-14 с диапазоном энергии 7,5–10 МэВ используют многорезонаторную ускоряющую структуру с горизонтальным направлением электронного пучка.

На рисунке 2а) показана ускоряющая структура ускорителя ИЛУ-14, с 2014 г. успешно работающего в Федеральном медицинском биофизическом центре имени А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва. На рисунке 2б) показан 3-Д-образ изготовленного для Вьетнама ускорителя ИЛУ-14 – ускоряющая структура, двухкаскадный ВЧ-генератор и выпускная система. В ноябре 2024 г. начаты наладочные работы в ИЯФ, их завершение и приемка ускорителя заказчиком запланированы на 2025 г.

В 2025 г. ИЯФ по контракту запускает в г. Хошимин (Вьетнам) ускоритель ИЛУ-14 с диапазоном энергии 7,5–10 МэВ и максимальной мощностью пучка 100 кВт с конвертером для генерации тормозного излучения. Заказчиком является компания Anh Duong Irradiation Technology Joint Stock Company; обрабатывать планируется, главным образом, пищевые продукты, предназначенные для экспорта в страны, где для генерации тормозного излучения разрешена энергия электронного пучка до 7,5 МэВ. Продукты будут обрабатываться упакованными на европаллетах.

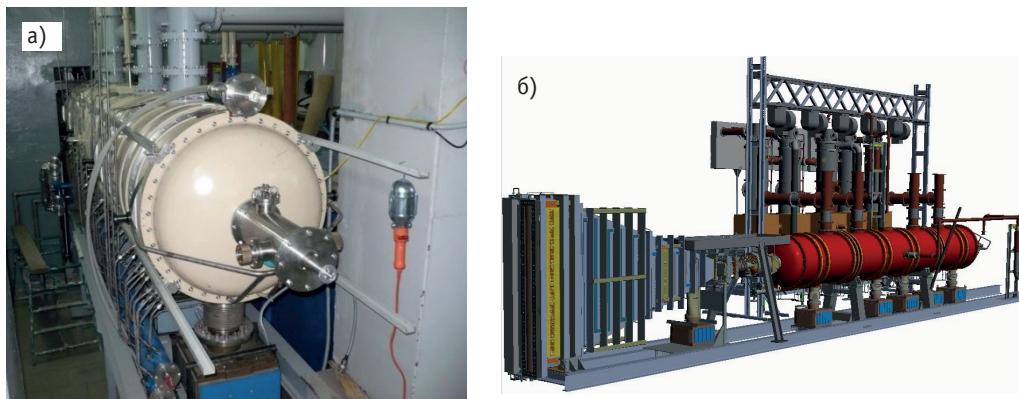


Рис. 2. Ускоритель ИЛУ-14: а) ускоряющая структура; б) 3-Д-образ

Производительность ускорителей ИЛУ

Типичные дозы для различных процессов облучения [2]

- Предотвращение прорастания семян 0,1–0,2 кГр (0,01–0,02 Мрад)
- Дезинсекция 0,3–0,5 кГр (0,03–0,05 Мрад)
- Подавление развития паразитов 0,3–0,5 кГр (0,03–0,05 Мрад)
- Задержка созревания фруктов 0,5–1,0 кГр (0,05–0,1 Мрад)
- Подавление плесеней 1,5–3,0 кГр (0,15–0,3 Мрад)
- Подавление бактерий 1,5–3,0 кГр (0,15–0,3 Мрад)
- Стерилизация 15–30 кГр (1,5–3 Мрад)
- Полимеризация 25–50 кГр (2,5–5 Мрад)

- Сополимеризация полимеров (графтинг) 25–50 кГр (2,5–5 Мрад)
- Сшивание полимеров 50–250 кГр (5–25 Мрад)
- Деградация полимеров 500–1500 кГр (50–150 Мрад)

В таблице 2 приведены параметры ускорителей ИЛУ-10, ИЛУ-12 и ИЛУ-14, глубины обработки и производительность при облучении дозой 1 кГр.

Таблица 2

Параметры и производительность ускорителей ИЛУ

Ускоритель	Энергия и мощность пучка	Глубина обработки		Производительность для дозы 1 кГр	
		Электронный пучок	Тормозное излучение	Электронный пучок	Тормозное излучение
ИЛУ-10	5 МэВ, 50 кВт	4 г/см ²	30 г/см ²	90 т/час	4,5 т/час
ИЛУ-12	5 – 7,5 МэВ, 60 кВт	6 г/см ²	30 г/см ²	108 т/час	5,4 т/час
ИЛУ-14	7,5 – 10 МэВ, 100 кВт	8 г/см ²	30 г/см ²	180 т/час	9 т/час

Радиационная обработка осуществляется ускорителями электронов и изотопными источниками. Эффект радиационной обработки не зависит от энергии электронного пучка вплоть до порога фотоядерных реакций, так как основное воздействие на вещество оказывают вторичные электроны, которых в десятки тысяч раз больше, чем первоначальных электронов пучка или гамма-квантов.

Повышение энергии электронного пучка позволяет обрабатывать продукцию в крупной упаковке, что экономически более эффективно. Использование тормозного излучения позволяет облучать продукцию в транспортной таре, на паллетах, что упрощает перемещение продукции внутри производственных помещений и уменьшает затраты на логистику – не требуется переупаковка продукции.

Исследования в ИЯФ

На ускорителе ИЛУ-6 в ИЯФ постоянно проводится радиационная обработка различных образцов. Основные направления работы: стерилизация и деконтаминация медицинской продукции, обработка пищевой и сельскохозяйственной продукции, исследование радиационной стойкости материалов, облучение биологических объектов, модификация органических соединений, в том числе энергонасыщенных, радиационная инициация полимеризации, радиационно-термическое воздействие на органические и неорганические соединения. На этой установке были отработаны процессы стерилизации имплантатов позвоночных дисков и радиационной модификации матриц для имплантатов кровеносных сосудов [4].

Совместно с Лабораторией болезней птиц Сибирского федерального научного центра агробιοтехнологий РАН (СФНЦА РАН) проведены работы по электронно-лучевой обработке ингредиентов кормовых смесей для птиц с целью увеличения срока годности продуктов северного завоза.

Обработка дозой 4 кГр и выше приводила к существенному снижению обсеменности ингредиентов комбикормов и повышению сроков хранения. Колиформы в образцах не были обнаружены при дозах свыше 12 кГр. Споровые формы микроорганизмов переживают обработку дозой 12 кГр.

Радиационная обработка может быть использована для продления срока хранения и уменьшения потерь при хранении, так как полезные (питательные) свойства ингредиентов при таких дозах не изменяются. Электронно-лучевая обработка также потенциально может быть использована для обработки партий ингредиентов комбикормов с уровнем обсемененности выше нормы для последующего использования и продления сроков хранения, что позволит снизить потери сырья в процессе переработки.

Совместно с Всероссийским научно-исследовательским институтом радиологии и агроэкологии (ВНИИРАЭ, г. Обнинск) проведены исследования последствий радиационной обработки картофеля и рыбных пресервов. Показаны увеличение сроков хранения и уменьшение потерь в процессе хранения [5, 6].

Эти работы важны для обеспечения продовольственной безопасности России.

Проведена серия экспериментов по облучению лабораторных мышей дозой 9 Гр (смертельной для мышей) с целью проверки эффективности действия разработанного в Институте цитологии и генетики СО РАН нового радиопротекторного препарата на основе двухцепочечной РНК. Исследования подтвердили эффективность препарата [7, 8]. Перспективы использования препарата – обеспечение защиты работающих в опасных зонах людей и возможное облегчение лечения пациентов, подвергаемых радиотерапии.

Совместно с Томским политехническим университетом и Институтом химии твердого тела и механохимии СО РАН проводилась разработка процесса радиационно-термического синтеза ферритов [9]. После оптимизации условий синтеза была установлена скорость нагрева 100°C/мин; это стало возможно благодаря объемному выделению тепла в образцах. Продолжительность процесса синтеза удалось сократить до 10–15 мин. (вместо десятков часов в традиционном термическом процессе). Результаты рентгеноструктурных исследований на станциях синхротронного излучения показали полное отсутствие исходных фаз оксидов в синтезированных ферритах.

Совместно с Институтом катализа СО РАН ведется разработка оксидных и композитных материалов для водородной энергетики, мембран для селективного выделения кислорода или водорода и твердооксидных топливных элементов. Показана эффективность радиационно-термического спекания нанесенных функциональных слоев [10, 11].

Заключение

Проведенные и проводимые в ИЯФ исследовательские работы обогатили знания о процессах взаимодействия интенсивного электронного пучка с различными материалами и внесли существенный вклад в развитие нашей страны. Десятки разработанных и изготовленных в ИЯФ ускорителей типа ИЛУ работают в промышленности. Многие промышленные радиационные процессы были сначала отработаны на ускорителях ИЛУ, в частности, радиационная модификация изоляции проводов и кабелей, радиационный синтез лекарственных средств, стерилизация различных медицинских изделий, в том числе имплантатов позвоночных дисков, обеззараживание растительного лекарственного сырья, обеззараживание комбикормов и их компонентов, холодная пастеризация пищевых продуктов.

В настоящее время в мире широко используется радиационная обработка пищевой продукции. В России, в отличие от множества других стран, в настоящее время для этого отсутствует законодательная база. Создание такой базы откроет новый обширный рынок в России, уменьшит потери пищевой продукции и повысит пищевую и эпидемиологическую безопасность нашей страны.

Литература

1. Брызгин А.А., Куксанов Н.К., Салимов Р.А. Ускорители электронов для промышленного применения, разработанные в ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН. *Успехи физических наук*. 2018;188(6):672–685. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.03.038344>
2. Промышленная радиационная обработка электронными пучками и тормозным излучением. 2011. Технический документ Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ). URL: <https://www.irradiationpanel.org/app/download/3792773/IAEA+Guide+Industrial+Radiation+Processing+2011.pdf> (дата обращения 20.02.2025).
3. Пикаев А.К. Современная радиационная химия. Том 1. Основные положения. Экспериментальная техника и методы. М.: Наука, 1985, 376 с.
4. Chernonosova V.S., Kuzmin E.I., Shundrina I.K., Korobeynikov M.V., Golyshev V.M., Chelobanov B.P., Laktionov P.P. Effect of Sterilization Methods on Electrospun Scaffolds Produced from Blend of Polyurethane with Gelatin. *Journal of Functional Biomaterials*. 2023;14(2):70. DOI: <https://doi.org/10.3390/jfb14020070>
5. Цыгвинцев П.Н. Торможение физиологических процессов в клубнях картофеля после облучения. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2018;11(2):341–346. DOI: <https://doi.org/10.17513/mjpf.12502>
6. Полякова И.В., Кобялко В.О., Саруханов В.Я., Козьмин Г.В., Фролова Н.А., Лыков И.Н., Воронин Л.А. Исследование эффективности холодной стерилизации рыбных пресервов электронным излучением в зависимости от дозиметрических параметров облучения. *Радиация и риск*. 2017;26(2):97–106. DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2017-26-2-97-106>
7. Ritter G.S., Nikolin V.P., Popova N.A., Proskurina A.S., Kisaretova P.E., Taranov O.S., Dubatolova T.D., Dolgova E.V., Potter E.A., Kirikovich S.S., Efremov Ya.R., Bayborodin S.I., Romanenko M.V., Meschaninova M.I., Venyaminova A.G., Kolchanov N.A., Shurdov M.A., Bogachev S.S. Characterization of biological peculiarities of the radioprotective activity of double-stranded RNA isolated from *Saccharomyces cerevisiae*. *Int. J. of Radiation Biology*. 2020;96(9):1173–1191. DOI: <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1793020>
8. Ritter G.S., Proskurina A.S., Meschaninova M.I., Potter E.A., Petrova D.D., Ruzanova V.S., Dolgova E.V., Kirikovich S.S., Levites E.V., Efremov Ya.R., Nikolin V.P., Popova N.A., Venyaminova A.G., Taranov O.S., Ostanin A.A., Chernykh E.R., Kolchanov N.A., Bogachev S.S. Impact of Double-Stranded RNA Internalization on Hematopoietic Progenitors and Krebs-2 Cells and Mechanism. *Int. J. of Molecular Sciences*. 2023;24(5):4858. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms24054858>
9. Lysenko E.N., Vlasov V.A., Nikolaev E.V., Surzhikov A.P., Korobeynikov M.V. Microstructure and magnetization study of Li and Li-Zn ferrites synthesized by an electron beam. *Materials Chemistry and Physics*. 2023;302:127722. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127722>
10. Bepalko Yu., Ereemeev N., Sadovskaya E., Krieger T., Bulavchenko O., Suprun E., Mikhailenko M., Korobeynikov M., Sadykov V. Synthesis and Oxygen Mobility of Bismuth Cerates and Titanates with Pyrochlore Structure. *Membranes*. 2023;13:598. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes13060598>
11. Sadykov V.A., Sadovskaya E.M., Bepalko Yu.N., Smal' E.A., Ereemeev N.F., Prosvirin I.P., Bulavchenko O.A., Mikhailenko M.A., Korobeynikov M.V. Structural, surface and oxygen transport properties of Sm-doped Nd nickelates. *Solid State Ionics*. 2024;412:116596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2024.116596>

Поступила в редакцию 08.11.2024

После доработки 25.02.2025

Принята к опубликованию 10.03.2025

Авторы

Безуглов Вадим Викторович, научный сотрудник,

E-mail: bezuglow@rambler.ru

Брызгин Александр Альбертович, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией, к.т.н.,

E-mail: A.A.Bryazgin@inp.nsk.su

Воронин Леонид Александрович, старший научный сотрудник, к.т.н.,

E-mail: nphialex@mail.ru

Коробейников Михаил Васильевич, старший научный сотрудник, к.т.н.,

E-mail: mkor4@rambler.ru

Михайленко Михаил Александрович, старший научный сотрудник, к.х.н.,

E-mail: mikhailenko@solid.nsc.ru

Сидоров Алексей Вениаминович, научный сотрудник,

E-mail: asidor@bk.ru

Ткаченко Вадим Олегович, старший научный сотрудник, к.т.н.,

E-mail: vtkachen@mail.ru

Штарклев Евгений Андреевич научный сотрудник,

E-mail: shtarklev@gmail.com

UDC 537.533.9

Powerful Industrial Electron Accelerators Type ILU – Applications in Studies and in Industry

**Bezuglov V.V.¹, Bryazgin A.A.¹, Voronin L.A.¹, Korobeynikov M.V.¹, Mikhailenko M.A.²,
Sidorov A.V.¹, Tkachenko V.O.¹, Shtarklev E.A.¹**

¹ Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS,

11 Academician Lavrentyev Av., 630090 Novosibirsk, Russia

² Institute of Solid Stat Chemistry and Mechanochemistry SB RAS,

11 Kutateladze St., 630090 Novosibirsk, Russia

Abstract

Budker Institute of Nuclear Physics (BINP), Siberian Branch of Russian Academy of Science, is carrying out fundamental studies and simultaneously is solving problems that are important for Russia. Tens of powerful radio frequency (RF) pulse linear accelerators type ILU designed and produced in BINP are working for decades in research organizations and industrial enterprises in Russia and abroad.

Now BINP is producing ILU-8 machine with energy range 0.8–1 MeV and beam power up to 20 kW, ILU-10 with energy range 3–5 MeV and beam power up to 50 kW, ILU-12 with energy range 5–7.5 MeV and beam power up to 60 kW and ILU-14 with energy range 7.5–10 MeV and beam power up to 100 kW. ILU-10, ILU-12 and ILU-14 can be supplied with converters for X-rays generation.

Medical products are treated by ILU-10 and ILU-14 machines in electron beam or X-ray modes. ILU-8 machines are used for production of heatshrinkable films and tubes and modification of wire polymer insulation.

An interaction of intensive electron beams with various matters, materials and chemical compounds is investigated on the ILU electron accelerators in BINP. These studies are being carried out in collaboration with Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry SB RAS, Institute of Catalysis SB RAS, Institute of Cytology and Genetics SB RAS, Tomsk Polytechnical University, Russian Institute of Radiology and Agroecology of National Research Centre "Kurchatov Institute" (NRC "Kurchatov Institute" – RIRAE) and other research organizations. These studies permitted to develop and work out radiation treatment processes that later were widely introduced in industry.

Currently BINP is preparing together with State Corporation "Rosatom" and its subsidiary structure "Health Technologies" for ILU-12 delivery to Tashkent.

Keywords: powerful radio frequency (RF) pulse linear accelerators, ILU, intensive electron beam, braking radiation, radiation treatment, radiation modification, radiation sterilization, radiation technologies.

For citation: Bezuglov V.V., Bryazgin A.A., Voronin L.A., Korobeynikov M.V., Mikhailenko M.A., Sidorov A.V., Tkachenko V.O., Shtarklev E.A. Powerful Industrial Electron Accelerators Type ILU – Applications In Studies And In Industry. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2025;1:164–174. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2025.1.12> (in Russian).

References

1. Bryazgin A.A., Kuksanov N.K., Salimov R.A. Industrial electron accelerators developed at the Budker Institute of Nuclear Physics, SB RAS (BINP). *Physics Uspekhi*. 2018;61(6):601–612. DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.03.038344>
2. Industrial Radiation Processing With Electron Beams and X-rays. 2011. International Atomic energy Agency technical document. URL: <https://www.irradiationpanel.org/app/download/3792773/IAEA+Guide+Industrial+Radiation+Processing+2011.pdf> (accessed Feb. 25, 2025).
3. Pikaev A.K. Modern Radiation Chemistry. Vol. 1. Main Provisions, Experimental technique and methods. Moscow, Nauka, 1985, 376 p. (in Russian).
4. Chernonosova V.S., Kuzmin E.I., Shundrina I.K., Korobeynikov M.V., Golyshev V.M., Chelobanov B.P., Laktionov P.P. Effect of Sterilization Methods on Electrospun Scaffolds Produced from Blend of Polyurethane with Gelatin. *Journal of Functional Biomaterials*. 2023;14(2):70. DOI: <https://doi.org/10.3390/jfb14020070>
5. Tsygvintsev P.N. Inhibition of Physiological Processes in Potato Tubers After Irradiation. *Int. J. Applied and Fundamental Studies*. 2018;11(2):341–346. DOI: <https://doi.org/10.17513/mjpf.12502>
6. Polyakova I.V., Kobyalko V.O., Sarukhanov V.Ya., Koz'min G.V., Frolova N.A., Lykov I.N., Voronin L.A. An Effectiveness Study of Preserved Fish by Electron Beam Cold Sterilization Depending on Irradiation Dosimetric Parameters. *Radiation and Risk*. 2017;26(2):97–106. DOI: <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2017-26-2-97-106> (in Russian).
7. Ritter G.S., Nikolin V.P., Popova N.A., Proskurina A.S., Kisaretova P.E., Taranov O.S., Dubatolova T.D., Dolgova E.V., Potter E.A., Kirikovich S.S., Efremov Ya.R., Bayborodin S.I., Romanenko M.V., Meschaninova M.I., Venyaminova A.G., Kolchanov N.A., Shurdov M.A., Bogachev S.S. Characterization of biological peculiarities of the radioprotective activity of double-stranded RNA isolated from *Saccharomyces cerevisiae*. *Int. J. of Radiation Biology*. 2020;96(9):1173–1191. DOI: <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1793020>
8. Ritter G.S., Proskurina A.S., Meschaninova M.I., Potter E.A., Petrova D.D., Ruzanova V.S., Dolgova E.V., Kirikovich S.S., Levites E.V., Efremov Ya.R., Nikolin V.P., Popova N.A., Venyaminova A.G., Taranov O.S., Ostanin A.A., Chernykh E.R., Kolchanov N.A., Bogachev S.S. Impact of Double-Stranded

RNA Internalization on Hematopoietic Progenitors and Krebs-2 Cells and Mechanism. *Int. J. of Molecular Sciences*. 2023;24(5):4858. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms24054858>

9. Lysenko E.N., Vlasov V.A., Nikolaev E.V., Surzhikov A.P., Korobeynikov M.V. Microstructure and magnetization study of Li and Li–Zn ferrites synthesized by an electron beam. *Materials Chemistry and Physics*. 2023;302:127722. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127722>

10. Bepalko Yu., Ereemeev N., Sadovskaya E., Krieger T., Bulavchenko O., Suprun E., Mikhailenko M., Korobeynikov M., Sadykov V. Synthesis and Oxygen Mobility of Bismuth Cerates and Titanates with Pyrochlore Structure. *Membranes*. 2023;13:598. DOI: <https://doi.org/10.3390/membranes13060598>

11. Sadykov V.A., Sadovskaya E.M., Bepalko Yu.N., Smal' E.A., Ereemeev N.F., Prosvirin I.P., Bulavchenko O.A., Mikhailenko M.A., Korobeynikov M.V. Structural, surface and oxygen transport properties of Sm-doped Nd nickelates. *Solid State Ionics*. 2024;412:116596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2024.116596>

Authors

Vadim V. Bezuglov, researcher,

E-mail: bezuglow@rambler.ru

Aleksandr A. Bryazgin, leading researcher, Head of Laboratory, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: A.A.Bryazgin@inp.nsk.su

Leonid A. Voronin, senior researcher, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: nphialex@mail.ru

Mikhail V. Korobeynikov, senior researcher, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: mkor4@rambler.ru

Mikhail A. Mikhailenko, senior researcher, Cand. Sci. (Chemistry),

E-mail: mikhailenko@solid.nsc.ru

Alexey V. Sidorov, researcher,

E-mail: asidor@bk.ru

Vadim O. Tkachenko, senior researcher, Cand. Sci. (Engineering),

E-mail: vtkachen@mail.ru

Evgeniy A. Shtarklev, researcher,

E-mail: shtarklev@gmail.com