Финляндия

В начале марта 2026 года «Управление по радиационной и ядерной безопасности» Финляндии (STUK) исключило площадку первого в стране исследовательского ядерного реактора FiR1 (англ. Finnish Reactor 1) из национального перечня ядерных установок в связи с завершением работ по его выводу из эксплуатации (ВЭ). Сооружение FiR1 тепловой мощностью 250 кВт с водяным охлаждением и бассейном типа TRIGA Mark II, осуществлявшееся в городе Эспоо по заказу Хельсинкского технологического университета, было завершено к 1962 году. Первоначально он использовался исключительно для проведения научных исследований и обучения персонала. Позднее мощности реактора также использовались для производства радиоизотопов и проведения экспериментальных медицинских исследований в области радиотерапии. Также на базе FiR1 при участии специалистов Онкологического центра Университетской больницы Хельсинки были выполнены исследования по лечению рака мозга и других трудноизлечимых опухолей методом бор-нейтронозахватной терапии.

С 1971 года за эксплуатацию реактора стал отвечать Центр технических исследований Финляндии (VTT). В рамках последней процедуры продления лицензии эксплуатация реактора был продлена до 2023 года. Однако по экономическим соображениям уже в 2012 году было принято решение о его закрытии: последний пуск реактора состоялся в июне 2015 года, а в июне 2021 года VTT получил от Государственного совета Финляндии разрешение на его ВЭ.

За несколько месяцев до получения разрешения на ВЭ часть топлива была доставлена с площадки FiR1 в Денвер (штат Колорадо, США), что обеспечило работу реактора TRIGA Mark I, оператор которого — Геологическая служба США (англ. US Geological Survey) — смог справиться с нехваткой топлива для реакторов этого типа в связи с приостановкой его производства в США. В 2023 году VTT в сотрудничестве с компанией Fortum приступил к проведению демонтажных работ на площадке FiR1. Образующиеся в ходе демонтажа и дезактивации его конструкций радиоактивные отходы (РАО) были переданы компании Fortum на окончательную изоляцию в пункте захоронения, расположенном на площадке АЭС «Ловииса».

После завершения данных работ в 2025 году финский ядерный регулятор STUK приступил к проведению необходимых заключительных проверок, по итогам которых в декабре 2025 года было подтверждено, что территория и помещения реакторного зала более не представляют радиационной опасности и могут быть использованы по любому назначению. Одновременно освобождение от регулирующего контроля было получено и в отношении лаборатории материаловедения VTT, функционировавшей в том же здании с 1970-х годов.

Вывод реактора FiR1 из эксплуатации стал для Финляндии первым завершенным в этой области проектом. По мнению экспертов, несмотря на то что в ближайшем будущем выводить из эксплуатации финские АЭС не планируется, полученный в ходе проведения работ на FiR1 практический опыт может оказаться крайне полезным, в том числе и с точки зрения внесения необходимых изменений в нормативную базу Финляндии в области использования атомной энергии и актуализации регламентов STUK. Так, благодаря реализации данного проекта сотрудникам управления удалось детально подготовить целый ряд требований к завершающим стадиям жизненного цикла ядерных установок, которые ранее не были столь подробно описаны на уровне национального законодательства [1].

Великобритания

В марте 2026 года британская компания NDA[1] объявила о запуске программы по разработке и внедрению единого каталога стандартизированных контейнеров для РАО (англ. Standard

[1] Англ. Nuclear Decommissioning Authority — это государственная компания, ответственная за безопасный ВЭ гражданских ядерных объектов и обращение с РАО в Великобритании.

Waste Container Catalogue, SWCC). Согласно исторически сложившейся в Великобритании практике, они зачастую проектировались отдельными эксплуатирующими организациями под размещение специфических видов отходов, образующихся на их площадках. Такой подход привел к избыточному разнообразию уникальных инженерных решений в этой области, а переход к стандартизированным и унифицированным конструкциям призван в первую очередь обеспечить полную совместимость упаковок с инфраструктурой будущего пункта глубинного захоронения РАО (ПГЗРО), создание которого в Великобритании пока еще находится на стадии разработки концептуальных технических решений и поиска потенциально пригодной для его строительства площадки. По мнению экспертов, стандартизация позволит избежать технически сложных и дорогостоящих операций по переупаковке отходов в будущем перед их размещением в ПГЗРО, обеспечивая также и возможность для использования унифицированного подъемно-транспортного оборудования и технологических процедур на различных площадках в ходе осуществления текущей деятельности по обращению с РАО.

Ответственность за реализацию долгосрочной государственной стратегии по разработке унифицированного перечня контейнеров для РАО различного уровня активности была возложена на компании Sellafield Ltd и Nuclear Waste Services (NWS), учредившие специальную, ответственную за это направление организацию (Waste Container Management Body). Ожидается, что данная инициатива не только приведет к сокращению расходов на завершающих стадиях ядерного топливного цикла (ЯТЦ) в долгосрочной перспективе, но и будет способствовать повышению доступности технологических решений для упаковок с РАО как низкого, так и среднего уровней активности. В конечном итоге реализация этой стратегии должна привести к оптимизации проектно-производственных процессов за счет повышения общей экономической эффективности работ по ВЭ и обращению с РАО в масштабах всего государства [2].

США

В марте 2026 года американская компания Deep Isolation Nuclear Inc опубликовала результаты исследований, подтверждающие техническую осуществимость и безопасность концепции глубинного скважинного захоронения (ГСЗ) в случае ее потенциального применения в отношении окончательной изоляции высокоактивных РАО (ВАО), которые в будущем могут образоваться в результате электрохимической переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) перспективных реакторных установок. Научные исследования в этой области в настоящее время финансируются за счет крупного государственного гранта. Так в марте 2022 года Министерством энергетики США (DOE) было выделено около 36 млн долларов США на реализацию 11 научно-исследовательских проектов, направленных на увеличение доли атомной энергетики в производстве электроэнергии в масштабах всей страны и снижение объемов образования РАО в результате эксплуатации ядерных реакторов нового поколения. Эти средства были предоставлены нескольким частным американским компаниям в рамках специальной государственной программы ONWARDS (англ. Optimizing Nuclear Waste and Advanced Reactor Disposal Systems) по оптимизации систем обращения с данными отходами. Ответственность за ее реализацию была возложена на находящееся в ведении DOE агентство ARPA-E (англ. Advanced Research Projects Agency), занимающееся инновационными научно-исследовательскими проектами по разработке реакторов нового поколения в США. Эта программа стала первой инициативой ARPA-E, ориентированной на развитие технологий переработки ОЯТ перспективных реакторов, разработку инновационных матриц для иммобилизации образующихся в результате РАО, концепций их окончательного захоронения и систем контроля.

В рамках программы ONWARDS в 2022 году Deep Isolation Nuclear Inc и ее партнеры получили финансирование в размере 4 млн долларов США на осуществление проекта по коммерциализации технологий электрохимической переработки металлического топлива реакторов нового поколения и замыкания ЯТЦ при условии обеспечения минимального уровня образования подлежащих окончательному захоронению РАО. Помимо Deep Isolation Nuclear Inc, участие в этом проекте приняли компания Oklo Inc, а также Аргоннская национальная лаборатория (англ. Argonne National Laboratory, ANL) и Национальная лаборатория Айдахо (Idaho National Laboratory, INL). Основная задача этих организаций состояла в разработке проекта коммерческого предприятия по переработке ОЯТ, включая решения по захоронению непригодных для переработки РАО в пунктах глубинного скважинного захоронения (ПГСЗ).

За все вопросы, связанные именно с технологией глубинного скважинного захоронения, отвечали специалисты компании Deep Isolation

Nuclear Inc, уже на протяжении многих лет работавшие над проектом сооружения таких скважин с помощью широко применяемых в нефтегазовой отрасли методов наклонно-направленного бурения. Предлагаемая концепция предусматривает размещение отходов в коррозионно-стойких контейнерах цилиндрической формы диаметром от 22 до 33 см и высотой около 4,3 м на глубине до нескольких километров в геологически стабильных породах, сохраняющих устойчивость на протяжении десятков и сотен миллионов лет. Согласно разработанному специалистами Deep Isolation Nuclear Inc проекту, данная скважина состоит из вертикального участка доступа, нижняя часть которого, плавно изгибаясь, переходит в почти горизонтальную секцию протяженностью до 3,2 км, которую и предлагается использовать для окончательного захоронения упаковок с РАО. После загрузки контейнеров скважину планируется изолировать от поверхности с использованием вскрытой породы, бентонита и других изоляционных материалов.

Отдельное значение для практической реализации этой концепции имеет универсальная контейнерная система UCS, разработанная специалистами компании Deep Isolation совместно с NAC International Inc при финансовой поддержке ARPA-E. Она предназначена для размещения различных типов отходов, образующихся в результате эксплуатации реакторов нового поколения, включая остеклованные РАО от переработки топлива, TRISO ОЯТ и галогенидные соли реакторов на расплавах солей. По заявлению разработчиков системы, контейнеры UCS совместимы как с существующей инфраструктурой сухого хранения и транспортирования ОЯТ, так и возможными конструктивными решениями по окончательному захоронению РАО в ПГЗРО как скважинного, так и шахтного типа.

В рамках упомянутого выше проекта по коммерциализации технологии электрохимической переработки металлического ОЯТ специалисты Deep Isolation проанализировали характеристики потоков отходов, образующихся в результате переработки ОЯТ методом электрорафинирования. Задача состояла в том, чтобы выявить те из них, которые могли бы быть безопасно удалены в ПГСЗ. Параллельно с этим была проведена оценка технических параметров и потенциального экономического эффекта от реализации программы по окончательной изоляции таких РАО. Сотрудники компании Oklo Inc и Аргоннской национальной лаборатории, в свою очередь, сосредоточились на решении вопросов, связанных с промышленным освоением методов электрорафинирования ОЯТ, предусматривающим использование автоматизированных систем и современных сенсорных технологий.

По данным компании Deep Isolation, проведенные исследования подтвердили совместимость потоков ВАО, образующихся при переработке ОЯТ по базовой схеме, предложенной инженерами Аргоннской национальной лаборатории, с концепцией ГСЗ. Результаты расчетного моделирования свидетельствуют о том, что показатели долговременной безопасности при захоронении таких отходов в ПГСЗ, учитывая их возможное размещение в различных геологических формациях, включая сланцевые и гранитные породы, превышают заданные при моделировании целевые значения, а прогнозируемые дозовые нагрузки оказались на несколько порядков ниже указанных в нормативных требованиях.

Таким образом, полученные к настоящему времени результаты исследований указывают на принципиальную возможность применения концепции ГСЗ в качестве одного из вариантов окончательной изоляции ВАО, образующихся при переработке ОЯТ реакторов нового поколения. Представители компании подчеркивают, что практическая реализация таких проектов потребует внесения изменений в действующее законодательство США, которое в настоящее время не допускает захоронения высокоактивных отходов в ПГСЗ [3].

Выше уже отмечалось, что одним из ключевых элементов с точки зрения практической реализации концепции ГСЗ РАО в США является универсальная контейнерная система UCS, разработанная инженерами Deep Isolation совместно с NAC International Inc. В апреле 2026 года компания сообщила о запуске нового этапа НИОКР по данному направлению: проект, предусматривающий проведение полномасштабных полевых испытаний системы UCS (рис. 1), получил финансирование от агентства ARPA-E в рамках программы SCALEUP Ready, а также американской компании Lithios, занимающейся разработкой технологии электрохимического извлечения лития из низкоконцентрированных рассолов. Общий объем выделенных ARPA-E средств на реализацию этих двух проектов составил около 40 млн долларов США.

В целом реализация программы SCALEUP ориентирована на преодоление разрыва между проведением пилотных демонстрационных исследований и полномасштабным промышленным внедрением новых энергетических технологий в США. В случае Deep Isolation речь

Рис. 1. Площадка Deep Isolation для проведения пилотных испытаний технологии глубинного скважинного захоронения РАО в США [4]

идет о комплексных всесторонних испытаниях системы UCS на базе экспериментальной установки для скважинного захоронения нерадиоактивных имитаторов РАО в Кэмероне, штат Техас, включающих отладку процедур осуществления регулирующего контроля и демонстрацию технических возможностей и безопасности всех разработанных в рамках проекта ГСЗ технологий.

Помимо Deep Isolation, участие в проекте примет консорциум из нескольких компаний, включая Westinghouse Electric, NAC International Inc, Halliburton, Occlusion Nuclear Solutions, Amentum, а также Deep Borehole Demonstration Center. Компания Westinghouse Electric выступит первым коммерческим заказчиком системы ГСЗ — она планирует интегрировать ее в технологический процесс обращения с ОЯТ, образующимся при эксплуатации микрореакторов EVinci[1]. В частности, совместно с Deep Isolation и партнерами Westinghouse Electric намерена получить разрешение от ядерного регулятора США NRC (англ. U.S. Nuclear Regulatory Commission) на использование контейнеров UCS для хранения и транспортировки такого ОЯТ. Что касается остальных участников проекта, то компания Halliburton будет отвечать за сооружение скважин, Occlusion — за проведение работ под землей, NAC International — за изготовление контейнеров, лицензирование и проведение работ на поверхности, а Amentum — за обеспечение эксплуатационной безопасности и надлежащего качества работ.

Для Deep Isolation намеченные полномасштабные испытания системы ГСЗ являются важнейшей вехой, которая должна ознаменовать переход от расчетного обоснования безопасности данной технологии к демонстрации технических возможностей и целесообразности ее практического применения. Если выполненные ранее исследования подтвердили лишь принципиальную возможность удаления ВАО от переработки ОЯТ в ПГСЗ, то новый этап направлен уже на подтверждение работоспособности всей разработанной Deep Isolation и ее партнерами технологической цепочки в условиях, максимально приближенных к реальной промышленной эксплуатации [4].

Болгария

Министерство энергетики Болгарии отчиталось о завершении начавшихся еще в 2017 году работ по сооружению объектов первой очереди нового пункта приповерхностного захоронения (ППЗРО) для низко- и среднеактивных отходов (НАО и САО) — в апреле 2025 года национальный оператор по обращению с РАО (SE RAW) получил разрешение на ввод его в эксплуатацию.

Согласно проекту, новый ППЗРО будет состоять из 66 железобетонных модулей, способных вместить около 138,2 тыс. м^3 отходов, что эквивалентно примерно 19 000 контейнерам с РАО (рис. 2). Первая очередь состоит из 22 модулей и рассчитана на прием 6 336 контейнеров с РАО, по большей части тех, что образуются в результате проведения запланированных работ по ВЭ четырех остановленных к настоящему времени блоков АЭС «Козлодуй». Сам ППЗРО находится неподалеку от площадки АЭС. Место для его сооружения было выбрано по итогам многолетних геолого-гидрогеологических и инженерно-геологических исследований. Ожидается, что он продолжит принимать РАО на захоронение в течение следующих 60 лет. После завершения этого периода и проведения необходимых работ по его закрытию стартует период ведомственного контроля, предусматривающий осуществление

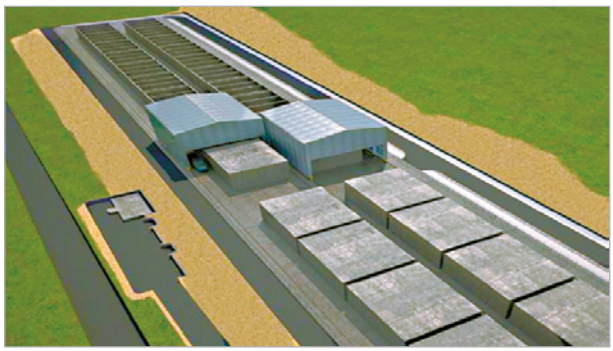

Рис. 2. Проект болгарского ППЗРО для НАО и САО вблизи АЭС «Козлодуй»

[1] EVinci – это охлаждаемый тепловой трубкой микрореактор, который может производить до 5 МВт, с активной зоной, работающей на топливе TRISO, мощностью 15 МВт, которая рассчитана на функционирование в течение восьми или более лет на полной мощности до перегрузки.

мониторинга состояния площадки на протяжении 300 лет.

Следует отметить, что изначально правительство Болгарии взяло на себя обязательства по созданию национального пункта захоронения НАО и САО в рамках процедуры вступления страны в Европейский Союз (ЕС). В ходе данных переговоров страна также приняла обязательства и по досрочному закрытию первых четырех энергоблоков ВВЭР-440 на АЭС «Козлодуй». Однако в настоящее время ввод ППЗРО в эксплуатацию связывают и с реализацией более масштабной стратегической цели государства: наличие собственной инфраструктуры для окончательной изоляции НАО и САО рассматривают как один из ключевых факторов, обеспечивающих перспективы для дальнейшего развития атомной энергетики в стране, включая планы по строительству новых энергоблоков с реакторами типа AP1000 компанией Westinghouse Electric на площадке АЭС «Козлодуй», а также развертывание технологий малых модульных реакторов [5], [6].

Литва

В Литве продолжается реализация одного из наиболее масштабных и сложных проектов по ВЭ ядерных объектов в Европе. В апреле 2026 года, после завершения демонтажа реакторных каналов в первом энергоблоке Игналинской АЭС[1], национальный регулятор выдал разрешение на проведение работ по разборке и дезактивации оборудования верхней и нижней зон реакторных каналов второго блока станции.

В соответствии с утвержденным техническим проектом, на втором энергоблоке специалистам государственной компании Altra, отвечающей за ВЭ реакторных блоков Игналинской АЭС, предстоит демонтировать трубопроводы пароводяного отвода в верхней части реактора, а также использовавшиеся для подачи воды в нижней части и связанные с ними системы и оборудование. Одновременно с этим будет осуществляться первичная обработка образующихся в результате проведения этих работ РАО. Этот этап также предусматривает демонтаж топливных каналов и каналов системы управления и защиты, расположенных внутри реактора.

[1] Игналинская АЭС с двумя реакторами типа РБМК-1500, близкими по конструктивной схеме к реакторам Чернобыльской АЭС, перешла в собственность Литвы после распада СССР. В рамках процедуры по вступлению в ЕС Литва приняла на себя обязательства по досрочному прекращению ее эксплуатации: первый блок был остановлен в 2004 году, второй — в 2009 году. Значительная часть работ по ее ВЭ осуществляется при финансовой поддержке ЕС, в том числе через Европейский банк реконструкции и развития.

Согласно текущим планам, к проведению данных работ на втором блоке АЭС литовские специалисты приступят ближе к концу 2026 года. До этого времени на площадке необходимо выполнить целый комплекс подготовительных мероприятий, включая монтаж инженерных систем, испытания дистанционно управляемого оборудования и робототехнических комплексов, а также модернизировать и доработать имеющиеся системы обращения с РАО с учетом характеристик тех материалов, которые будут образовываться в ходе предстоящих работ.

Также на 2026 год намечено проведение демонтажа и дезактивации барабанов-сепараторов на обоих энергоблоках. На Игналинской АЭС эксплуатировалось восемь таких аппаратов — металлических цилиндров диаметром около 3 м и длиной порядка 30 м, совокупная масса которых превышает 6 тыс. тонн. Для подготовки к их разборке в ноябре 2024 года Altra заключила контракт на сумму около 5,5 млн евро с американской компанией Amentum на инженерно-консультационное сопровождение этого этапа работ.

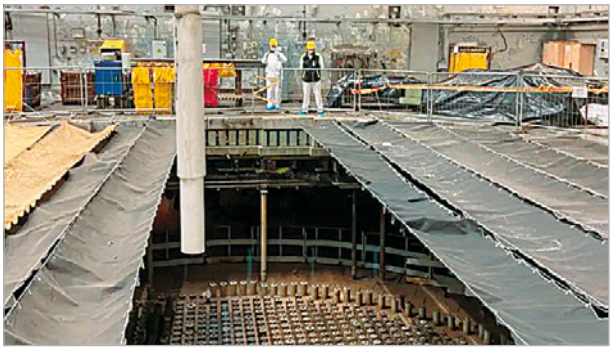

Рис. 3. Проведение работ по ВЭ внутри одного из энергоблоков Игналинской АЭС [7]

Демонтаж избыточных систем и оборудования на площадке Игналинской АЭС осуществляется с 2010 года. По данным компании Altra, к настоящему времени завершена разборка около 2/3 всех конструкций первого блока АЭС. Несмотря на это, наиболее трудоемкий с точки зрения радиационной опасности и технологической сложности этап еще только впереди. Завершение демонтажа обоих реакторов, включая проведение самых сложных операций в их активных зонах, к выполнению которых Altra предполагает привлечь сторонних подрядчиков, в настоящее время намечено на 2043 год, а завершение выполнения всего комплекса работ по ВЭ АЭС, включая окончательную очистку реакторных зданий, запланировано на 2050 год [7].

Германия

В апреле 2026 года руководство компании PreussenElektra, являющейся дочерним предприятием концерна E.ON, ответственного за ВЭ немецкой АЭС «Гронде»[1], объявило о завершении важного этапа: все отработавшие тепловыделяющие сборки (ОТВС) были удалены из бассейна выдержки ОЯТ и перемещены в пристанционное хранилище.

Рис. 4. Процесс транспортировки ОТВС в защитных контейнерах типа CASTOR в пристанционный пункт хранения на территории АЭС «Гронде»

Разрешение на проведение работ по ВЭ АЭС было выдано Министерством окружающей среды, энергетики и защиты климата Нижней Саксонии еще в декабре 2023 года. В январе следующего года на площадке АЭС начался демонтаж, а 7 апреля 2026 года последний загруженный ОТВС контейнер CASTOR был извлечен из здания реактора и доставлен на территорию пристанционного хранилища. В общей сложности с 2023 года на специализированную площадку, организованную для промежуточного хранения ОЯТ, было доставлено 694 ОТВС, упакованных в защитные контейнеры типа CASTOR (рис. 4). Таким образом, к настоящему времени с территории реакторной площадки были удалены материалы, на которые в общей сложности приходилось почти 99 % от всей имевшейся на ней радиоактивности. В рамках следующего этапа работ, намеченного на конец 2026 года, оператор планирует приступить к демонтажу конструкций корпуса ядерного реактора. Полное завершение ВЭ АЭС «Гронде» намечено на 2039 год, после чего ее площадку планируют использовать по иному назначению [8].

[1] АЭС с одним реактором типа PWR мощностью 1 430 МВт была остановлена в конце 2021 года.

Литература

1. Decommissioning of Finnish research reactor completed, World Nuclear News, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/decommissioning-of-finnish-research-reactor-completed (дата обращения: 06.03.2026).
2. NDA launches waste container standardisation initiative, World Nuclear News, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/nda-launches-waste-container-standardisation-initiative (дата обращения: 24.03.2026).
3. Deep Isolation further validates borehole technology, World Nuclear News, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/deep-isolation-further-validates-borehole-technology (дата обращения: 25.03.2026).
4. Deep Isolation selected for new US federal support, World Nuclear News, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/deep-isolation-selected-for-new-us-federal-support (дата обращения: 08.04.2026).
5. Bulgarian repository moves closer to commissioning, World Nuclear News, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/bulgarian-repository-moves-closer-to-commissioning (дата обращения: 30.03.2026).
6. Bulgarian repository officially opened, World Nuclear News, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/bulgarian-repository-officially-opened (дата обращения: 15.04.2026).
7. Dismantling of reactor channels to begin at second Ignalina unit, World Nuclear News, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/dismantling-of-reactor-channels-to-begin-at-second-ignalina-unit (дата обращения: 10.04.2026).
8. Grohnde nuclear fuel transfer completed, World Nuclear News, URL: https://www.world-nuclear-news.org/articles/grohnde-nuclear-fuel-transfer-completed (дата обращения: 15.04.2026).

Материал подготовила М. В. Ведерникова