

# ТЕХНОЛОГИИ ОКОНЧАТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ: ЕВРОПЕЙСКИЙ ОПЫТ И ТЕНДЕНЦИИ

**В. Т. Сорокин<sup>1</sup>, Д. И. Павлов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>АО «АТОМПРОЕКТ», Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский филиал АО «ФЦНИВТ «СНПО «ЭЛЕРОН» – «ВНИПИЭТ», Санкт-Петербург

Статья поступила в редакцию 26 июня 2018 г.

---

*Проведен краткий анализ технических решений, применяемых на существующих и проектируемых объектах окончательной изоляции РАО в европейских странах. Определены тенденции в развитии технологий захоронения для различных категорий РАО.*

**Ключевые слова:** *коротко и долгоживущие радиоактивные отходы, очень низко-активные и высокоактивные отходы, приповерхностные, подземные и глубинные пункты захоронения радиоактивных отходов.*

Задача окончательной изоляции радиоактивных отходов (РАО) возникла во второй половине прошлого века в связи с активным развертыванием научно-исследовательских и военных ядерных программ и развитием в мире атомной энергетики. В своем решении она прошла несколько этапов, что позволило накопить большой международный опыт, который может быть полезен для стран, приступающих к созданию национальных пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО).

В настоящее время в мире выработана единая политика в вопросах конечной стадии обращения с РАО, в основе которой лежат принципы многобарьерной защиты окружающей среды, защиты жизни и здоровья населения, принцип необременения будущих поколений проблемами обращения с РАО.

Однако, несмотря на широкую международную кооперацию и единство в подходах к окончательной изоляции РАО, в разных странах имеются существенные различия при решении технических и организационных вопросов создания

пунктов захоронения РАО. Это обусловлено особенностями нормативно-правовой базы, экономическими, политическими, социальными факторами, климатическими и геологическими особенностями расположения страны.

Целью настоящей статьи является краткий анализ технических решений, применяемых на существующих объектах окончательной изоляции РАО и в разрабатываемых перспективных проектах ПЗРО, для выявления основных тенденций в технологиях захоронения РАО различных категорий в европейских странах.

В настоящее время захоронение РАО — это реализованная стадия обращения с очень низкоактивными отходами (ОНАО), с короткоживущими низкоактивными отходами (КНАО) и короткоживущими среднеактивными отходами (КСАО) в большинстве европейских стран. Вопросы захоронения долгоживущих низкоактивных (ДНАО) и долгоживущих среднеактивных отходов (ДСАО), а также высокоактивных отходов (ВАО) и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) находятся в стадии разработки.

В табл. 1 представлена информация о существующих и проектируемых ПЗРО в ряде европейских стран, эксплуатирующих атомные электростанции. Детальный обзор зарубежных практик захоронения представлен в [1].

### Захоронение ОНАО

Для окончательной изоляции ОНАО, период потенциальной опасности которых во многих странах не превышает 100 лет, используются

**Таблица 1. Характеристика ПЗРО, используемых и проектируемых в ряде европейских стран**

Страна	Название, годы эксплуатации	Тип ПЗРО, данные по вмещающим породам и категориям изолируемых РАО			Вместимость ПЗРО
		Наземный (или полузаглубленный)	Подземный (глубина до 100 м)	Глубинный (глубина более 100 м)	
Франция	CSM, 1969–1994	КНАО, КСАО	-	-	527 тыс. м <sup>3</sup>
	CSA, 1992 – н.в.	КНАО, КСАО	-	-	1 млн м <sup>3</sup>
	Cires, 2003 – н. в.	ОНАО (глубина 8 м)	-	-	650 тыс. м <sup>3</sup>
	Нет сведений	-	ДНАО, глубина не определена	-	180 тыс. м <sup>3</sup>
	Cigeo	-	-	ДСАО, ВАО, 500 м	83,5 тыс. м <sup>3</sup>
Испания	El Cabril (Vault 1-28), 1992 – н. в.	КНАО, КСАО	-	-	100 тыс. м <sup>3</sup>
	El Cabril (Vault 29-32), 2007 – н. в.	ОНАО	-	-	130 тыс. м <sup>3</sup>
Великобритания	Drigg, 1959 – н.в.	КНАО	-	-	1 млн м <sup>3</sup>
	GDF, сроки не известны	-	-	ДНАО, ДСАО, ВАО, ОЯТ.	Около 650 тыс. м <sup>3</sup>
Германия	ASSE II, 1967–1978	-	-	НАО, САО, 510–750 м	Около 25 тыс. м <sup>3</sup>
	Morsleben, 1972–1998	-	-	НАО, САО, 480 м	37 тыс. м <sup>3</sup>
	Konrad, 2021–	-	-	НАО, САО, 800–1300 м	650 тыс. м <sup>3</sup>
	Gorleben	-	-	ВАО, ОЯТ, 840–1200 м	Около 16 т ВАО, ОЯТ (~ 9000 упаковок)
Швейцария	Без названия, 2050–2065	-	-	НАО, САО, 400 м	100 тыс. м <sup>3</sup>
	Без названия, 2060–2075	-	-	ДСАО, ВАО, ОЯТ, 600–800 м	317 упак. ВАО, 1894 упак. ОЯТ
Бельгия	cAt project, 2016–2031	КНАО, КСАО	-	-	30.6 тыс. упаковок
	Нет сведений	-	-	ДНАО, ДСАО, ВАО, 220 м	11,1 тыс. м <sup>3</sup> ДНАО, ДСАО, 600 м <sup>3</sup> ВАО
Швеция	SFR, 1988 – по н. в.	-	КНАО, КСАО 60 м	-	63 тыс. м <sup>3</sup> . Расширение до 200 тыс. м <sup>3</sup>
	SFL, не ранее 2035	-	-	ДНАО, ДСАО, 500 м	16 тыс. м <sup>3</sup>
	KBS-3	-	-	ОЯТ, 500 м	6000 упаковок
	Oskarshamn, 1986–2025	ОНАО	-	-	10000 м <sup>3</sup>
	Studsvik, 1988–2010	ОНАО	-	-	1540 м <sup>3</sup>
Финляндия	Forsmark, 1989–2040	ОНАО	-	-	17000 м <sup>3</sup>
	Ringhals, 1993–2030	ОНАО	-	-	10000 м <sup>3</sup>
	VLJ Olkiluoto, 1992 – н. в.	-	КНАО, КСАО 60–100 м	-	5 тыс. м <sup>3</sup> КНАО, 3,5 тыс. м <sup>3</sup> КСАО
	VLJ Loviisa, 1998 – н. в.	-	-	КНАО, КСАО, 110 м	8700 м <sup>3</sup>
Венгрия	Onkalo, 2022–2120	-	-	ОЯТ, 450 м	5,4 т ОЯТ (2800 упаковок)
	RWTDF, 1976–2005	КНАО	-	-	5 тыс. м <sup>3</sup>
	Bataapati, 2012–2037	-	-	КНАО, КСАО, 250 м	40 тыс. м <sup>3</sup>
	2064–2079	-	-	ДНАО, ДСАО, ВАО, ОЯТ	Нет сведений

Условные обозначения: ■ Глины ■ Скальные породы ■ Соли

## Захоронение РАО



Рис. 1. Технология захоронения ОНАО на площадке АЭС Oskarhamn (Швеция) в процессе возведения покрывающего экрана [2]



Рис. 2. Технология захоронения ОНАО объекта Cires на площадке Morvilliers (Франция) [3]

упрощенные конструкции ПЗРО в виде траншей и курганов (рис. 1, 2). Безопасность данных сооружений обеспечивается главным образом многослойными покрывающими и подстилающими экранами.

Шведский пункт захоронения (ПЗ) ОНАО на площадке АЭС Oskarhamn представляет собой непроницаемое бетонное основание толщиной 0,5 м, которое размещается на двухметровом слое естественной морены, с засыпкой смеси гальки и каменной крошки. Упаковки ОНАО устанавливаются в виде протяженного кургана. Свободное пространство засыпается песком, а сверху создается покрывающий экран, включающий смесь гальки и каменной крошки, гидравлический барьер из бентонита с каменной крошкой толщиной 0,4 м, бентонитовый текстиль, галечный дренажный слой, геотекстильный материал, моренный слой толщиной 1,2 м, который сверху закрывается растительным грунтом [2].

Централизованный пункт захоронения ОНАО CIRES во Франции представляет собой сеть траншей глубиной 8 м в приповерхностном слое глины, над которыми установлены временные укрытия. После заполнения траншей и создания кургана из упаковок ОНАО, засыпанных песком, над курганом создается покрывающий экран из полиэтилена высокой плотности толщиной 2 мм, глины, извлеченной при изготовлении траншей (от 1 до 5 м), буферного материала на основе глины (2,5 м), слоя грунта для зеленых насаждений (0,3 м) [4].

## Захоронение КНАО и КСАО

Первые ПЗ КНАО и КСАО в Великобритании, Франции и Венгрии представляли собой сооружения, аналогичные тем, которые сейчас применяются только для захоронения ОНАО. Опыт эксплуатации этих приповерхностных ПЗ короткоживущих РАО, реализованных в виде простых траншей или курганов, заполненных упаковками РАО с последующим созданием защитного покрывающего экрана, выявил трудности

с обеспечением надежной изоляции радионуклидов без дополнительных защитных барьеров [5, 6].

Эволюция подходов к захоронению РАО привела к тому, что на сегодняшний день наземные ПЗРО для КНАО и КСАО (Франция, Испания, Бельгия) представляют собой достаточно сложные инженерные сооружения в виде бетонных ограждающих конструкций, оборудованные системой дренажа возможных протечек с системами контроля и наблюдения.

Современная концепция наземного захоронения КНАО и КСАО одной из первых была реализована во Франции на объекте CSA, спроектированном на базе опыта эксплуатации сооружения захоронения CSM, действующего в период с 1969 по 1994 год. Конструкция сооружения захоронения CSA (рис. 3) представляет собой железобетонный модуль 25 м шириной и 8 м высотой, поделенный на отсеки. В отсеки мостовым или козловым краном под временным передвижным каркасным сооружением устанавливаются в штабель упаковки с РАО. По мере заполнения отсеков пространство между упаковками заполняется песчано-бентонитовой смесью. Заполненный отсек хранения сверху бетонируется, образуя железобетонный куб. Модули захоронения после заполнения и бетонирования всех



Рис. 3. Наземный ПЗРО для КНАО и КСАО во Франции [1]



Рис. 4. Проект наземного ПЗРО для КНАО и КСАО в Бельгии [13]

отсеков покрываются многослойным покрытием, формирующим курган [7].

ПЗРО CSA безаварийно эксплуатируется с 1992 года, и в настоящее время технические решения, реализованные для данного пункта захоронения, тиражируются для других стран. Аналогичные конструкции ПЗРО приняты для захоронения РАО в Испании [8], Литве [9], Украине [10].

В Бельгии для захоронения КНАО и КСАО реализуется похожая концепция наземного пункта захоронения, но дополненная техническими решениями по организации контроля над состоянием упаковок с РАО. Конструкция бельгийского ПЗРО (рис. 4) оборудована галереями для проведения инспекционных проверок состояния сооружения [11, 12].

Таким образом, на первых этапах эксплуатации ПЗРО фактически представляет собой пункт долговременного хранения РАО с возможностью изъятия упаковок.

В ряде стран КНАО и КСАО подлежат захоронению в подземных ПЗРО глубиной до 100 м (Швеция, Финляндия — в скальных породах) и даже глубинных ПЗРО на глубине более 400 м (Германия — в выработках соляных формаций, Швейцария — в глинах).

**Финский ПЗРО** Olkiluoto repository (рис. 5) представляет собой две вертикальные шахты

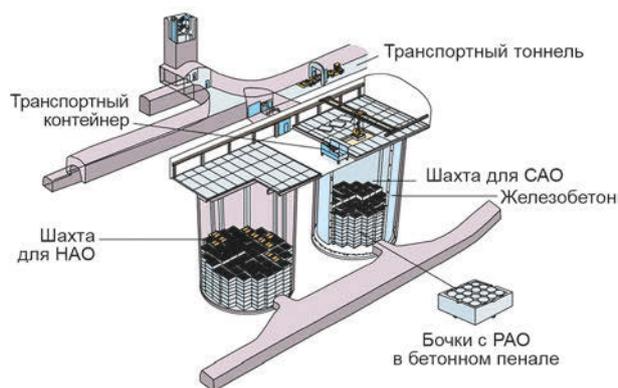


Рис. 5. Проект подземного ПЗРО VLO Olkiluoto repository [16]

(для КНАО и для КСАО), расположенные в скальных породах на глубине от 60 до 100 метров. Шахты объединены сверху общим монтажным залом, сообщаемым с наземным комплексом посредством наклонной рампы для доставки РАО спецавтотранспортом. Также в скальных породах эксплуатируется второе подземное сооружение для захоронения короткоживущих НАО и САО на площадке АЭС Loviisa [14].

**Шведский подземный ПЗРО** SFR для КНАО и КСАО (рис. 6), построенный на глубине 60 м в скальной породе вблизи АЭС Forsmark, включает шахту диаметром 28 м и глубиной 70 м (53 м — рабочая часть) для размещения бетонных контейнеров с КСАО и четыре тоннеля длиной 160 м для размещения бетонных и металлических контейнеров с КНАО. В 2014 году компания SKB подала заявку на расширение ПЗРО SFR. В соответствии с данными решениями планируется выполнить шесть горизонтальных выработок длиной 240—275 м на глубине 120—140 м (под существующим горизонтом захоронения), соединенных с наземным комплексом ПЗРО посредством наклонной шахты длиной 1,7 км. В случае реализации планов компании SKB общая вместимость ПЗРО SFR совместно с расширенной частью составит около 200 тыс. м<sup>3</sup> РАО [15].

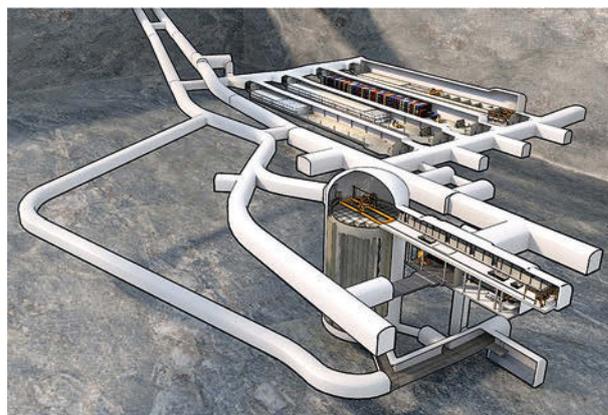


Рис. 6. Проект подземного ПЗРО SFR вблизи АЭС Forsmark [17]

**В Венгрии** с 2012 года в регионе Bataapati эксплуатируется глубинный ПЗРО вместимостью 40 тыс. м<sup>3</sup> для КНАО и КСАО от АЭС Paks. Выработки для захоронения в данном ПЗРО размещаются в скальных породах на глубине около 250 м. На захоронение поступают бетонные контейнеры, в которых размещены бочки с твердыми или отвержденными отходами. Свободное пространство между бочками заливается цементным раствором. Рассматривается также вариант применения стальных контейнеров для КНАО, позволяющий увеличить вместимость сооружений ПЗРО [18].

**В Швейцарии** разработан концептуальный проект ПЗРО для КНАО и КСАО. В соответствии с проектом отходы планируется размещать на глубине около 400 м в глиняных формациях.

## Захоронение РАО

Сооружения захоронения представляют собой массив горизонтальных тоннелей длиной около 200 м, расположенных параллельно друг другу и соединенных в торце транспортным тоннелем. Подземные сооружения соединены с наземным комплексом двумя вертикальными шахтами (вентиляционной и технологической) и наклонной рампой, по которой должна осуществляться доставка контейнеров с РАО на горизонт захоронения [19].

## Захоронение ДНАО и ДСАО

**Французский концептуальный проект** рассматривает два варианта захоронения ДНАО, содержащих радий, углерод-14 и другие долгоживущие радионуклиды, в глиняных формациях:

- на глубине от 15 до 30 м в траншеях;
- на глубине от 50 до 200 м в массиве горизонтальных выработок.

Вместимость ПЗРО составит около 180 тыс. м<sup>3</sup> РАО. К 2019 году должна закончиться работа по определению места захоронения ДНАО, после чего будут прорабатываться конкретные инженерно-технические решения [20]. Захоронение ДСАО во Франции планируется осуществлять в ПЗРО Cigeo совместно с высокоактивными отходами [21].

**В Бельгии** захоронение ДНАО, ДСАО, ВАО или ОЯТ, в случае отказа от его переработки планируют осуществлять в едином глубинном ПЗРО, размещенном в глинистых породах на глубине 220 м в трех галереях диаметром 3 м и длиной по 1000 м каждая. Площадка на данный момент еще не выбрана. В качестве потенциальных вмещающих пород рассматриваются глины Boom clay и Ypresian clay [22].

**В Швеции** захоронение ДНАО и ДСАО планируется осуществлять в глубинном ПЗРО SFL. На сегодняшний день разрабатываются концептуальные варианты данного ПЗРО, определяется площадка его размещения, ведутся научно-исследовательские разработки. В соответствии с планами компании SKB реализация проекта должна начаться не ранее 2035 года [23].

**В Венгрии** для захоронения ДНАО, ДСАО, ВАО и ОЯТ планируют создать глубинный ПЗРО в скальных породах. Проведение инженерных изысканий планируют закончить к 2030 году. До 2054 года будет построена подземная лаборатория и проведены натурные исследования. С 2055 года до 2063 года планируется строительство ПЗРО и получение лицензии на эксплуатацию, которая должна начаться с 2064 года [1].

## Захоронение ВАО и ОЯТ

В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ и национальными законодательствами ВАО и ОЯТ подлежат окончательной изоляции в глубинных ПЗРО (ОЯТ — в странах с открытым ядерным топливным циклом).

**В Швеции** с 1970-х годов ведется разработка глубинного пункта захоронения ОЯТ и ВАО в соответствии с концепцией под названием KBS-3. Площадка пункта окончательной изоляции ОЯТ размещается в регионе АЭС Forsmark в гранитном массиве на глубине около 500 м (рис. 7).



Рис. 7. Модель сооружения захоронения в соответствии с концепцией KBS-3 [24]

Подземный комплекс включает центральную часть, которая соединена с земной поверхностью спиралевидной рампой для доставки ОЯТ и четырьмя вертикальными шахтами для доставки нетехнологических грузов, вентиляции и выгрузки породы, и сеть тоннелей, в основании которых пробурены скважины для размещения в них контейнеров с ОЯТ [25].

Контейнер для отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) диаметром 1,05 м, высотой 4,8 м и толщиной стенок 50 мм изготовлен из рафинированной меди. Внутри контейнера установлен металлический вкладыш для размещения ОТВС. Масса контейнера брутто составляет 24,6 т.

**В Финляндии** площадка для захоронения ОЯТ, получившая название Onkalo, выбрана вблизи АЭС Олкилуото. Практические работы на площадке начались в 2004 году и по планам должны закончиться к 2020 году.

За основу при разработке технических решений Onkalo был взят шведский проект пункта захоронения ОЯТ, разработанный компанией SKB. В соответствии с проектными решениями горизонт захоронения размещается на глубине 420 м. Медные контейнеры с ОТВС устанавливаются по 1 шт. вертикально в скважины диаметром 1,75 м и глубиной 7,8 м. Скважины расположены на расстоянии около 9 м друг от друга и сверху соединены горизонтальным тоннелем (тоннелем захоронения). В ПЗРО несколько десятков тоннелей захоронения соединены между собой в сеть общей площадью 1,5 км<sup>2</sup>. Подземная часть соединяется с земной поверхностью транспортным тоннелем длиной около 5 км и тремя шахтами, приточной вентиляционной шахтой, вытяжной вентиляционной шахтой и шахтой доступа персонала.

**Во Франции** для захоронения ВАО и ДСАО в 2025 году, в соответствии с проектом Cigeo,

планируется запустить в эксплуатацию ПЗРО, которое размещено на границе регионов Meuse и Haute de Marne, в северо-восточной части на глубине ~500 м в аргиллитовых формациях (рис. 8).



Рис. 8. Модель пункта окончательной изоляции РАО по проекту Cigeo [26]

Проектные решения разработаны для захоронения 73,5 тыс. м<sup>3</sup> ДСАО (180 тыс. контейнеров) и 10 тыс. м<sup>3</sup> ВАО (60 тыс. контейнеров).

Подземные сооружения представляют собой горизонтальные выработки, соединенные между собой тоннелями и сформированные в две зоны: зону захоронения ДСАО и зону захоронения ВАО.

Транспортная связь горизонта захоронения с землей осуществляется с помощью фуникулера, перемещающегося по наклонному рельсовому пути длиной около 5 км. Для обеспечения вентиляции горизонта захоронения, доставки материалов, а также выгрузки породы предусмотрены соответствующие вертикальные шахты.

Среднеактивные отходы планируется размещать в канистрах из нержавеющей стали, которые парами должны устанавливаться в железобетонный контейнер. Контейнеры размещаются в прямоугольных горизонтальных выработках в штабель по 2 шт.

Первичные упаковки с высокоактивными отходами (канистры из нержавеющей стали) планируется устанавливать в стальных толстостенных цилиндрических контейнерах. Данные контейнеры размещаются последовательно друг за другом в горизонтальных тоннелях длиной 100 м, облицованных сталью и радиально выходящих из главного транспортного тоннеля доставки ВАО. Технология захоронения ВАО и ДСАО разработана с учетом возможности последующего извлечения упаковок с отходами.

В Швейцарии строительство пункта захоронения ВАО и ОЯТ намечено на 2050-е годы. ПЗРО планируется размещать на глубине около 600-800 м в глиняных формациях. Наряду с ВАО на горизонте захоронения также должны размещаться ДСАО. В соответствии с концептуальным проектом ВАО и ОЯТ должны размещаться в горизонтальных тоннелях диаметром 3 м и длиной около 800 м, расположенных параллельно друг другу и соединенных в торце транспортным

тоннелем. Расстояние между тоннелями должно составлять около 40 м. Пространство между стенами тоннеля захоронения и упаковками с ВАО или ОЯТ планируется заполнять гранулированным бентонитом. Упаковки с ВАО или ОЯТ должны размещаться на расстоянии 3 м друг от друга. Через каждые 10 упаковок должен возводиться защитный слой толщиной 8 м из бентонитовых блоков и гранул. Долгоживущие САО предполагается размещать в параллельных тоннелях длиной 200 м [27].

В Германии, несмотря на значительные проработки проекта для захоронения ВАО в соляных формациях (Gorleben), в последние годы активно ведутся работы по поиску альтернативных вмещающих пород. Это связано с тем, что использование соляных формаций для захоронения РАО для Европы нетипично. В качестве перспективных геологических формаций рассматриваются в том числе крупные массивы глин в северной части страны и относительно небольшие залежи глин на юге [28].

## Заключение

В европейских странах накоплен многолетний опыт создания и эксплуатации приповерхностных пунктов захоронения ОНАО, КНАО и КСАО. Проводятся всесторонние научно-исследовательские, опытно-конструкторские и проектно-изыскательские работы для глубинного захоронения ДНАО, ДСАО, ВАО и ОЯТ.

В табл. 2 представлены решения по типам ПЗРО для различных категорий РАО, принятых или разрабатываемых в ряде европейских стран.

Для захоронения ОНАО используются слабо заглубленные и наземные сооружения,

Таблица 2. Данные по типам ПЗРО, используемым и проектируемым в ряде европейских стран

Тип ПЗРО	Категории РАО			
	ОНАО	КНАО, КСАО	ДНАО, ДСАО	ВАО, ОЯТ
Наземный	Швеция Франция Испания	Великобритания Франция Испания Венгрия Бельгия		
Подземный (до 100 м)		Швеция (1) Финляндия (1)	Франция (2)	
Глубинный			Франция (2) Бельгия (2) Швеция (1) Финляндия (1)	Швеция (1) Германия (4) Швейцария (2) Венгрия (1)
		Германия (3) Швейцария (2) Венгрия (1)	Германия (2) Швейцария (2) Венгрия (1)	

Примечания: 1 – скальные породы, 2 – глины, 3 – соляные формации, 4 – железорудная шахта. Курсивом выделены проектируемые ПЗРО

безопасность которых обеспечивается за счет создания защитных подстилающих и покрывающих экранов.

Захоронение КНАО и КСАО осуществляется в приповерхностных сооружениях как наземного, так и подземного типа, размещаемых на глубине до 100 м.

С момента создания первых наземных ПЗРО технологии захоронения РАО существенно изменились. Конструкции современных наземных ПЗРО предусматривают бетонные ограждающие конструкции, дренаж инфильтрационных вод и возможность извлечения упаковок (при необходимости), что фактически делает такие сооружения хранилищами на период активного контроля.

Подземные ПЗРО для захоронения КНАО и КСАО эксплуатируются в Швеции и Финляндии, в Германии и Венгрии. В Швейцарии планирует размещать короткоживущие отходы в глубинном ПЗРО.

Практика захоронения ДНАО, ДСАО, ВАО и ОЯТ на сегодняшний день отсутствует. Однако в большинстве европейских стран разработаны проекты глубинных ПЗРО для таких РАО. Как правило, глубинные ПЗРО рассчитаны на захоронение ДНАО и ДСАО в едином комплексе с ВАО и ОЯТ.

В качестве вмещающих пород для создания подземных и глубинных ПЗРО предполагается использовать скальные породы (Швеция, Финляндия, Венгрия), залежи глин (Франция, Бельгия, Германия, Швейцария) и соляные формации (Германия).

Краткий анализ технических решений, применяемых на существующих и проектируемых объектах окончательной изоляции РАО в европейских странах, показал многообразие подходов в технологиях захоронения и выявил общие тенденции, направленные на повышение безопасности захоронения РАО:

- отказ от слабозаглубленных сооружений для захоронения короткоживущих НАО и САО и переход либо на наземные, либо на подземные сооружения, создаваемые на глубине десятков и сотен метров;
- практически полный отказ от использования соляных формаций и явная тенденция на использование залежей глин в тех странах, где они имеются;
- использование технологий обратимого захоронения, позволяющих извлекать упаковки с РАО на стадиях активного контроля.

### Литература

1. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО / Н. С. Цебаковская, С. С. Уткин, И. В. Капырин. — М.: Комтехпринт, 2015. — 208 с.
2. Шведская система обращения с РАО и ОЯТ: обзор / Рыбальченко И. Л. — 2-е изд., испр. и доп. — Санкт-Петербург, 2008. — 85 с.

3. The industrial facility for grouping, storage and disposal. — URL: <https://www.andra.fr/download/andra-international-en/document/editions/380eva.pdf> (дата обращения 03.09.2018).

4. The Cires Facility in Morvilliers: from a VLL Waste Disposal Facility to the Development of Industrial Activities / P. Torres, B. Cahen, M. Dutzer // WM2015 Conference, USA, Arizona, March 15–19, 2015.

5. The centre de la manche disposal facility: entering into the institutional control period / P. Chino, F. Duret, S. Voinis // WM'99 Conference, February 28 — March 4, 1999

6. Waste acceptance policy and operational developments at the UK's DRIGG LLW disposal site / A. Coyle, P. D. Grimwood, W. J. Paul // Planning and operational of Low Level Waste Disposal Facilities, Symposium, Viena, June 17 – 21, 1996

7. ANDRA's Centre de l'Aube: Design, construction, operation of a state of the art surface disposal facility for low and intermediate level waste / J. M. Portier. — Report IAEA-CSP-6/C, 2001.

8. Lessons Learned From the Operation of a LILW National Disposal Centre: The Cabril and the Spanish Case / M Navarro, F Gómez, E. García // ASME 2009, 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Liverpool, UK, October 11–15, 2009.

9. Reference Design for a Near Surface Repository for Low- and Intermediate- Level Short Lived Radioactive Waste in Lithuania. SKB, SWECO International, Westinghouse Atom Joint Venture, LT NSR Final Project Report, 2002.

10. Engineered near surface disposal facility of the industrial complex for solid radwaste management at Chernobyl NPP / R. Ziehm, S. G. Pichurin // WM'03 Conference, February 23–27, 2003, Tucson, AZ.

11. The Belgian Program for Low and Intermediate Short Lived Waste Management: From 1985 to License Application / P. D. Preter, W. Wacquier, W. Cool // ASME 2013, 15th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management. — Brussels, Belgium, September 8–12, 2013.

12. The Long-term Radiological Safety of a Surface Disposal Facility for Low-level Waste in Belgium / NUCLEAR ENERGY AGENCY, France, 2012. — 98 p.

13. URL: <https://www.ondraf.be/le-stockage-en-surface-en-bref> (дата обращения 03.09.2018)

14. Nuclear waste management of the Olkiluoto and Loviisa power plants. Summary of the activities during 2011. Posiva Report, 2011 – 58 p.

15. International perspective on repositories for low-level waste. Report of SKB International AB / U. Bergstrom, K. Pers, Y. Almen, Sweden, December, 2011

16. Olkiluoto, the centre of finnish nuclear power expertise / URL: [https://www.tvo.fi/uploads/File/2009/TVO\\_yritysesite\\_2009\\_EN.pdf](https://www.tvo.fi/uploads/File/2009/TVO_yritysesite_2009_EN.pdf) (дата обращения 03.09.2018).

17. SFR – final repository for short lived radioactive waste // SKB.com URL: [http://www.skb.com/wp-content/uploads/2015/06/SFR-sammansatt\\_002.jpg](http://www.skb.com/wp-content/uploads/2015/06/SFR-sammansatt_002.jpg) (дата обращения 03.09.2018).

18. Balint Nos, Peter Molnar, Attila Baksay. Disposal of low and inter-mediate level waste in Hungary // Rudarsko-geološko-naftni zbornik, Zagreb. — 2012. — no. 24. — Pp. 81–85.
19. Project Opalinus Clay (2002) Demonstration of Disposal Feasibility for Spent Fuel, Vitrified High-Level Waste and Long-Lived Intermediate-Level Waste (Entsorgungsnachweis). — Switzerland: Nagra, 2002. Nagra Technical Report ISSN 1015-2636.
20. Disposal project for Low-Level Long-Lived Radioactive Waste in France / G. Ouzounian, O. Ozanam // WM 2009 Conference, March 1–5, 2009, Phoenix, AZ.
21. cigéo.com: Types of waste to be disposed of at Cigeo — URL: <http://www.cigeo.com/en/types-of-wastes-to-be-disposed-of-at-cigeo> (дата обращения 30.07.2018).
22. ONDRAF/NIRAS Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan. Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials, 2012. — 411 p.
23. SFL concept study. Main report / M. Elfing, L. Z. Evins, M. Gontier // Technical Report TR-13-14, SKB, December 2013. — 140 p.
24. URL: [http://2016.radioactivewastemanagement.org/images/slide/WIKBERG\\_Generic-site-specific.pdf](http://2016.radioactivewastemanagement.org/images/slide/WIKBERG_Generic-site-specific.pdf) (дата обращения 03.09.2018)
25. Final repository for spent nuclear fuel in granite the KBS-3v concept in Sweden and Finland / S. Petterson, B. Lonnerberg // International Conference Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository. — Prague, 16–18 June, 2008.
26. Safety case for license application for a final repository: The French example / F. Boissier, S. Voinis. 2013.
27. The Swiss concept for the disposal of spent fuel and vitrified HLW / T. Fries, A. Claudel, H. Weber // International Conference Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository. — Prague, 16–18 June, 2008.
28. M. Jobmann, A. Bebiolka, V. Burlaka and others. Safety assessment methodology for a German high-level waste repository in clay formations // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, № 9.

### Информация об авторах

Сорокин Валерий Трофимович, доктор технических наук, главный технолог АО «АТОМПРОЕКТ» (197183, Санкт-Петербург, ул. Савушкина, д. 82 лит. А), e-mail: vsorokin@atomproekt.com.

Павлов Дмитрий Игоревич, руководитель направления отдела по обращению с РАО и ООС Санкт-Петербургского филиала АО «ФЦНИВТ «СНПО «ЭЛЕРОН» — «ВНИПИЭТ» (197183, Санкт-Петербург, ул. Дибуновская, 55), e-mail: dipavlov@eleron.ru.

### Библиографическое описание данной статьи

Сорокин В. Т., Павлов Д. И. Технологии окончательной изоляции радиоактивных отходов: европейский опыт и тенденции // Радиоактивные отходы. — 2018. — № 4 (5). — С. 24–32.

## TECHNOLOGIES OF RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL: EUROPEAN EXPERIENCE AND TRENDS

Sorokin V. T.<sup>1</sup> Pavlov D. I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>JSC «ATOMPROEKT», Saint-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Saint-Petersburg branch of JSC «FCNIVT «SNPO «ELERON» - «VNIPIET», Saint-Petersburg, Russia

Article received 26 June 2018

*The article describes European experience of creation and operation disposal facilities for radioactive waste and trends in the development of disposal technologies*

**Key words:** short lived and long lived radioactive waste, very low level waste, high level waste, surface and near surface disposal facilities, deep geological disposal facilities.

### References

1. Cebakovskaya N. S., Utkin S. S., Kapyrin I. V. The overview of foreign practices of radwaste and spent fuel disposal / Moscow, Komtehprint Publ., 2015. 208 p. (In Russian).
2. Rybalchenko I. L. Swedish radioactive waste and spent fuel management system: the overview. — 2 edition, revised and updated. Saint-Petersburg, — 2008. 85 p.
3. The industrial facility for grouping, storage and disposal. Available at: <https://www.andra.fr/>

- download/andra-international-en/document/editions/380eva.pdf (accessed 03.09.2018).
4. Torres P., Cahen B., Dutzer M. The Cires Facility in Morvilliers: from a VLL Waste Disposal Facility to the Development of Industrial Activities. *WM2015 Conference*, USA, Arizona, March 15–19, 2015.
  5. Chino P., Duret F., Voinis S. The centre de la manche disposal facility: entering into the institutional control period. *WM'99 conference*. February 28 – march 4, 1999.
  6. Coyle A., Grimwood P. D., Paul W. J. Waste acceptance policy and operational developments at the UK's DRIGG LLW disposal site. *Planning and operational of Low Level Waste Disposal Facilities. Symposium*, Viena, June 17–21, 1996.
  7. Portier J. M. ANDRA's Centre de l'Aube: Design, construction, operation of a state of the art surface disposal facility for low and intermediate level waste. *Report IAEA-CSP-6/C*, 2001.
  8. Navarro M., Gómez F., García E. Lessons Learned From the Operation of a LILW National Disposal Centre: The Cabril and the Spanish Case. *ASME 2009, 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management*, Liverpool, UK, October 11–15, 2009.
  9. Reference Design for a Near Surface Repository for Low- and Intermediate- Level Short Lived Radioactive Waste in Lithuania. SKB, SWECO International, Westinghouse Atom Joint Venture, *LT NSR Final Project Report*, 2002.
  10. Ziehm R., Pichurin S. G. Engineered near surface disposal facility of the industrial complex for solid radwaste management at Chernobyl NPP. / *WM'03 Conference*, February 23–27, 2003, Tucson, AZ.
  11. Preter P.D., Wacquier W., Cool W. The Belgian Program for Low and Intermediate Short Lived Waste Management: From 1985 to License Application. *ASME 2013, 15th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management*, Brussels, Belgium, September 8–12, 2013.
  12. The Long-term Radiological Safety of a Surface Disposal Facility for Low-level Waste in Belgium. NUCLEAR ENERGY AGENCY, France, 2012. 98 p.
  13. Available at: <https://www.ondraf.be/le-stockage-en-surface-en-bref> (accessed 03.09.2018).
  14. Nuclear waste management of the Olkiluoto and Loviisa power plants. *Summary of the activities during 2011. Posiva Report*, 2011. 58 p.
  15. Bergstrom U., Pers K., Almen Y. International perspective on repositories for low-level waste. *Report of SKB International AB*, Sweden, December, 2011.
  16. Olkiluoto, the centre of finnish nuclear power expertise. Available at: [https://www.tvo.fi/uploads/File/2009/TVO\\_yritysesite\\_2009\\_EN.pdf](https://www.tvo.fi/uploads/File/2009/TVO_yritysesite_2009_EN.pdf) (accessed 03.09.2018).
  17. SFR — final repository for short lived radioactive waste. Available at: [http://www.skb.com/wp-content/uploads/2015/06/SFR-sammansatt\\_002.jpg](http://www.skb.com/wp-content/uploads/2015/06/SFR-sammansatt_002.jpg) (accessed 03.09.2018).
  18. Balint Nos, Peter Molnar, Attila Baksay Disposal of low and intermediate level waste in Hungary. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. Zagreb, 2012, no. 24, pp. 81–85.
  19. Project Opalinus Clay (2002) Demonstration of Disposal Feasibility for Spent Fuel, Vitrified High-Level Waste and Long-Lived Intermediate-Level Waste (Entsorgungsnachweis). Switzerland: Nagra, 2002. Nagra Technical Report ISSN 1015-2636.
  20. Ouzounian G., Ozanam O. Disposal project for Low-Level Long-Lived Radioactive Waste in France, *WM 2009 Conference*, March 1–5, 2009, Phoenix, AZ.
  21. cigéo.com: Types of waste to be disposed of at Cigeo. Available at: <http://www.cigeo.com/en/types-of-wastes-to-be-disposed-of-at-cigeo> (accessed 30.07.2018).
  22. ONDRAF/NIRAS Research, Development and Demonstration (RD&D) Plan. Belgian Agency for Radioactive Waste and Enriched Fissile Materials, 2012. 411 p.
  23. Elfing M., Evins L. Z., Gontier M. SFL concept study. Main report. *Technical Report TR-13-14*, SKB, December 2013. 140 p.
  24. Available at: [http://2016.radioactivewastemanagement.org/images/slide/WIKBERG\\_Generic-site-specific.pdf](http://2016.radioactivewastemanagement.org/images/slide/WIKBERG_Generic-site-specific.pdf) (accessed 03.09.2018).
  25. Petterson S., Lonnerberg B. Final repository for spent nuclear fuel in granite the KBS-3v concept in Sweden and Finland. *International Conference Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository*. Prague, 16–18 June, 2008.
  26. Boissier F., Voinis S. Safety case for license application for a final repository: The French example. 2013.
  27. Fries T., Claudel A., Weber H. The Swiss concept for the disposal of spent fuel and vitrified HLW. *International Conference Underground Disposal Unit Design & Emplacement Processes for a Deep Geological Repository*. Prague, 16–18 June, 2008.
  28. Jobmann M., Bebiolka A., Burlaka V. and others. Safety assessment methodology for a German high-level waste repository in clay formations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2017, no. 9.

### Information about the authors

Sorokin Valery Trofimovich, Ph.D, Chief Technology JSC ATOMPROEKT (82-A Savushkina str., St-Petersburg, Russia), e-mail: vsorokin@atomproekt.com.

Pavlov Dmitriy Igorevich, Team Leader of Saint-Petersburg branch of JSC «FCNIVT «SNPO «ELERON» — «VNIPIET», e-mail: dipavlov@eleron.ru.

### Bibliographic description

Sorokin V. T., Pavlov D. I. Technologies of radioactive waste disposal: European experience and trends. *Radioactive Waste*, 2018, no. 4(5), pp. 24–32. (In Russian).