

Лучшие зарубежные практики
вывода из эксплуатации ядерных
установок и реабилитации
загрязненных территорий

Том 1

**Лучшие зарубежные практики
вывода из эксплуатации
ядерных установок
и реабилитации
загрязненных территорий**

Том 1

Москва
2017

УДК 621.039 (58:7)

Книга подготовлена авторским коллективом в составе: Н.С.Цебаковская (все гл.), С.С.Уткин (все гл.), А.Ю.Иванов (разд. 1.3.7), В.К.Сахаров (разд. 2.1, 3.1, 4.1), К.Е.Полунин (разд. 1.3, 2.2).

Лучшие зарубежные практики вывода из эксплуатации ядерных установок и реабилитации загрязненных территорий. — Под общей редакцией И.И.Линге и А.А.Абрамова. — 2017 г. — 336 с.

Вниманию читателя предлагается обзор «Лучшие зарубежные практики вывода из эксплуатации ядерных установок и реабилитации загрязненных территорий». В книге рассмотрены вопросы формирования и решения проблем ядерного наследия в четырех зарубежных странах: США, Великобритании, Франции и Канаде.

По каждой из этих стран представлен обзор деятельности и исторических практик обращения с радиоактивными отходами, повлекших за собой загрязнение окружающей среды и формирование целого комплекса проблем ядерного наследия, рассмотрено современное состояние нормативно-правового регулирования вопросов вывода из эксплуатации и реабилитации загрязненных территорий, а также история развития природоохранного законодательства в США, приведены оценки объемов ядерного наследия, в том числе в контексте прошлых и будущих финансовых обязательств, описаны основные положения действующих государственных программ и разработанных стратегий по ликвидации объектов ядерного наследия и реабилитации загрязненных территорий, обозначены ключевые мероприятия как уже реализованные, так и запланированные в рамках данных программ, проанализированы подходы и средства, применяемые в США в целях оптимизации и повышения эффективности организации работ по наследию. Отдельная глава книги посвящена вопросам организации взаимодействия с общественностью при реализации подобных проектов.

Книга в первую очередь адресована ученым и специалистам атомной науки и промышленности, но может быть интересна и более широкому кругу читателей, интересующихся вопросами безопасного решения проблемы ядерного наследия.

Оглавление

Предисловие заместителя директора по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО Госкорпорации «Росатом» А.А. Абрамова	6
Предисловие заместителя директора ИБРАЭ РАН И.И. Линге	10
Предисловие партнера и управляющего директора Московского офиса компании BCG К.Е. Полунина	13
Сокращения	14
Введение	16
Глава 1. Формирование ядерного наследия США и реализация программ по его ликвидации	23
§ 1.1. История формирования ядерного оружейного комплекса США	25
1.1.1. История развития ядерного оружейного комплекса	26
1.1.2. Ок-Ридж	32
История создания и ключевые объекты	32
Исторические практики обращения с РАО и загрязнение окружающей среды	38
Мероприятия по восстановлению качества окружающей среды и выводу из эксплуатации установок Ок-Риджа	44
1.1.3. Хэнфорд	65
История создания и ключевые объекты	66
Исторические практики обращения с РАО и загрязнение окружающей среды	72
Мероприятия по реабилитации территории ХЯК	79
1.1.4. Саванна-Ривер	106
История создания и ключевые объекты	106
Историческая практика обращения с РАО и загрязнение окружающей среды	111
Мероприятия по восстановлению качества окружающей среды и выводу из эксплуатации установок Саванна-Ривер	114
1.1.5. Лос-Аламос	126
История создания и ключевые объекты	126
Исторические практики обращения с РАО и загрязнение окружающей среды	129
Мероприятия по восстановлению качества окружающей среды и выводу из эксплуатации установок Лос-Аламаса	132
1.1.6. Ферналд	138
История создания и ключевые объекты	139
Исторические практики обращения с РАО и загрязнение окружающей среды	139
Мероприятия по реабилитации территории Ферналда	140

1.1.7. Роки-Флэтс.....	141
История создания и ключевые объекты.....	141
Исторические практики обращения с РАО и загрязнение окружающей среды	141
Мероприятия по реабилитации территории Роки-Флэтс.....	145
1.1.8. Маунд Сайт.....	145
История создания и загрязнение окружающей среды.....	146
§ 1.2. Природоохранное законодательство США.....	148
1.2.1. Закон о национальной политике в области охраны окружающей среды и функции EPA	148
1.2.2. Закон о восстановлении и сохранении ресурсов	150
1.2.3. Закон о контроле над токсичными веществами	154
1.2.4. Закон о Суперфонде.....	155
§ 1.3. Программа министерства энергетики США по решению проблем ядерного наследия.....	170
1.3.1. Меры министерства энергетики по реабилитации территорий ядерного комплекса.....	170
1.3.2. Эволюция природоохранного законодательства в свете программы DOE по решению проблем ядерного наследия.....	173
1.3.3. Роль SARA и FFCA в формировании программы DOE по решению проблем ядерного наследия	179
1.3.4. Первые шаги в реализации государственной программы DOE по ликвидации ядерного наследия	181
1.3.5. Основные компоненты ядерного наследия США	188
1.3.6. Очистка загрязненных компонентов окружающей среды: почва, донные отложения, грунтовые воды	199
1.3.7. Вывод из эксплуатации и ликвидация ядерных установок	220
Американская программа по выводу из эксплуатации энергетических реакторов.....	223
Организация работ по выводу из эксплуатации.....	233
Финансирование работ по выводу из эксплуатации.....	237
Состояние работ на площадках с выводимыми из эксплуатации энергетическими реакторами	242
1.3.8. Материалы реестра	254
§ 1.4. Закрытие и перепрофилирование площадок ЯОК США	271
1.4.1. Ферналд.....	274
Переход от производственной деятельности к реализации проекта по реабилитации	275
Выполнение работ и их результаты	278
1.4.2. Роки-Флэтс.....	281
Разработка программы по очистке территории Роки-Флэтс.....	282
Мероприятия по очистке и рекультивации территории Роки-Флэтс.....	283

1.4.3. Маунд Сайт	289
Разработка программы по очистке территории Маунд Сайт	290
Работы по очистке территории Маунд Сайт	290
§ 1.5. Комплексные работы на крупных промышленных площадках	294
1.5.1. Процедура принятия решений по проектам реабилитации и очистки крупных промышленных площадок	294
1.5.2. Концептуальная модель площадки как основа принятия решений по реабилитации	304
1.5.3. Использование КМП в проектах по очистке грунтовых вод и почвы на крупных площадках	315
1.5.4. Применение «шаблонного» подхода в проектах по реабилитации ядерного наследия	319
Список литературы к главе 1	325

Предисловие А. А. Абрамова, заместителя директора по государственной политике в области РАО, ОЯТ и ВЭ ЯРОО Госкорпорации по атомной энергии «Росатом»

Тематика монографии непосредственно связана с важным направлением деятельности Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности. Это ликвидация накопленных проблем, получивших название «ядерного наследия», и создание механизмов прекращения их генерации в области обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ), радиоактивными отходами (РАО) и выводом из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов (ВЭ ЯРОО). Государственная политика в данной области предусматривает два взаимосвязанных направления деятельности.

Во-первых, создание систем по завершающим стадиям жизненного цикла материалов и объектов ядерной техники путем формирования современной нормативно-правовой и инфраструктурной базы. Решающая роль в этом направлении принадлежит органам государственного управления в области использования атомной энергии и органам государственного регулирования безопасности при использовании атомной энергии.

Во-вторых, ликвидация «ядерного наследия» путем проведения практических работ, главным образом в рамках федеральных целевых программ. Ключевая роль в этом направлении принадлежит государственным заказчикам – органам государственного управления в области использования атомной энергии.

Оба направления реализуются в рамках взятых Российской Федерацией обязательств, вытекающих из Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. Объединенная конвенция предусматривает приверженность единым международно признанным подходам в отношении безопасности (статья 4) как в текущей операционной деятельности, так и в отношении накопленных проблем (так называемые существующие установки). В этой области Объединенная конвенция предусматривает существенно большую гибкость, которая реально применяется в различных странах, когда по многим объектам принимаются тщательно обоснованные по безопасности и эффективные решения. Таким образом, зарубежный опыт интересен и с точки зрения обеспечения безопасности при обращении с вновь образующимися ОЯТ и РАО, и с точки зрения организации работ по выводу из эксплуатации объектов и реабилитации территорий.

О масштабе и характере нашей деятельности по формированию систем. Основная из них – единая государственная система обращения с РАО. Её создание законодательно обеспечено Федеральным законом № 190-ФЗ «Об обращении с РАО ...». Система охватывает более тысячи организаций, в том числе 50 крупных, при деятельности которых образуются РАО, и почти тысячу объектов хранения РАО. СГУК РВ и РАО позволяет контролировать все образования и перемещения РАО между организациями.

В отношении ОЯТ также реализуются масштабные работы – развиваются мощности по переработке и хранению, идет масштабное перемещение накопленного ОЯТ на переработку и безопасное долговременное хранение. Система обращения с ОЯТ гораздо более компактна – в её гражданской части задействовано менее 50 организаций, в том числе две базовых, в которых ведется переработка и долговременное хранение ОЯТ (ФГУП «ПО «Маяк» и ФГУП «ГХК»). ОЯТ, как и все другие ядерные материалы, находится под строжайшим контролем. Режим ответственности в этой области реализован через право собственности. Накопленное до 2007 года ОЯТ находится в федеральной собственности, а вновь образующееся – в собственности юридических лиц.

Развитие отраслевой системы по выводу из эксплуатации до последнего времени ориентировалось на масштабирование лучших технологий. В рамках нашей деятельности мы рассматриваем на уровне планирования подготовку к выводу из эксплуатации более 2000 объектов. Часть объектов также находится в федеральной собственности, часть – в собственности юридических лиц. Но это разграничение права собственности сформировалось без учета фактической ответственности и анализа возможности реализации ответственности за вывод из эксплуатации. Замечу, что в подавляющем большинстве случаев как по назначению, так и по продолжительности эксплуатация осуществлялась в интересах государственных нужд. Например, в собственности АО «Концерн «Росэнергоатом» находятся энергоблоки атомных станций, эксплуатация которых была прекращена задолго до образования Концерна. Таким образом, в этой области задачи определения наилучшей формы взаимодействия с государством еще предстоит решить. В конечном виде создаваемые системы должны инициировать и организовать регулярную работу эксплуатирующих организаций в режиме, полностью исключающем накопление проблем. Общие черты такого режима следующие – РАО должны перерабатываться и передаваться на захоронение, ОЯТ – также перерабатываться, обеспечивая возврат в топливный цикл регенерированных ядерных материалов, или размещаться на безопасное хранение. В части вывода из эксплуатации, в существующих условиях ограничения бюджетного финансирования и финансового состояния эксплуатирующих организаций, по-видимому, единственным вариантом является четкое разграничение финансовой ответственности за безопасное содержание объектов и вывод из эксплуатации, исходя из принципа времени использования.

О масштабе работ по наследию. Принципиально важно, что в части объектов наследия уже почти 20 лет реализуются масштабные федеральные, международные и отраслевые программы:

1. Федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года» (ФЦП ЯРБ-2), являющаяся продолжением аналогичной программы, реализованной в 2008–2015 годах. В рамках этих программ были задействованы более 300 объектов.

2. Подпрограмма «Промышленная утилизация атомных подводных лодок (АПЛ), подводных кораблей с ядерными энергетическими установками, судов атомного технологического обслуживания и реабилитация радиационно-опасных объектов на 2011–2015 годы и на период до 2020 года», являющаяся продолжением работ, начатых в 1999–2000 годах, в результате которой будут утилизированы все АПЛ, являющиеся наследием.

3. Глобальное сотрудничество (Северо-Запад и Дальний Восток), международная программа по РИТЭГам с 2001 года.

4. Межгосударственная целевая программа «Рекультивация территорий государств – членов ЕврАзЭС, подвергшихся воздействию уранодобывающих производств» (с 2013 года).

Все программы успешно реализуются и находятся на разных стадиях. Некоторые из них – в начальной фазе (4), в других случаях – программы преодолели экватор или близки к завершению (2, 3, РИТЭГи), в третьих – вышли на долговременную фазу (1). Во всех случаях актуальна задача повышения эффективности, причем не только технологической, но и организационно-управленческой. В особой мере это касается самой крупной – ФЦП ЯРБ-2.

Таким образом, обстоятельства, сопутствовавшие появлению настоящей монографии по зарубежному опыту, достаточно этапные. Это не только простой, понятный и постоянно проявляемый интерес к зарубежным аналогам в части состава объектов и работ, характерный для всех видов высокотехнологичной деятельности. Отдельные примеры такого анализа описаны в рамках ранее вышедших томов издания «Проблемы ядерного наследия и пути их решения». Сегодняшняя работа – это попытка собрать исходные данные и более скрупулёзно осмыслить крупномасштабный зарубежный опыт уже на новом этапе развития работ в данном направлении. Осмыслить не глазами новичка, а уже имея за плечами почти десятилетний и в целом успешный опыт работ по всем типам объектов ядерного наследия. Задачи более эффективной реализации достаточно ясных, но напряженных планов на длительный период чрезвычайно актуальны и прежде всего относятся к ФЦП ЯРБ-2. Причина этого – опять-таки в наступающем этапе развития атомной энергетики и промышленности России. Самые острые риски в сфере обеспечения ядерной и радиационной безопасности сняты в период 2008–2015 годов. Но надвигаются иные, связанные с остановом в ближайшие 15–20 лет значительного количества объектов и объемом затрат на их безопасное содержание и последующий вывод из эксплуатации. Необходимость содержания обусловлена двумя факторами:

- работы по выводу должны проводиться непрерывно в рационально высоких темпах на протяжении 5–7 лет (по крупным объектам) и, соответственно, требуют относительно больших объемов финансирования, что определяет необходимость периода «ожидания очереди», в течение которого должна быть полностью обеспечена безопасность объекта;

- во многих случаях выдержка приводит к улучшению радиационных условий ведения работ. Этот фактор надо использовать, но нельзя его и переоценивать. Общие закономерности и зарубежный опыт однозначно свидетельствуют, что диапазон выдержки до 15–30 лет близок к тому рубежу, когда иные процессы, связанные с деградацией систем и оборудования, приводят к удорожанию вывода из эксплуатации.

Практически единственный выход из данной ситуации – глубокое переосмысление состава работ по содержанию остановленных объектов, которое должно касаться всех аспектов, начиная от оптимизации использования необходимых систем обеспечения безопасности и нормативной базы, устанавливающей соответствующие требования, до вопросов управления и мотивации персонала. Имеющийся опыт содержания объектов эксплуатирующими организациями в отсутствие ясных перспектив показывает одно – расходы на содержание объектов постоянно растут даже в тех случаях, когда факторы ядерной опасности перестают существовать, а радиационный потенциал объекта многократно уменьшается.

В этом смысле предлагаемый материал, охватывающий несколько десятков площадок в 4 странах и представляющий практически все типы ядерных установок, позволяет отметить ряд некоторых общих черт, присущих программам по ликвидации ядерного наследия в рассмотренных странах, прежде всего в США и Великобритании:

- Функции управления деятельностью по ликвидации ядерного наследия переданы специально учрежденным организациям – «национальным операторам по наследию»: в Великобритании – это Управление по выводу из эксплуатации ядерных объектов (NDA), в США – Экологическое управление при Министерстве энергетики (DOE-EM). При этом NDA и DOE-EM непосредственно не ведут работы на площадках. У каждой площадки есть оператор, а выполнением работ занимаются подрядчики, которые могут представлять собой как независимые частные, так и находящиеся в государственной собственности компании. В свою очередь, основные функции DOE-EM и NDA заключаются в стратегическом планировании программ по наследию, организации и мониторингу ведения работ, экспертной и технической поддержке, а также управлению финансированием различных проектов, включенных в программы.

- Осуществление программ по ликвидации наследия требует колоссальных денежных вложений. Так, объемы наследия и в США, и в Великобритании достаточно четко определены, а в соответствии с ними были установлены и размеры финансовых обязательств по программам: в Великобритании стоимость работ, включенных в программу NDA, оценивается в 115 млрд фунтов стерлингов, хотя в реальности из-за огромного количества неопределенностей, связанных с реализацией включенных в программу мероприятий, эта цифра может возрасти до 220 млрд фунтов стерлингов; а общая сумма будущих обязательств DOE-EM по наследию оценивается в 370 млрд долларов, при том что к настоящему времени фактические затраты по проектам, уже реализованным в США, превышают 200 млрд долларов.

- Программы по наследию рассчитаны на достаточно длительную перспективу (порядка ста лет). Так, в планах NDA значится завершение всех работ по программе наследия к 2120 году, а в США реализацию программы планируется полностью завершить к концу 2060 годов (начало программы – 1989 год).

- И в США, и в Великобритании были сформированы нормативно-правовые базы, определяющие принципы и режим разграничения ответственности за объекты наследия, включенные в соответствующие программы. В США в основу положено федеральное природоохранное законодательство, которое применимо ко всем объектам независимо от собственника. В Великобритании наследие определено в соответствии с видами деятельности, типами установок и их операторами. При этом положения нормативно-правовой базы в этих странах дорабатываются по мере появления такой необходимости при осуществлении конкретных работ по наследию.

В заключение хочу подчеркнуть, что целевая аудитория издания – это не только специалисты, занятые проблематикой вывода из эксплуатации, но и руководители эксплуатирующих организаций, которые должны отчетливо понимать, что проблема вывода из эксплуатации из второстепенной и обременительной для задач эксплуатации может трансформироваться в решающее с экономической точки зрения обстоятельство, которое может подорвать финансовое благополучие организации.

Предисловие И. И. Линге, заместителя директора ИБРАЭ РАН

Вывод из эксплуатации объектов ядерной техники – сравнительно новое направление деятельности, актуальность развития которого уже высока и будет возрастать еще на протяжении нескольких десятилетий. До недавнего времени она была достаточно слабо представлена в отечественной научной литературе – в сфере вывода из эксплуатации на рубеже веков можно было отметить только такую работу, как «Радиационная безопасность при выводе из эксплуатации ядерных установок гражданского и военного назначения» (Енговатов И.А., Машкович В.П. с соавт., 1999 г.). Собственно работы по выводу из эксплуатации в этот период в атомной промышленности проводились в штучных количествах и, как правило, только в целях модернизации ядерных установок. Среди таких работ следует отметить извлечение корпуса тяжеловодного реактора и монтаж в шахте нового корпуса реактора («ПО «Маяк»), ввод в эксплуатацию исследовательского реактора МР с использованием зданий и сооружений реактора РТФ (Курчатовский Институт, 1963 г.), исследовательские реакторы серии РБТ (НИИАР, 1983–1984 гг.). Выполнение уникальных по сложности работ тем не менее не давало опыта по собственно выводу из эксплуатации. В части утилизации АПЛ в этот период также шла наработка первичного опыта. К настоящему времени ситуация разительным образом изменилась. Прежде всего, по объему практических работ по выводу из эксплуатации и смежным темам – обращению с ОЯТ и РАО и реабилитации загрязненных территорий. В организационном и нормативно-правовом оформлении этой деятельности также произошли серьезные изменения. Кратко отмечу некоторые из них:

- Созданы нормативно-правовые предпосылки для исключения накопления проблем в будущем, в том числе закон по РАО. В федеральном законе «Об использовании атомной энергии» появилось понятие стадий жизненного цикла. В отношении последней стадии жизненного цикла радиоактивных материалов – радиоактивных отходов – принят специальный закон. Обобщающее наименование этих новых видов деятельности – так называемых завершающих стадий жизненного цикла – отразилось на организационной структуре Госкорпорации «Росатом». В Госкорпорации появились специализированные подразделения и научно-технические советы и конкретные должностные лица, отвечающие за решение этой проблемы. Среди них подразделения Дивизиона ЗСЖЦ Госкорпорации и Директор по госполитике в сфере обращения с ОЯТ, РАО и ВЭ ЯРОО.

- Государством выделяются значимые средства на решение проблем в сфере ЗСЖЦ – это и ФЦП ЯРБ, и программа по утилизации АПЛ.

- Эксплуатирующие организации, ранее все являвшиеся федеральными государственными унитарными предприятиями, в большинстве случаев стали акционерными обществами с соответствующими обязательствами в отношении находящихся в собственности объектами. Публичная отчетность, в том числе по объему накопленных обязательств – одно из проявлений этих изменений.

На этом фоне востребованность в детальной и широкой картине общемирового опыта работ по выводу из эксплуатации объектов ядерной техники существенно возросла. Нельзя не отметить многочисленные обзоры МАГАТЭ. Их польза и положительная роль безусловны, но сама технология подготовки таких публикаций предполагает сильную иссушенность документов. Их составители, как правило, пытаются освободить читателей от большого количества деталей и насытить документ максимальным объемом обобщенных данных по накопленным практикам. Это и плюс, и минус, поскольку для практических специалистов важны детали.

Уже сейчас можно назвать несколько книг, в которых такие материалы давались. Это «Проблемы ядерного наследия и пути их решения» (2010–2014 гг.), «Особые РАО» (2015 г.), «Обзор зарубежных практик захоронения РАО» (2015 г.) и ряд других работ. Однако общение со специалистами показывало, что интерес к объемному и более детальному анализу накопленного опыта не иссякал, а даже укреплялся. Очевидная причина – рост востребованности и произошедшие в данной сфере изменения.

Предлагаемый читателю объемный труд является первой попыткой капитального анализа зарубежного опыта. Надеюсь, что книга во многом ответит многолетним чаяниям большого количества практических специалистов, попавших в орбиту деятельности дивизиона ЗСЖЦ. В работе представлено множество интересных проектов как реализуемых, так и уже осуществленных за рубежом, среди которых можно отметить: опыт США в проведении работ по перепрофилированию площадок крупных ядерных комплексов (Рокки-Флэтс, Ферналд), позволивших полностью реабилитировать территории, в прошлом подвергшиеся значительному радиоактивному и химическому загрязнению, с созданием на них национальных заповедников (см. разделы 1.4.1, 1.4.2); внедрение одной из самых масштабных в мировой практике систем очистки грунтовых вод, действующую в Хэнфорде и занимающую территорию, по площади равную двум футбольным полям (см. раздел 1.1.3); программы работ по решению проблемы обеспечения безопасности резервуарных парков, состоящих из десятков подземных емкостей для хранения ВАО в Хэнфорде и Саванна-Ривер (см. разделы 1.1.3 и 1.1.4); организацию работ во Франции по контролю над применением материала пустой породы, образовавшейся в результате добычи урана и переданной в общественное пользование (в том числе в целях строительства дорог, зданий) до утверждения официальной процедуры цессии такого материала в 1984 году (см. раздел 3.2.3); систему приоритизации площадок по уровню риска, являющуюся одной из составляющих системы комплексной оценки, использованной при разработке стратегического мастер-плана по решению проблем ядерного наследия в Великобритании (см. раздел 2.3).

Следует отметить, что за рубежом к решению проблем ликвидации объектов наследия подходят достаточно решительно и радикально, при этом стремясь в полной мере оптимизировать и повысить эффективность расходования выделяемых на эти цели ресурсов (см. раздел 1.5). И яркий пример тому – США. В этой стране государственная программа по наследию была запущена в 1989 году, когда уровень общественной озабоченности вопросами загрязнения окружающей среды установками ядерного оружейного комплекса США достиг своего пика. Тогда была проведена оперативная оценка объема обязательств по наследию и составлен перечень из 110 площадок Министерства энергетики, включенных в программу работ по реабилитации, а к 1997 году были получены первые достаточно достоверные оценки по всем компонентам американского ядерного наследия.

К настоящему времени из 110 площадок работы полностью закончены на 94, а это значит, что на этих площадках завершены все мероприятия по дезактивации и

выводу из эксплуатации всех имеющихся установок, за исключением надзорных мероприятий и мониторинга; выполнены работы по устранению последствий выбросов и сбросов загрязняющих веществ, а условия на площадках соответствуют утвержденным требованиям и нормам; все источники загрязнения грунтовых вод локализованы либо осуществляется долгосрочная программа по очистке грунтовых вод и мониторингу их состояния; ядерные материалы и ОЯТ находятся в стабильном состоянии и/или были помещены на безопасное долгосрочное хранение; отходы «ядерного наследия» (за исключением ВАО) были окончательно изолированы с соблюдением всех требований безопасности. При этом территории трех из 94 площадок были полностью реабилитированы (Ферналд, Роки-Флэте, Маунд Сайт), что позволило использовать их по иному целевому назначению для создания национальных заповедников и технопарка.

Важная особенность зарубежного опыта – он однозначно свидетельствует в пользу того, что безопасный вывод из эксплуатации может осуществляться «новыми» организациями, то есть организациями, не принимавшими участия в проектировании, сооружении и эксплуатации объекта. Так, первым шагом на пути реализации подобных программ в США и Великобритании стало учреждение «национальных операторов по наследию»: в 1989 году такая организация была создана при Министерстве энергетики США (Экологическое управление, DOE-EM). Ему было поручено планирование и осуществление деятельности по ликвидации объектов ядерного наследия и очистке загрязненных территорий, находящихся в ведении Министерства. В 2005 году аналогичное решение было принято и правительством Великобритании, учредившим Управление по выводу из эксплуатации ядерных объектов Великобритании (NDA). Эта тенденция получает развитие и в Российской Федерации. Дивизион ЗСЖЦ стал заказчиком работ по выводу из эксплуатации, а в ряде случаев стал ответственным и за содержание таких объектов. В качестве примеров можно привести остановленные реакторные производства, находящие на балансе ОДЦ УГР. Выделение совокупности остановленных объектов быстро актуализирует понимание необходимости сокращения обременительных и возрастающих расходов на их содержание в безопасном состоянии. Такое содержание должно быть переориентировано с линейного поддержания эксплуатации оборудования, систем и элементов остановленного объекта на сокращение количества поддерживаемых систем безопасности и объема технического обслуживания с внесением соответствующих изменений в эксплуатационную документацию и в конечном счете, на его вывод из эксплуатации.

В завершение отмечу, что достаточно быстрая реализация давно задуманной и подспудно подготавливаемой объемной монографии удалась благодаря пониманию необходимости развития системы организации работ в сфере ЗСЖЦ. В 2016 году Госкорпорацией «Росатом» был объявлен конкурс на разработку предложений по модификации системы работ по ядерно и радиационно опасным объектам наследия. Несколькими позициями технического задания предусматривался анализ зарубежных практик на примере США и Великобритании. Эти материалы и составляют основной объем монографии. Материалы по Франции и Канаде – из уже упомянутого задела и также представляют интерес.

Еще одна важная особенность выполненной по заказу «Росатома» работы. Её целью были не только технологические аспекты, но и анализ практик управления, в том числе и государственного, и корпоративного. По этой причине в работе и в подготовке данного издания приняли участие специалисты московского офиса ведущей международной компании «The Boston Consulting Group», специализирующейся на управленческом консалтинге.

Издание ориентировано на работающих в сфере атомной энергетике и промышленности специалистов.

**Предисловие К. Е. Полунина,
партнера и управляющего директора Московского офиса
Бостон Консалтинг Групп**

С момента зарождения ядерной отрасли в мире осуществлялось масштабное строительство ядерных объектов, в том числе в оборонных целях. Эти объекты в процессе и по окончании срока своего использования сформировали «ядерное наследие» – совокупность объектов, бремя ликвидации которых лежит на государстве. Например, 110 площадок в США и 17 площадок в Великобритании относятся к ядерному наследию, для ликвидации которого эти страны уже создали крупномасштабные программы.

Атомная отрасль в США, Великобритании и Франции уже в течение многих лет проводят успешную работу по ликвидации объектов ядерного наследия, тогда как Россия находится только на начальном этапе этого сложного пути. Поэтому анализ зарубежного опыта поможет России более объективно оценить текущую ситуацию, рассмотреть лучшие практики и ключевые ошибки других стран по ликвидации объектов наследия для формирования собственной эффективной программы ликвидации объектов наследия.

При подготовке монографии был проведен детальный анализ зарубежного опыта США, Великобритании, Франции и Канады по управлению объектами ядерного наследия. В частности, зарубежный опыт показывает, что оператор, занимающийся ликвидацией ЯРОО, не обязательно должен выбираться из числа организаций, принимающих участие в ПИР, СМР и эксплуатации объектов сегодня, а может быть новой для отрасли организацией. Также основываясь на опыте США и Великобритании, операторы могут не осуществлять непосредственные работы по ликвидации объектов наследия, а выполнять роль «управленца» и «стратега»: разработка стратегии ликвидации ЯРОО, контрактование и контроль ЕРС подрядчиков. Эти и многие другие факты, рассмотренные в монографии, позволят принять более взвешенные решения при управлении объектами наследия в России.

Монография может быть полезна как руководителям и специалистам ГК «Росатом», занимающихся вопросами вывода из эксплуатации объектов наследия, так и руководителям государственных органов для понимания необходимости эволюции управления выводом из эксплуатации, без которой невозможно дальнейшее развитие отрасли и обеспечение радиационной безопасности в России.

Сокращения

- ВАО – высокоактивные радиоактивные отходы
- ВЭ – вывод из эксплуатации
- ЖРО – жидкие радиоактивные отходы
- ИИИ – источники ионизирующих излучений
- КМП – концептуальная модель площадки
- НАО – низкоактивные радиоактивные отходы
- ОНЛ – Окриджская национальная лаборатория
- ОС – окружающая среда
- ОЯТ – отработавшее ядерное топливо
- ПХД – полихлорированные дифенилы
- РАО – радиоактивные отходы
- РХ – резервуары-хранилища
- ТРУ РАО – трансурановые радиоактивные отходы
- ТРУ – трансурановые элементы
- ТХВТ – Технологический парк Восточного Теннесси в Ок-Ридже
- ТЭО – технико-экономическое обоснование
- ЦНБ – Центр национальной безопасности в Ок-Ридже
- ЯМ – ядерные материалы
- ЯН – ядерное наследие
- АЕС – Комиссия по атомной энергии
- CERCLA – Закон о действиях в отношении окружающей среды, компенсации и ответственности или Закон о Суперфонде
- DOE – Министерство энергетики США
- DOE-EM – Экологическое управление при Министерстве энергетики
- EPA – Агентство по охране окружающей среды
- ERA – Закон о реорганизации в области энергетики
- ERDA – Управление по исследованиям и разработкам в области энергетики

FDA – Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов

FFCA – Закон о соответствии федеральных объектов нормативным требованиям.

FFTF – Специальная рабочая группа по федеральным объектам

FOIA – Федеральный закон о свободном доступе к информации

HRS – система ранжирования опасности

NCP – Национальный план действий

NDA – Управление по выводу из эксплуатации ядерных объектов Великобритании

NEPA – Закон о национальной политике в области охраны окружающей среды

NPDES – Национальная система предотвращения сброса загрязняющих веществ

NPL – Национальный перечень приоритетных объектов

NRC – Комиссия по ядерному регулированию

RCRA – Закон о сохранении и восстановлении ресурсов

SARA – Superfund Amendments and Reauthorization Act, Закон о продлении срока действия и внесении поправок в программу Суперфонда

Введение

Знание имеющегося опыта – неотъемлемое условие достижения хороших результатов, а анализ опыта, накопленного крупнейшими зарубежными операторами в сфере ликвидации объектов ядерного наследия, позволяет более осознанно взглянуть на решение актуальной на сегодняшний день для российской атомной отрасли задачи по оптимизации системы обращения с ядерно и радиационно опасными объектами наследия, что, в свою очередь, позволило бы повысить эффективность управления программными мероприятиями федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016–2020 годы и на период до 2030 года».

Уже на протяжении многих лет работы по выводу из эксплуатации ядерных объектов и реабилитации загрязненных территорий, в том числе объектов ядерного наследия, активно идут во множестве стран. Это, прежде всего, США, Великобритания, Франция, Канада, в то время как в России они лишь набирают обороты. По этой причине детальный анализ зарубежного опыта как основы для сопоставления с ситуацией, сложившейся в нашей стране, как в части применяемых технологий, организации процесса управления, нормативно-правового регулирования, так и принципов разграничения ответственности за объекты наследия и схемы финансирования содержания объектов в безопасном состоянии и их ликвидации является важной частью работ по совершенствованию отечественных подходов, применяемых в сфере вывода из эксплуатации и ликвидации объектов ядерного наследия.

В работе представлен обзор национальных программ по ликвидации объектов ядерного наследия четырех стран: США, Великобритании, Франции и Канады. Причем анализу опыта США в сфере решения проблем ядерного наследия посвящено более половины представленных в книге материалов: ведь программа по ликвидации ядерного наследия, осуществляемая в этой стране, признана самой масштабной и дорогостоящей в мировой практике. По оценкам Министерства энергетики США, на реализацию всего комплекса мер по выводу из эксплуатации ядерных установок и очистке загрязненных территорий предстоит потратить порядка 370 млрд долларов, при том что на текущий момент фактические затраты по уже реализованным проектам превышают 200 млрд долларов. Но и результаты, достигнутые к настоящему времени, также впечатляют: из 110 площадок, изначально включенных в программу, полностью реабилитировано 94.

Структура изложения материала по каждой стране достаточно однотипна. Первый раздел каждой главы посвящен истории становления ядерного оружейного комплекса страны с описанием ключевых площадок и установок, задействованных в ядерных программах. Так, в США запуск масштабной программы по созданию ядерного оружия совпал с началом Второй мировой войны. В то время осознание мощнейшего

потенциала такого оружия и всех преимуществ, которыми могла бы обладать ядерная держава, заставили США бросить колоссальные силы на осуществление Манхэттенского проекта, стоившего американской казне невероятной по меркам того времени суммы – более двух миллиардов долларов (1939–1945 гг.). До августа 1949 года США оставались единственной в мире ядерной державой. Однако успешное испытание первой советской атомной бомбы пошатнуло позиции США и, ознаменовав начало гонки ядерных вооружений, послужило мощным стимулом к ускоренному расширению американского ядерного оружейного комплекса, разросшегося в итоге до 110 площадок, расположенных в 31 штате, а также в Пуэрто-Рико, на Маршалловых островах, атолле Джонстон и острове Рождества в Тихом океане.

Как и в США, становление атомной отрасли Великобритании пришлось на 1940-е. Решение о запуске собственной программы ядерных вооружений было принято правительством Великобритании после окончания Второй мировой войны. Для этих целей был создан комплекс Селлафилд, миссия которого состояла в производстве и переработке оружейного плутония. Изначально этот сектор был ориентирован лишь на создание ядерного оружия, но уже к середине 1950-х потенциал использования энергии атома в мирных целях был полностью осознан, что дало мощный толчок ускоренному развитию атомно-энергетических технологий в Соединенном Королевстве. При этом до 1972 года в Великобритании фактически не существовало разделения между военными и гражданскими ядерными программами – первые оксид-магниевого реакторы одновременно производили электроэнергию и нарабатывали оружейные материалы.

Во Франции становление ядерного оружейного комплекса пришлось на послевоенные годы – в октябре 1945 года, всего спустя два месяца после бомбардировки Хиросимы и Нагасаки, временное правительство Франции во главе с генералом Шарлем де Голлем учредило Комиссариат по атомной энергии (СЕА), поручив ему заниматься вопросами использования атомной энергии в науке, промышленности, а также в сфере национальной безопасности. В течение последующих девяти лет, вплоть до конца 1954 года, в стране было создано сразу несколько исследовательских лабораторий, первой из которых стала лаборатория Фонтене-о-Роз в пригороде Парижа, организовано опытное производство для подготовки специалистов и отработки технологий получения и обработки специальных ядерных материалов. В июле 1958 года указом генерала де Голля в составе Комиссариата по атомной энергии был учрежден Департамент военных программ. Тем самым Франция открыто заявила о своих намерениях создать собственную атомную бомбу.

Канада в отличие от остальных стран, представленных в обзоре, не имела собственной программы создания ядерного оружия, однако и в этой стране сформировался собственный уникальный комплекс проблем, связанных с ликвидацией объектов ядерного наследия, явившихся итогом осуществления программ научных исследований и разработок, проводившихся в оборонных и мирных целях Национальным комитетом по исследованиям (National Research Council) в период с 1944 по 1952 год и в дальнейшем AECL (Акционерное общество по атомной энергии Канады) и ставших причиной образования больших количеств радиоактивных и химических отходов и масштабного загрязнения окружающей среды. Более детально вопрос загрязнения окружающей среды на объектах ядерного наследия, а также исторических практик обращения с РАО рассмотрен во второй части первого раздела каждой главы.

В целом, если проследить историю развития ядерного оружейного комплекса США, то среди всего множества площадок можно выделить четыре ключевые, занимавшие центральное место в реализации американской ядерной программы: Хэнфорд, Ок-Ридж, Саванна-Ривер и Лос-Аламос. Именно эти площадки подверглись наиболее значительному радиоактивному и химическому загрязнению и содержат наибольшее количество крупных объектов, подлежащих ликвидации. В прошлом темпы производства требовали оперативного обращения с РАО, а вопросы обеспечения защиты окружающей среды и недопущения загрязнения водных систем неизбежно уходили на второй план. Результатом такого пренебрежительного отношения к вопросам защиты окружающей среды и обеспечения безопасности стало накопление значительных количеств как радиоактивных, так и химических отходов, большая часть которых, как правило, размещалась в пунктах хранения на территории промышленных площадок. Кроме того, вследствие утечек и аварийных сбросов значительному загрязнению подверглись почва, поверхностные и грунтовые воды.

Из всех площадок ЯОК США около 40 % всего радиоактивного загрязнения приходится на Хэнфордский ядерный комплекс. В Хэнфорде высокоактивные отходы радиохимического производства хранились в расположенных под землей бетонных резервуарах, изнутри облицованных углеродистой сталью («резервуарные парки»^{*}). В период с 1944 года и до конца 1980 гг. установки комплекса произвели в общей сложности около $2 \cdot 10^6$ м³ жидких ВАО. В результате выпаривания, сброса отходов на почву, химической переработки и утечки отходов из резервуаров-хранилищ фактический объем жидких ВАО сократился приблизительно на 90 % и составил всего $204 \cdot 10^3$ м³. Их суммарная активность оценивалась приблизительно в $7,2 \cdot 10^{18}$ Бк, а содержание химических загрязнителей превышало 220 000 тонн.

В общей сложности на территории Хэнфорда расположено 18 резервуарных парков, состоящих из 177 подземных емкостей. В период с 1943–1964 гг. было сооружено 149 резервуаров объемом 210–3 800 м³ с однослойной оболочкой из углеродистой стали и расчетным сроком службы 20 лет. Известно, что 67 из них впоследствии дали течь, в результате в окружающую среду было выброшено более 3 800 м³ ЖРО.

Низкоактивные ЖРО и охлаждающая реакторная жидкость закачивались в специальные осадительные бассейны и пруды. Поскольку большая часть таких ЖРО содержала значительные количества короткоживущих радионуклидов, то выдержка сбросных вод в промежуточных бассейнах приводила к уменьшению их активности до 150–200 тысяч раз. После выдержки загрязненная вода сбрасывалась обратно в реку. Хранение ТРО осуществлялось в неглубоких траншеях или внутри специальных установок. Всего территория Хэнфордского комплекса насчитывала более 1 600 объектов, содержащих РАО.

Ок-Ридж стал уникальным объектом ЯОК США, где была реализована практика закачки жидких САО активностью до $3,7 \cdot 10^{16}$ Бк в гидроразрывные установки. Суть практики заключалась в том, что посредством нагнетания гидравлического давления в пластах сланцевой глины создавались условия для их растрескивания. Щелочной раствор САО смешивался с твердой смесью цемента и специальных присадок и под давлением закачивался в водонепроницаемые сланцевые формации на глубину 200–300 м.

^{*} аналогичные системы хранения ВАО применялись в Саванна-Ривер и Айдахо.

Переходя от описания проблем загрязнения окружающей среды, возникших в ходе реализации прошлой деятельности на площадках, к обзору комплексных программ по ликвидации объектов ядерного наследия и реабилитации территорий, подвергшихся радиоактивному и химическому загрязнению, в рамках второго раздела каждой главы, рассмотрены вопросы нормативно-правового обеспечения данной деятельности.

Следует отметить, что ни в одной из рассмотренных в обзоре стран, термин «ядерное наследие» не зафиксирован на уровне законодательства. Вместе с тем в США, Великобритании и Канаде существуют достаточно однозначные формулировки, описывающие, что именно под этим термином следует понимать. Так, например, в Великобритании к объектам ядерного наследия следует относить:

- все площадки и установки, которые были введены в эксплуатацию в период с 1940-х по 1960-е гг. в целях осуществления государственных научно-исследовательских программ и до учреждения NDA эксплуатируемые UKAEA и BNFL, а также все отходы, материалы и ОЯТ, образовавшиеся в ходе осуществления таких НИОКР;
- все ядерные реакторы типа Магнокс, разработанные и сооруженные в 1960–1970-е гг., находящиеся в государственной собственности и в прошлом эксплуатируемые компанией BNFL; заводы и установки по переработке Магнокс-ОЯТ, находящиеся на территории Селлафилдского комплекса, и все отходы и материалы с ними связанные.

В Канаде термином «ядерное наследие» принято обозначать комплекс проблем, возникших в ходе осуществления программ научных исследований и разработок, проводимых в оборонных и мирных целях Национальным комитетом по исследованиям (National Research Council) в период с 1944 по 1952 год и в дальнейшем AECL (с 1952 года по настоящее время). Большая часть работ по выводу из эксплуатации реализуется в рамках так называемой Программы ответственности за ядерное наследие («Nuclear legacy liabilities program» или NLLP), инициированной в 2006 году.

Во Франции не существует однозначной формулировки термина «ядерное наследие». Вместе с тем существует отдельное понятие «пунктов захоронения исторических отходов», обращение с которыми также осуществляется в рамках работ по ядерному наследию. Пункты захоронения исторических отходов – это не находящиеся в ведении Andra* объекты, где в прошлом производители РАО или лица, ответственные за такие РАО, осуществили захоронение отходов (за исключением хвостов и хвостохранилищ) в нарушение современных требований и норм обращения с РАО. К данной категории объектов относят 13 пунктов захоронения нерадиоактивных отходов, в которых были размещены ОНАО; отходы, захороненные на площадках гражданских или военных базовых ядерных установок, или в их окрестностях** и пункты захоронения технологически обогащённых природных радиоактивных материалов.

Между тем в Канаде термином «исторические отходы» принято обозначать низкоактивные отходы, прошлая практика обращения с которыми (1930–1950 гг.) в

* Национальное агентство по обращению с радиоактивными отходами Франции.

** согласно положениям национального законодательства, действующим с 1992 года, все ОНАО подлежат окончательной изоляции в пункте централизованного захоронения в Морвилье.

настоящее время не считается приемлемой. При этом текущий собственник «исторических РАО» не может быть привлечен к ответственности за обращение с этими отходами, поэтому ответственность за долгосрочное обращение с ними была возложена на федеральное правительство. Реестр исторических отходов в Канаде по большей части представлен вторичными продуктами переработки смоляных урановых руд, содержащими уран и радий, а также грунтом, преимущественно загрязненным радием, ураном, мышьяком и тяжелыми металлами. Более 90 % всего объема исторических отходов приходится на район Порт Хоуп в провинции Онтарио. Именно здесь в 1930–1950-е гг. функционировали предприятия по переработке урановых руд, в том числе крупнейший завод корпорации Краун. На территории этого района приходится порядка 2 млн кубометров исторических отходов.

В третьем разделе каждой главы представлена подробная информация по программам ликвидации ядерного наследия (оценка объемов ядерного наследия, достигнутые к настоящему времени результаты и планы на будущее) и особенностям организации деятельности специальных организаций, ответственных за их исполнение – операторов по ядерному наследию, учрежденных в США и Великобритании.

Так, например, в США первым шагом на пути реализации государственной программы по ликвидации ядерного наследия, запущенной в 1989 году, стало учреждение в составе Министерства энергетики США специального отдела, которому предстояло оценить масштаб радиоактивного и химического загрязнения на площадках Министерства и определить приоритетность проведения работ на различных объектах. Так при Министерстве энергетики США было создано Экологическое управление (Office of Environmental Management, DOE-EM). Таким образом, на Экологическое управление была возложена ответственность за выполнение полного цикла работ по очистке загрязненных территорий и выводу из эксплуатации объектов ядерного наследия.

В Великобритании национальный оператор по ядерному наследию (NDA) был создан в 2005 году в соответствии с положениями Закона об энергии (Energy Act), вступившего в силу в 2004 году. Такое решение правительство Великобритании было вынуждено принять после того, как компании British Energy (энергогенерирующая компания Великобритании) и BNFL (компания, занимающаяся производством и переработкой топлива) недооценили объем обязательств по наследию в десятки раз, оказавшись в результате на грани банкротства.

В Канаде, как и во Франции, не было учреждено специально уполномоченных организаций, на которые была бы возложена ответственность за ликвидацию ядерного наследия. В Канаде эти функции выполняет Акционерное общество по атомной энергии Канады (AECL), а большая часть работ по выводу из эксплуатации ядерных объектов Канады реализуется в рамках запущенной AECL в 2006 году Программы ответственности за ядерное наследие («Nuclear legacy liabilities program» или NLLP). Во Франции нет единого оператора, а ответственность за проведение работ в этой сфере лежит на операторах конкретных площадок, крупнейшими из которых являются CEA, Argeva и EDF.

Как уже было отмечено выше, больше половины материалов книги посвящено программе ликвидации ядерного наследия в США. Поэтому структура первой главы несколько отличается от остальных. Отдельный раздел первой главы посвящен теме перепрофилирования или конверсии площадок, когда после проведения соответствующих мероприятий по очистке и реабилитации территории могут быть использованы

по иному целевому назначению. На данный момент реализация подобных программ завершена на трех бывших военных объектах США, каждый из которых теперь используется по иному целевому назначению. Так, производственная площадка и санитарно-защитная зона завода Ферналд, на котором раньше изготавливали продукцию из высокочистого металлического урана, превратилась в национальный заповедник, где также расположен пункт захоронения НАО, образовавшихся при проведении работ по очистке территории. Роки-Флэтс – некогда один из самых секретных объектов ядерного оружейного комплекса США, миссия которого заключалась в производстве плутониевых детонаторов для ядерных боеголовок, также получил статус национального заповедника. Лаборатория Маунд Сайт была трансформирована в неядерный инновационный технопарк *Mound Advanced Technology Center*, где располагаются офисы компаний, занимающихся разработкой перспективных технологий в области энергетики, обработки материалов и защиты окружающей среды.

Все семь американских площадок, представленные в обзоре, несомненно, относятся к категории сложных, где работы приходилось проводить одновременно по большому количеству объектов. Накопленный Министерством энергетики США опыт позволил разработать целый ряд механизмов и методик, обеспечивающих оптимизацию процесса принятия решений по реабилитации таких сложных площадок. Этой теме посвящен последний раздел первой главы, в котором были проанализированы особенности построения процедуры принятия решений по отдельным объектам в пределах одной крупной площадки и определению степени приоритетности проведения работ по каждому объекту.

Кроме того, накопленный США опыт в сфере реабилитации и очистки радиационно и химически загрязненных площадок позволил Министерству энергетики США разработать обобщенный подход, благодаря которому на основании схожести характеристик разных площадок или же особенностей загрязнения окружающей среды на разных объектах в пределах одной площадки можно существенно упростить разработку соответствующих стратегий реабилитации (так называемый «шаблонный» подход).

Еще одно важное направление работ DOE, касающееся в том числе и проведения работ на крупных площадках, – это целый комплекс исследований, выполненных Междоштатным советом по технологиям и вопросам регулирования (*Interstate Technology & Regulatory Council*), результаты которых были положены в основу стратегии оптимизации процесса реабилитации (принятие решений по реабилитации на основе «концептуальной модели площадки»).

Также при подготовке материалов по США не была оставлена без внимания проблема вывода из эксплуатации американских энергетических реакторов, хотя данная категория ядерных установок и не относится к объектам ядерного наследия. Между тем, на сегодняшний день общая стоимость работ, включенных в данную программу, оценивается в сумму свыше 100 млрд \$. При этом в режиме окончательного останова, в процессе вывода из эксплуатации или в режиме безопасного сохранения в США сегодня находится 19 энергетических реакторных установок, ликвидировано – 15 энергоблоков.

Наряду с опытом США, Великобритании, Франции и Канады в области ликвидации ядерного наследия в книге отдельно рассматривается вопрос взаимодействия с общественностью при осуществлении подобных проектов. В последней главе мо-

нографии описана эволюция механизмов взаимодействия с общественностью при реализации проектов по выводу из эксплуатации, очистке и реабилитации загрязненных территорий объектов ядерного наследия. Следует отметить, что за последние два десятилетия в мире коренным образом изменилось представление о роли общественного мнения и уровне вовлеченности населения в самые разнообразные государственные и негосударственные проекты, связанные с тематикой защиты окружающей среды. В 1990 гг. столь резкие изменения негативно сказались на темпах реализации программ по обращению с радиоактивными отходами: во многих странах отрасль оказалась не готова решать проблемы, связанные с недовольством широкой общественности в целом и протестами местных жителей на конкретных площадках в частности. Ведь до этого основное внимание специалистов, работающих в сфере вывода из эксплуатации, реабилитации и обращения с РАО, было сосредоточено на сугубо технических вопросах, которые, как правило, решались между операторами ядерных установок и регулирующими органами. Местных жителей привлекали к участию лишь на заключительных стадиях таких проектов, когда все основные решения уже были приняты.

В качестве примеров применения современного подхода к организации взаимодействия с общественностью в обзоре рассмотрены проекты по реабилитации Хэнфордского ядерного комплекса в США и комплекса Даунрей в Великобритании.

В заключении книги кратко описаны ключевые особенности программ по ликвидации ядерного наследия, реализуемых в США, Великобритании, Франции и Канаде, а также изложены основные результаты, достигнутые к настоящему времени, и планы по завершению работ.

Глава 1. Формирование ядерного наследия США и реализация программ по его ликвидации

Ок-Ридж

Хэнфорд

Саванна-Ривер

Лос-Аламос

Ферналд

Роки-Флэтс

Маунд Сайт



§ 1.1. История формирования ядерного оружейного комплекса США

Запуск масштабной программы по созданию ядерного оружия в США совпал с началом Второй мировой войны. Понятно, что осознание мощнейшего потенциала такого оружия и всех преимуществ, которыми могла бы обладать ядерная держава, заставили США бросить колоссальные силы на осуществление Манхэттенского проекта, стоившего американской казне невероятной по меркам того времени суммы – более двух миллиардов долларов (1939–1945 гг.). Основным толчком для запуска проекта стали доклад Лео Сцилларда и письмо Альберта Эйнштейна, адресованные в августе 1939 года президенту США Франклину Рузвельту. Они выражали свою озабоченность по поводу активных исследований явления ядерной цепной реакции, проводимых нацистской Германией, результаты которых могли привести «к созданию нового типа мощнейшего оружия массового поражения». Рузвельт отнесся к этим обращениям с большим вниманием, вскоре по его приказу был создан Урановый комитет (S-1 Uranium Committee). На совещании, проведенном 21 октября 1939 года, комитет доложил Рузвельту, что использование урана позволит создать оружие, обладающее разрушительной силой, значительно превосходящей все военные разработки прошлого. Несмотря на это, фактически до 1941 года проект носил чисто исследовательский характер. Лишь 9 октября 1941 года с утверждением государственной ядерной программы США темпы работ по созданию атомной бомбы ускорились. Проект был назван в честь специального управления, на которое и была возложена данная миссия, – Манхэттенское опытно-конструкторское управление во главе с военным инженером полковником Лесли Гровсом. Работа над Манхэттенским проектом шла по трем основным направлениям: исследования изотопов урана, исследования плутония, разработка оптимального проекта корпуса бомбы.

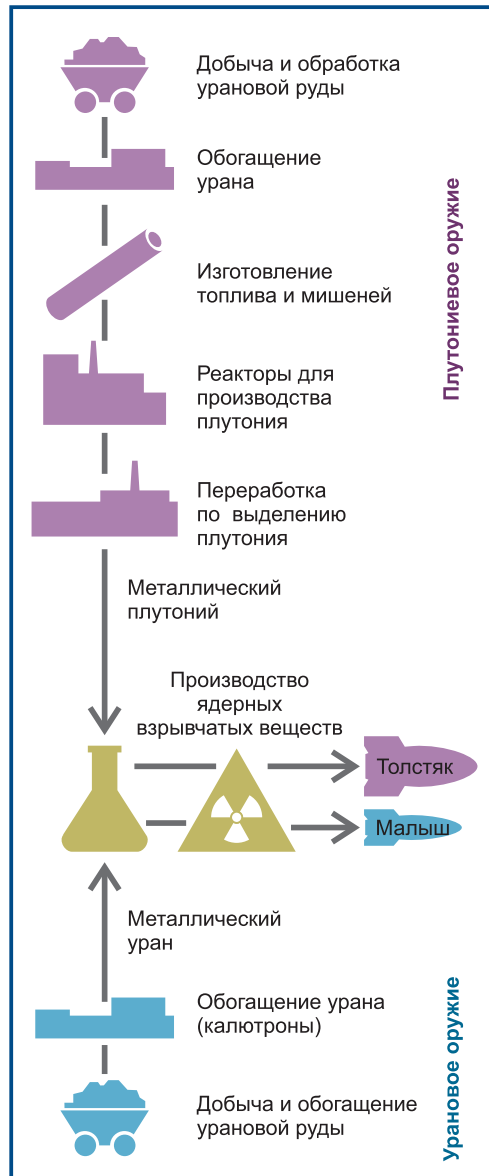


Рис. 1.1. Роль Хэнфорда, Ок-Риджа и Лос-Аламоса на этапе становления ЯОК США

1.1.1. История развития ядерного оружейного комплекса

Начало формированию ядерного оружейного комплекса США было положено в 1943 году, когда на трех площадках в Хэнфорде, Ок-Ридже и Лос-Аламосе стартовали работы по созданию первой в мире атомной бомбы (рис. 1.1). Ядерный реактор В в Хэнфорде производил облучение урановых мишеней с целью наработки оружейного плутония. Здесь же на заводе Т выполнялась их химическая обработка*, после чего выделенный металлический плутоний отправляли в Лос-Аламос. В это время в Ок-Ридже на 1152 калютронах силами 22 000 рабочих круглые сутки осуществлялась экстракция и обогащение ^{235}U для получения металлического урана. Отсюда его транспортировали в Лос-Аламос, где выполнялась окончательная обработка оружейных материалов, разработка конструкции и сборка компонентов атомной бомбы, а также проводились ядерные испытания. Именно сюда поступил металлический плутоний из Хэнфорда и металлический уран из Ок-Риджа, использованный в производстве первых американских атомных бомб, сброшенных на Хиросиму (урановая бомба «Малыш») и Нагасаки (плутониевая бомба «Толстяк») [1].

До августа 1949 года США оставались единственной в мире ядерной державой. Однако успешное испытание первой советской атомной бомбы пошатнуло позиции США, и, ознаменовав начало гонки ядерных вооружений, послужило мощным стимулом к ускоренному расширению американского ядерно оружейного комплекса, разросшегося в итоге до 110 площадок, расположенных в 31 штате, а также в Пуэрто-Рико, на Маршалловых островах, атолле Джонстон и острове Рождества в Тихом океане [1].

В целом по назначению все объекты ЯОК США можно разделить на восемь категорий, основные из которых представлены в табл. 1.1 и на рис. 1.2 [2, 3].

Как и в СССР, ускоренная реализация государственных задач по созданию ядерного оружия в США привела к накоплению проблем в основном на завершающих стадиях жизненного цикла ядерных технологий. Для описания такого комплекса проблем принято использовать термин «ядерное наследие», под которым подразумевают четыре основных компонента [4]:

- отходы, в том числе ВАО, трансурановые РАО, низкоактивные РАО, другие опасные отходы, а также вторичные материалы, признаваемые РАО в соответствии с частью 11 закона «Об атомной энергии» США от 1954 года и последующими поправками к нему;
- остановленные ядерные установки, в прошлом использовавшиеся для производства ядерного оружия, дальнейшая эксплуатация которых не предусмотрена, в связи с чем по ним запланированы работы по дезактивации и выводу из эксплуатации;
- материалы реестра – это любые неиспользуемые материалы, хранящиеся в установках DOE, которые не были отнесены к категории отходов или к «материалам запаса», необходимым для обеспечения национальной безопасности страны. Под словом «неиспользуемый» понимается то, что такие материалы не нашли при-

* до ввода в эксплуатацию завода Т химическая обработка облученных мишеней осуществлялась в Лос-Аламосе

менения в текущих программах DOE, график использования ресурсов для которых рассчитывается на два года вперед;

- загрязненные компоненты окружающей среды, в том числе почва, грунтовые и поверхностные воды, донные отложения, загрязненный строительный мусор, обломочные породы и другие материалы.

В итоге к 1989 году на момент начала реализации американской программы по выводу из эксплуатации, восстановлению качества окружающей среды и рекультивации загрязненных земель, признанной самой масштабной в мировой практике, американским специалистам предстояло решить целый ряд невероятно сложных задач [5]:

- осуществить обращение с более чем 2 млн м³ РАО, в том числе с НАО, смешанными, трансурановыми и высокоактивными радиоактивными отходами;
- осуществить обращение с более чем 500 000 м³ ВАО, хранящимися в громадных стареющих подземных резервуарах, треть из которых на момент начала работ по реабилитации уже дала течь;
- провести дезактивацию и ликвидацию сотен крупных радиоактивно загрязненных зданий и сооружений (реакторов, обогатительных и радиохимических заводов, пунктов хранения и лабораторий);
- стабилизировать и рекультивировать площадки тысяч брошенных урановых рудников и хвостохранилищ, содержащих около 20 млн тонн РАО;
- произвести очистку грунтовых вод и почвы (свыше 3,7 млрд м³);
- осуществить обращение с 730 000 т материалов реакторного производства, в том числе с сотнями тонн оружейных материалов, содержащего высокообогащенный уран и плутоний, а также с более чем 20 000 радиоактивными источниками, когда-то использовавшимися в медицине, промышленности и науке.

Среди целого ряда факторов, определивших столь значительные масштабы ядерного наследия, следует выделить несколько основных [2]:

- производственные процессы сами по себе являлись неизбежным источником образования значительных объемов отходов различных категорий;
- в течение нескольких десятилетий во главу угла ставились высокие темпы производства ядерных материалов, а вопросам обеспечения безопасности и защиты окружающей среды не уделялось должного внимания;
- отсутствие опыта и нехватка объективных знаний о возможных последствиях осуществляемой деятельности для окружающей среды, в том числе пренебрежение архивацией данных и составлением реестров захораниваемых отходов, из-за чего были частично утрачены знания о местах захоронения РАО и их составе;
- секретный характер реализуемой деятельности исключал возможность независимого контроля, в том числе и со стороны общественности.

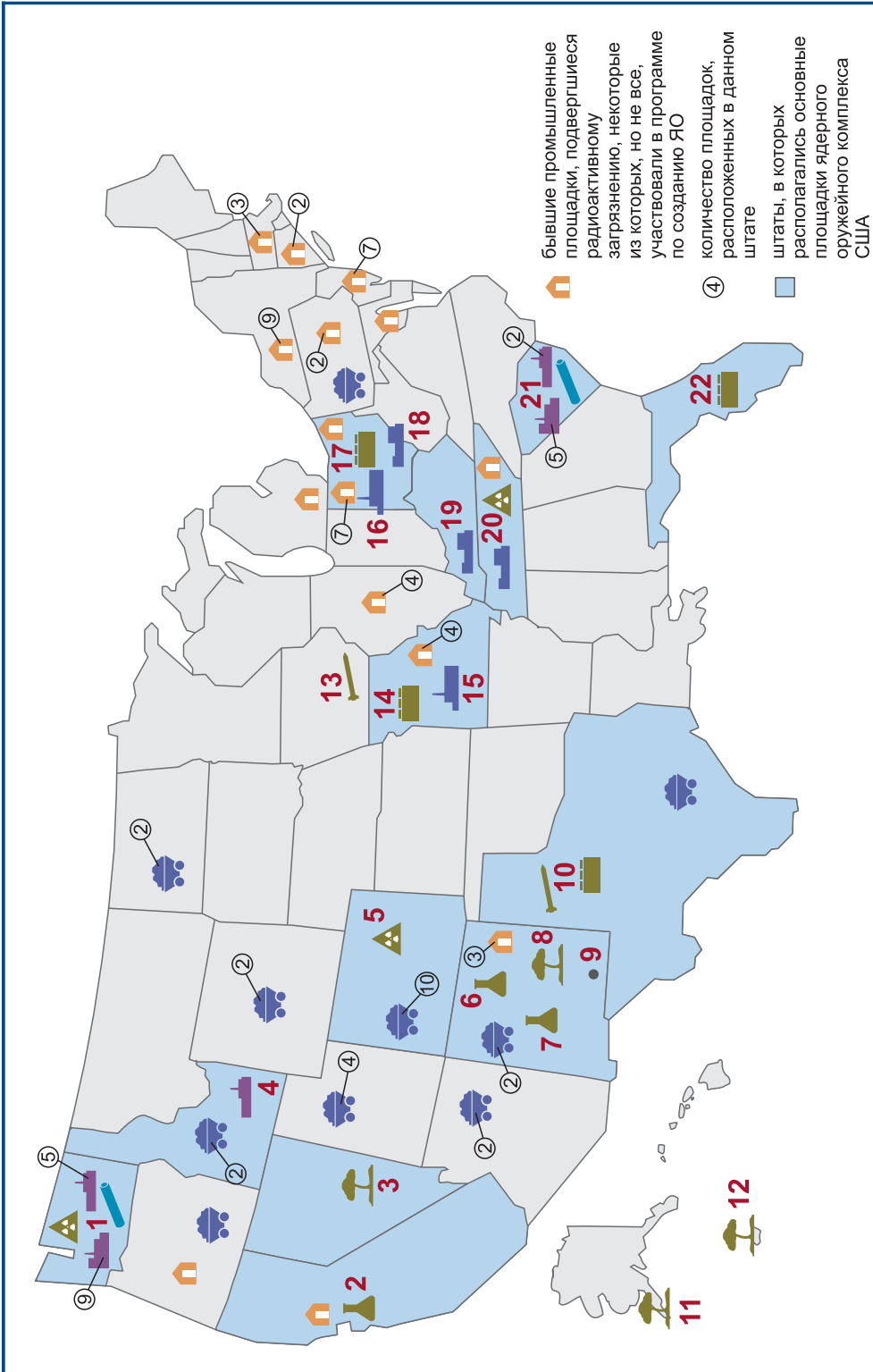
На сегодняшний день ежегодные затраты Министерства энергетики на реализацию программы по очистке площадок ЯОК составляют в среднем около 6 млрд долларов, а общая сумма обязательств DOE по природоохранной деятельности оценивается в 370 млрд долларов (см. § 1.3) [4, 6].

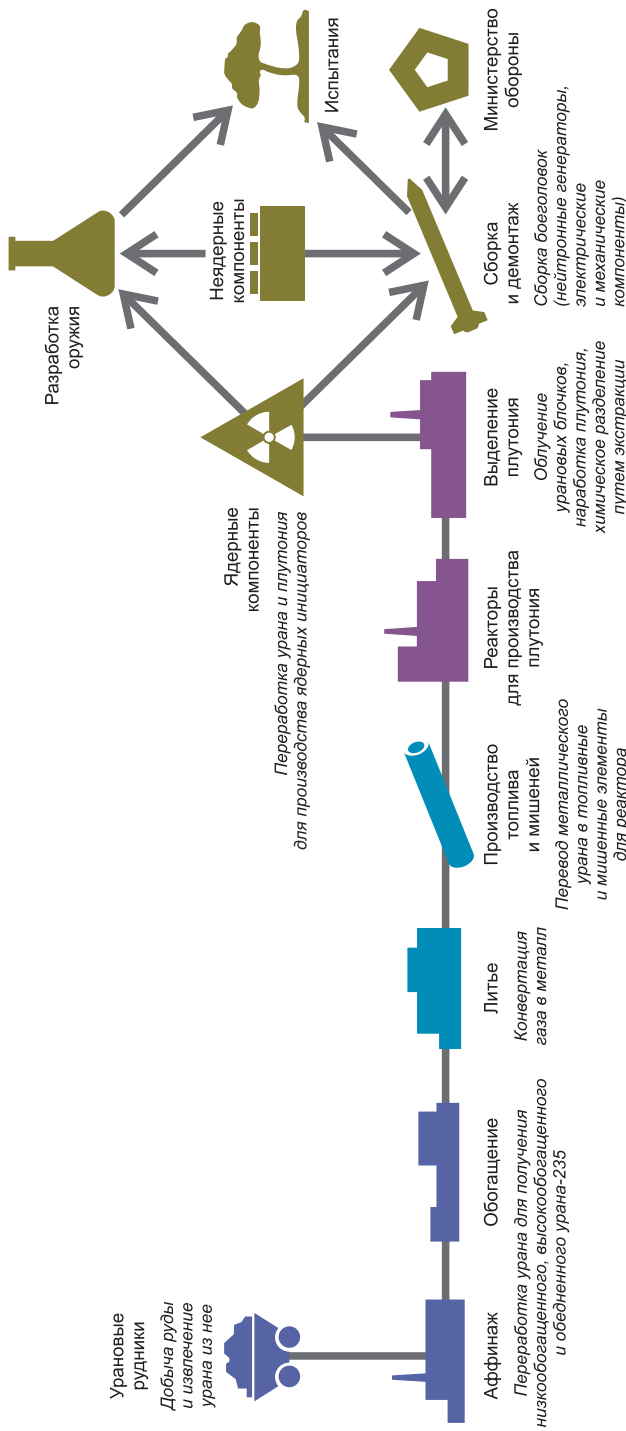
В целом, если проследить за историей развития ЯОК США, то среди всего множества площадок можно выделить четыре промышленных комплекса, занимавших центральное место в реализации американской ядерной программы: Хэнфорд, Ок-Ридж, Саванна-Ривер и Лос-Аламос. Именно эти площадки подверглись наиболее значительному радиоактивному загрязнению и включают наибольшее количество крупных объектов, подлежащих ликвидации. Однако и менее крупные предприятия (Ферналд, Рокки-Флэтс, Маунт Сайт) потребовали в силу разных обстоятельств принятия решений о ликвидации.

Табл. 1.1. Этапы создания ядерного оружия и основные площадки ЯОК США

Этап	Операции	Главные площадки
1	Добыча, обработка и аффинаж урана	<p>Добыча и обработка: Belfield, Bowman (Северная Дакота); Lowman (Айдахо), Lakeview (Орегон), Riverton, Spook (Вайоминг), Salt Lake City, Green River, Monticello Site, Mexican Hat (Юта), Grand Junction Mill Tailing Site, Maybell, Old & New Rifle, Naturita, Slick Rock, Gunnison, Durango (Колорадо), Tuba Site, Monument Valley (Аризона), Shiprock, Ambrosia Lake (Нью-Мексико), Falls City (Техас);</p> <p>Опробирование руды: Ферналд и Миддлсекс;</p> <p>Аффинаж: Ферналд и Уэлдон Спринг; Ок-Ридж комплекс Y-12 (компоненты оружия и реакторное топливо высокого обогащения); Ок-Ридж завод K-25, газодиффузионные заводы в Падьюке и Портсмуте (производство топлива на основе UF_6).</p>
2	Разделение изотопов	<p>Уран: Ок-Ридж завод K-25, газодиффузионные заводы в Падьюке и Портсмуте;</p> <p>Литий: Ок-Ридж комплекс Y-12 – заводы COLEX и ELEX;</p> <p>Тяжелая вода: завод по производству тяжелой воды в Саванна-Ривер и завод Дана.</p>
3	Изготовление ТВЭЛов и мишеней	<p>ВОУ: зона 300М Саванна-Ривер;</p> <p>Уран: Ферналд, Аштабула, зона 300 Хэнфорд, зона 300М Саванна-Ривер;</p> <p>Обогащенный литий: Ок-Ридж Y-12 и Саванна-Ривер зона М.</p>
4	Реакторное производство	<p>Хэнфорд: реакторы B, D, F, H, DR, C, KW, KE и N;</p> <p>Саванна-Ривер: реакторы R, P, K, L, и C.</p>
5	Радиохимия	<p>Оружейный плутоний: Хэнфорд зоны 200 East& West (PUREX, REDOX, заводы T и B, 231-Z); Саванна-Ривер (комплекс F);</p> <p>Переработка урана: Хэнфорд (PUREX, REDOX, завод U); Саванна-Ривер (каньон H), Национальная техническая лаборатория Айдахо (завод по химической переработке);</p> <p>Тритий: Саванна-Ривер.</p>

Этап	Операции	Главные площадки
6	Производство компонентов оружия	<p><u>Плутоний:</u> Роки-Флэтс, Хэнфорд (установка для аффинажа плутония), Лос-Аламос (ТА-21 и ТА-55).</p> <p><u>Высокообогащенный и обедненный уран:</u> Ок-Ридж комплекс Y-12 и Роки-Флэтс;</p> <p><u>Тритий (в т. ч. восстановление и переработка):</u> Маунд, Саванна-Ривер;</p> <p><u>Дейтерид лития-VI (в т. ч. восстановление и переработка):</u> Ок-Ридж комплекс Y-12;</p> <p><u>Переработка плутония:</u> Роки-Флэтс, Лос-Аламос (ТА-55), Хэнфордский аффинажный завод.</p>
7	Производство оружия	<p><u>Неядерные производства:</u> Пантекс (шт. Техас), Ок-Ридж комплекс Y-12, Маунд, Канзас Сити, Пинеллас (шт. Флорида);</p> <p><u>Сборка и демонтаж:</u> Сандийский лаборатории, Пантекс, Берлингтон;</p> <p><u>Совершенствование технологий и техническое обслуживание:</u> Пантекс, Берлингтон, Сандийские лаборатории, Кларксвил, модификационный центр Медина.</p>
8	Исследования, разработка и испытания	<p><u>Национальные лаборатории:</u> Лос-Аламосская лаборатория, Ливерморская лаборатория им. Лоренса, Сандийские лаборатории (шт. Калифорния и шт. Нью-Мексико):</p> <p><u>Испытательные полигоны:</u> испытательный полигон в штате Невада; атоллы Бикини и Эниветок, о. Рождества, атолл Джонстон, о. Амчитка, испытательный полигон в Тонопа, испытательный полигон на оз. Солтон-Си.</p>





1 – Хэнфорд – производство топлива, облучение, химическое разделение, производство компонентов ЯО. 2 – Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса – НИОКР по созданию ядерных и термоядерных зарядов. 3 – Испытательный полигон в штате Невада. 4 – Национальная инженерная и экологическая лаборатория Айдахо – химическое разделение. 5 – Завод Роки-Флэтс – производство детонаторов для ядерных боеголовок. 6 – Лос-Аламосская национальная лаборатория – НИОКР по созданию ядерных и термоядерных зарядов. 7 – Сандийские национальные лаборатории – инженерно-проектные работы по ЯО. 8 – полигон Тринити. 9 – Опытный завод по изоляции РАО (WIPP). 10 – завод Пэнтекс – производство взрывчатых веществ и окончательная сборка и демонтаж боезарядов. 11 – остров Амчитка. 12 – атоллы Бикини и Эниветок. 13 – завод Берлингтон – сборка компонентов ЯО. 14 – завод Канзас-Сити – производство неядерных компонентов ядерных зарядов и боеприпасов. 15 – завод Уэлдон-Спринг – переработка урана и литейное производство систем автоматики и детонаторов. 16 – завод Ферналд – переработка урана, литейное производство, механическая обработка. 17 – завод Маунд – производство систем автоматики и детонаторов. 18 – Портсмутский газодиффузионный завод – обогащение урана. 19 – Падьюкский обогатительный завод – обогащение урана. 20 – Окриджская резервация – производство компонентов ЯО на основе высокообогащенного урана, обедненного урана и дейтерида лития, обогащение урана. 21 – Саванна-Ривер – производство топлива и мишеней, облучение и химическое разделение, производство трития. 22 – завод Пинеплас – нейтронные генераторы

Рис. 1.2. Ядерный оружейный комплекс США: основные площадки с 1943 года по конец 1980-х годов

1.1.2. Ок-Ридж

Окриджская резервация была создана в начале 40-х годов прошлого века и играла ключевую роль в производстве обогащенного урана в рамках Манхэттенского проекта и в период холодной войны. Изначально миссия комплекса состояла в химическом выделении первых граммовых количеств оружейного плутония. Затем эти функции стали уходить на второй план, и со временем установки Ок-Риджа все активнее использовались для получения других изотопов и проведения фундаментальных исследований, в том числе с опасными и радиоактивными материалами. Сегодня на общей территории в 136 км² расположены 3 основные площадки, содержащие объекты ядерного наследия: Окриджская национальная лаборатория (ОНЛ), Центр Национальной Безопасности Y-12 и Технологический Парк Восточного Теннесси (ТПВТ) (рис. 1.3).

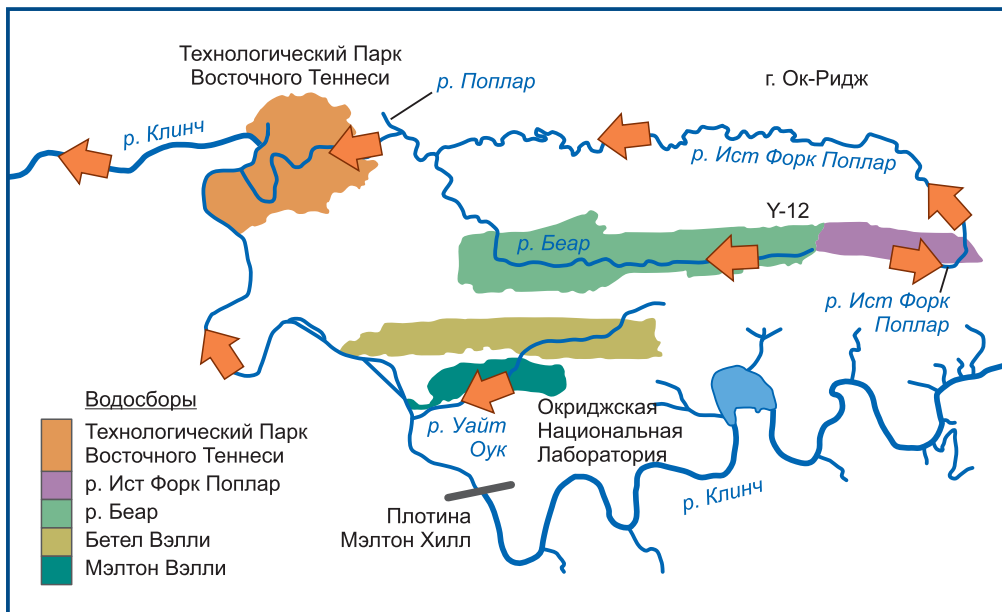


Рис. 1.3. Основные промышленные площадки Окриджской резервации

История создания и ключевые объекты

Решение о создании первого опытного реактора, который бы позволил на практике доказать возможность экстракции плутония из урана, было принято правительством США в 1942 году. Выбранная для размещения реактора площадка обладала целым рядом несомненных преимуществ. Малая плотность населения позволяла без особого труда осуществить отселение местных жителей, по этой территории уже проходили железнодорожные пути и автомагистраль, а благодаря возведенной незадолго до этого плотине на реке Клинч в полной мере могли быть удовлетворены потребности производства в энергетических и водных ресурсах.

В итоге для строительства новых объектов (трех заводов по обогащению урана (K-25, Y-12 и S-50) и реактора X-10) была выбрана долина продолговатой формы протяженностью 27 км, разделенная гребнями возвышенностей, которые могли послужить

естественными барьерами в случае аварии на одной из четырех установок [7]. В табл. 1.2. приведены сроки пуска и текущее состояние основных производств Ок-Риджа.

Табл. 1.2. Сроки ввода в эксплуатацию и текущее состояние основных мощностей Окриджского комплекса

Объект	Этапы пуска		Текущее состояние
Уран-графитовый реактор (X-10)	1942 г.	Начало строительных работ	Выведен из эксплуатации, здание получило статус национального памятника архитектуры
	4 ноября 1943 г.	Ввод в эксплуатацию	
	2 августа 1946 г.	Начало производства радионуклидов для использования в мирных целях	
	1963 г.	Реактор окончательно остановлен	
	1966 г.	X-10 получил статус национального исторического памятника	
Газодиффузионный завод (K-25)	Июнь 1943 г.	Начало строительных работ	К концу 2013 года завершены работы по сносу здания завода, всего из 5 зданий газодиффузионного комплекса (K-25, K-27, K-29, K-31, K-33); к настоящему моменту полностью ликвидировано 4 (работы по сносу здания K-27 завершатся к 2017 году)
	Начало 1945 г.	Завершение строительных работ и ввод в эксплуатацию	
	1964 г.	Переключение на производство низкообогащенного урана для изготовления топлива энергетических реакторов	
	1987 г.	Производство урана полностью прекращено	
Завод электромагнитной сепарации (Y-12)	1943 г.	Начало строительных работ	Нет сведений
	1944 г.	Ввод в эксплуатацию	
	С конца 1945 г.	Осуществлялась сепарация стабильных изотопов для применения в медицинских и научных целях	
	1998 г.	Все операции по сепарации прекращены	

Объект	Этапы пуска		Текущее состояние
Термодиффузионный завод (S-50)	Середина 1944 г.	Начало строительных работ	Используется по иному назначению
	16 сентября 1944 г.	Ввод в эксплуатацию	
	9 сентября 1945 г.	Все операции остановлены	
	1946–1949 г.	Оборудование демонтировано, проведена дезактивация, загрязненное оборудование и части строительных конструкций захоронены	
Выпарная установка типа перегонного куба	1949 г.	Ввод в эксплуатацию	Объект полностью ликвидирован
	1954 г.	Закрытие	
	1993 г.	Характеризация площадки	
	Декабрь 1995 г.	Начало работ по выводу из эксплуатации	
	1996 г.	Ликвидация установки	
Завод по переработке технологических ЖРО	1957 г.	Ввод в эксплуатацию	Эксплуатируется
	1959 г.	Автоматизирована система подачи ЖРО	
	1976, 1981 г.	Запуск усовершенствованных технологий очистки	
Траншеи и колодцы для захоронения ЖРО	1950 г.	Начало сооружения пунктов захоронения	Установлено покрытие из асфальта, ведется мониторинг
	1951 г.	Захоронение первых партий РАО	
	1970 г.	Окончание эксплуатации	

Объект	Этапы пуска		Текущее состояние
Гидроразрывные установки (закачка ЖРО)	1966 г.	ввод в эксплуатацию первой ГУ	Проводятся работы по ликвидации вспомогательных зданий и сооружений на площадке второй ГУ, а также закупке четырех шахт закачки и контрольных скважин
	1979 г.	закрытие первой ГУ	
	1982 г.	ввод в эксплуатацию второй ГУ	
	1984 г.	закрытие второй ГУ	

Окриджский газодиффузионный завод по производству обогащенного гексафторида урана (К-25) был построен в 1945 году в юго-западной части Ок-Риджа. По сути, строительство завода началось еще до того, как сама технология газодиффузионного разделения была до конца проработана. Громадная по площади установка (0,2 км²), сооруженная в рекордно быстрые сроки – всего за полтора года, обошлась правительству США в 512 млн долларов* (рис. 1.4). К началу 1945 года на заводе работало более 12 тысяч человек, а первые порции обогащенного гексафторида урана были получены уже к концу 1945 года.



Рис. 1.4. Вид сверху на завод К-25

После окончания второй мировой войны производство оружейных материалов в Ок-Ридже продолжилось. В послевоенные годы газовая диффузия оставалась единственным методом разделения изотопов, применявшимся в промышленных масштабах. Во времена холодной войны на многих других площадках оружейного комплекса США были возведены аналогичные установки. Уже в 60-е

годы объемы производства оружейных изотопов на К-25 стали снижаться. Их наработка была полностью прекращена в 1964 году – газодиффузионные установки переключились на производство низкообогащенного урана, использовавшегося для изготовления топлива энергетических реакторов. В 1987 году производство урана на площадке было полностью остановлено [8].

Еще одна крупная установка – завод электромагнитной сепарации Y-12, располагалась всего в 16 км от того места, где сегодня находится Центр национальной безопасности (National Security Complex). Строительство завода началось в 1943 году и

* что приблизительно равно 6,7 млрд \$ в пересчете на сегодняшний курс.

заняло чуть меньше года (рис. 1.5). Из-за нехватки меди массивные соленоиды калютронов пришлось изготовить из сплава серебра и меди. Всего на эти цели из резервов Казначейства США было выделено около 13 500 тонн серебра. После прекращения использования электромагнитной сепарации в промышленных масштабах серебро было возвращено Казначейству, однако в процессе производства было безвозвратно утеряно серебра более чем на 300 млн долларов.

К началу 1944 года силами 22 тысяч рабочих на заводе началось обогащение урана на 1152 электромагнитных сепараторах (калютронах), размещенных в 9 основных зданиях комплекса. После окончания войны процесс электромагнитной сепарации урана был остановлен. Лишь несколько установок (36 калютронов) центра функционировали вплоть до 1998 года и использовались для сепарации стабильных изотопов других элементов для применения в медицинских и научных целях [9].

Помимо процессов газодиффузионной и электромагнитной сепарации в рамках Манхэттенского проекта была также испытана технология термодиффузии. Работы по строительству *термодиффузионного завода S-50* (рис. 1.6) на промышленной площадке K-25 стартовали в середине 1944 года, и уже через 3 месяца было сооружено 2 142 пятнадцатиметровых диффузионных колонн, изготовленных из сплава меди и никеля.

16 сентября 1944 года завод был введен в эксплуатацию, а к началу 1945 года вышел на проектную мощность. Степень обогащения урана составила 0,85 %. 9 сентября 1945 года, после одного года эксплуатации, установка была окончательно остановлена. Затем в течение недолгого времени здание завода S-50 использовалось для проведения ядерных и военных испытаний [9].

Таким образом, с марта по сентябрь 1945 года на территории Окриджского комплекса одновременно работали все три установки по обогащению. Термодиффузия являлась первой стадией обогащения урана (до 2 %). После чего уран поступал на газодиф-



Рис. 1.5. Внутри здания завода Y-5



Рис. 1.6. Термодиффузионный завод S-50 на площадке K-25

фузионный завод K-25, где степень обогащения увеличивалась до 23 %. Окончательная степень обогащения (84 %) достигалась на заводе Y-12.

Первый промышленный уран-графитовый реактор (ПУГР) X-10, предназначенный для наработки оружейного плутония, был построен в Окриджской национальной лаборатории (ОНЛ) всего за 10 месяцев (рис. 1.7). 4 ноября 1943 года реактор был введен в эксплуатацию.

С декабря 1943 года по январь 1945 года X-10 ежедневно нарабатывал по несколько граммов плутония, что позволило снабдить лабораторию Лос-Аламоса плутонием в количестве, достаточном для запуска проекта по исследованию кинетики его деления и определения критической массы, необходимой для создания атомной бомбы. Кроме того, полученный в ходе эксплуатации реактора опыт позволил перейти к проектированию реактора большей мощности в Хэнфорде.



Рис. 1.7. Реактор X-10

После окончания войны реактор X-10 стал первой в мире установкой по производству радиоактивных изотопов невоенного назначения. 2 августа 1946 года была получена первая порция ^{14}C , предназначенная для лечения онкологических заболеваний. В последующие годы на установке нарабатывались изотопы ^{131}I , ^2P и ^{14}C для применения в науке, медицине, промышленности и сельском хозяйстве. В 1963

году после 20 лет непрерывной эксплуатации реактор X-10 был закрыт, а в 1966 году получил статус национального исторического памятника и был превращен в музей [10].

Что касается Окриджской Национальной Лаборатории, то после окончания второй мировой войны она перестала участвовать в военных проектах, а в период 1950–1960-х гг. приобрела статус национального исследовательского центра, специализирующегося на изучении вопросов, связанных с ядерным топливным циклом и обращением с РАО. Именно в ОНЛ был разработан COLEX-процесс обогащения лития, в ходе работы над которым значительные количества ртути были выброшены в окружающую среду.

Начиная с 1970 гг., после учреждения Министерства энергетики США миссия ОНЛ больше не ограничивалась проведением исследований в сфере атомной энергетики, и сегодня ОНЛ – это крупнейший научно-исследовательский комплекс США, реализующий масштабные научные проекты в шести основных областях:

- наноразмерное материаловедение,
- нейтронная физика,
- энергетика,
- высокопроизводительные вычисления,
- системная биология,
- национальная безопасность.

Исторические практики обращения с РАО и загрязнение окружающей среды

Деятельность, осуществляемая в Ок-Ридже в середине 1940-х гг., неминуемо привела к значительному загрязнению окружающей среды и образованию больших объемов радиоактивных и химических отходов на площадке. При этом темпы производства требовали оперативного обращения с РАО, а вопросы обеспечения защиты окружающей среды и недопущения загрязнения водных систем неизбежно уходили на второй план. В целом в деятельности предприятий Окриджской резервации можно выделить несколько периодов, характеризующихся своей спецификой обращения с ЖРО [11].

В период с 1944 по 1949 гг. высокоактивные ЖРО размещали в подземных резервуарах из торкретбетона глубиной от 1,8 м. В ходе выдержки часть радионуклидов распадалась, а часть радиоактивных и химически токсичных компонентов осаждалась и переходила в донный осадок. После выдержки жидкость отделялась от осадка, смешивалась с технологической водой и перекачивалась в осадительный бассейн объемом 5 700 м³, а оттуда сбрасывалась в искусственно созданное в 1943 году озеро Уайт Оук, площадью 145 000 м², служившее бассейном окончательной выдержки и осаждения ЖРО перед их сбросом в реку Уайт Оук (рис.1.8).



Рис. 1.8. Озеро Уайт Оук и система запруд водоёма промежуточной выдержки

В табл. 1.3 представлены результаты замеров суммарной активности донных отложений озера в период с 1945 по 1962 гг.

Табл. 1.3. Суммарная активность донных отложений оз. Уайт Оук

Год	Суммарная активность осадка (слой 7–15см), Бк	
1945	$7,8 \cdot 10^{11}$	
1946	$7,4 \cdot 10^{11}$	
1948	$1,1 \cdot 10^{13}$	
1950	$1,5 \cdot 10^{13}$	
1951	$1,3 \cdot 10^{13}$	
1952	$1,1 \cdot 10^{13}$	
1962	¹⁰⁶ Ru	$3,8 \cdot 10^{13}$
	¹³⁷ Cs	$2,6 \cdot 10^{13}$
	⁶⁰ Co	$5,6 \cdot 10^{12}$
	⁹⁰ Sr	$5,4 \cdot 10^{11}$

Технологическая вода перед сбросом в реку выдерживалась в двух специальных бассейнах объемом 1 100 м³ каждый, а донные осадки из этих бассейнов размещали в промежуточном водоеме. Скорость сброса ЖРО в реку составляла около 3 400 м³/день. Согласно результатам исследования, проведенного в 1985 году, активность ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²³⁸Pu, ²³⁹Pu, ²⁴¹Am, ²⁴⁴Cm, ¹⁵⁴Eu, накопленная в осадительном бассейне на тот момент, составила соответственно, Бк: 1,8·10¹²; 3,7·10¹⁰; 7,4·10¹¹; 3,7·10⁹; 1,1·10¹¹; 1,9·10¹⁰; 3,7·10⁹ и 7,4·10⁹.

Обращение с ЖРО: 1949–1954 гг. Выделение различных категорий ЖРО стало важной вехой в истории обращения и захоронения отходов в Ок-Ридже. С 1949 года в зависимости от химического состава и активности ЖРО разделяли на четыре категории (табл. 1.4). Начиная с 1949 года, после ввода в эксплуатацию испарителя типа перегонного куба на смену технологии осаждения и декантирования радиохимических ЖРО пришло выпаривание.

Табл. 1.4. Классификация ЖРО в период 1949–1954 гг.

Тип ЖРО	Активность, бета частиц/мин./мл	Объем образования, м ³ /нед. (1949 год)	Источник образования
Радиохимические (или «высокоактивные»)	2,5·10 ⁵	110	Установки с горячей камерой
Металлические	10 ⁵	5,7	В т. ч. отходы с содержанием Pu, U, Th
Теплые	10 ⁴	280	
Технологические	100	7 600–15 000	Охлаждающая вода, лаборатории (кроме горячих камер), трапные воды

Полученный от выпаривания ЖРО концентрат направляли на окончательное хранение в резервуары из торкретбетона, а низкоактивный конденсат сбрасывался в реку Уайт Оук. Всего в период с 1949 года и до момента снятия испарителя с эксплуатации в 1954 году через установку прошло порядка 44 000 м³ ЖРО, что позволило сократить объем радиоактивного концентрата до 1 600 м³.

Обращение с ЖРО: 1951–1970 гг. В период с 1951 по 1966 гг. на территории водосбросного бассейна озера Уайт Оук было сооружено 4 фильтрационных колодца и 3 траншеи для захоронения ЖРО (табл. 1.5, стр. 40).

Предполагалось, что ЖРО будут постепенно просачиваться из колодцев и траншей в почву, которая задержит радиоактивные вещества. Всего таким способом было захоронено около 1,2 млн Ки (4,4·10¹⁶ Бк) высокоактивных бета-излучающих отходов.

В то время уровень загрязнения грунтовых вод определялся по активности стронция, эффективно задерживаемого почвой. Однако впоследствии обнаружилось, что при-

сутствующий в отходах рутений почвой практически не задерживался и свободно мигрировал в водоносные горизонты. Но из-за короткого периода полураспада рутения (1 год) выбросы этого вещества не признавались значимыми. Наибольший выброс ^{106}Ru приходится на 1959 год, когда в воды озера Уайт Оук поступило около $4,8 \cdot 10^{13}$ Бк активности [11].

Табл.1. 5. Сводная таблица по пунктам захоронения ЖРО в Ок-Ридже [12]

Название объекта	Этапы эксплуатации	Вместимость, м ³	Размещенные ЖРО
Колодцы			
Колодец № 1	июль 1951 г. – ввод в эксплуатацию; октябрь 1951 г. – обнаружение крупной протечки, снятие с эксплуатации.	680	470 м ³ ЖРО с выпарной установки; суммарная активность – $1,4 \cdot 10^{13}$ Бк; (60 % - ^{137}Cs ; 40 % - ^{106}Ru)
Колодец № 2	июнь 1952 г. – ввод в эксплуатацию; 1954 г. – сооружение трубопровода, соединившего резервуары из торкретбетона с колодцем; 1955 г. – прекращение приема радиохимических отходов; октябрь 1959 г. – обнаружена крупная утечка ^{106}Ru ; 1970 г. – колодец заасфальтирован.	3 800	5 000 м ($6,1 \cdot 10^{14}$ Бк) – с 1952–1954 гг.
Колодец № 3	январь 1955 г. – ввод в эксплуатацию; сентябрь 1961 г. – снятие с эксплуатации; 1963 г. – окончание работ по засыпке.	3 800	Объем захороненных отходов неизвестен
Колодец № 4	апрель 1956 г. – начало захоронения отходов; с 1959 г. – увеличение объема захораниваемых отходов с большим содержанием ^{106}Ru ($2 \cdot 10^{12}$ Бк) до 30 м день. 1980 г. – колодец засыпан и заасфальтирован.	3 800	Суммарный объем захороненных отходов неизвестен
ИТОГО (до ноября 1962 года):	Суммарная активность: $1,93 \cdot 10^{16}$ Бк ^{90}Sr : $1,5 \cdot 10^{15}$ Бк ^{137}Cs : $6,8 \cdot 10^{15}$ Бк ^{106}Ru : $8,5 \cdot 10^{15}$ Бк Редкоземельные элементы: $2,6 \cdot 10^{15}$ Бк		

Название объекта	Этапы эксплуатации	Вместимость, м ³	Размещенные ЖРО
Траншеи			
Траншея № 5 (рис. 1.9, стр. 42)	20 мая 1960 г. – начало захоронения отходов; 1970 г. – траншея заасфальтирована.	длина – 91 м, глубина – 4,6 м; сверху – покрытие из крупнокусового щебня и почвы	до 1966г. – 36 000 м ³ (1,15·10 ¹⁶ Бк): ⁸⁹⁻⁹⁰ Sr: 3,6·10 ¹⁵ Бк ¹³⁷ Cs: 7,6·10 ¹⁵ Бк ¹⁰⁶ Ru: 2,4·10 ¹⁴ Бк ⁶⁰ Co: 1,1·10 ¹⁴ Бк
Траншея № 6	7 сентября 1961 г. – начало захоронения отходов; 10 октября 1961 г. – снятие с эксплуатации из-за обнаружения крупной протечки, скорость поступления ЖРО, содержащих ⁹⁰ Sr и ¹³⁷ Cs, составляла 5,7·10 ⁻⁴ м /мин; 1981 г. – траншея заасфальтирована.	У-образная траншея протяженностью 150 м, на 50 % вместительнее Траншеи № 5	490 м : ⁹⁰ Sr: 5,4·10 ¹² Бк ¹³⁷ Cs: 2,5·10 ¹³ Бк ¹⁰⁶ Ru: 1,9·10 ¹³ Бк ⁶⁰ Co: 8,9·10 ¹¹ Бк
Траншея № 7	август 1962 г. – начало захоронения отходов; 1970 г. – траншея заасфальтирована.	в 4 раза вместительнее Траншеи № 5	36 000 м : ⁹⁰ Sr: 1,8·10 ¹⁵ Бк ¹³⁷ Cs: 8,5·10 ¹⁵ Бк ¹⁰⁶ Ru: 1,3·10 ¹⁴ Бк ⁶⁰ Co: 5,6·10 ¹³ Бк
Первая гидроразрывная установка	1966–1979 гг.		5,7·10 м (4,8·10 ¹⁶ Бк)
Вторая (новая) гидроразрывная установка	1982–1984 гг.		4,18·10 м (1,5·10 ¹⁶ Бк)

8 августа 1957 года в эксплуатацию был введен завод по обработке технологических ЖРО, который позволил снизить активность сбросов в реку Уайт Крик. В январе 1959 года установка была оборудована автоматическим распределительным клапаном: при превышении установленного уровня активности технологическая вода автоматически поступала на очистную установку, если активность вод была ниже установленных пределов, то вода сбрасывалась в осадительный бассейн, а уже оттуда в реку.

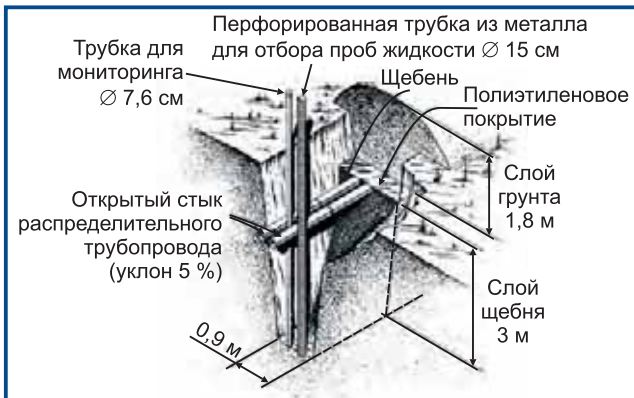


Рис. 1.9. Принципиальная схема траншеи

На территории ОНЛ также расположены 6 крупных полигонов ТРО (табл. 1.6.).

В период с 1955 по 1966 гг. эти полигоны принимали на захоронение не только РАО, образовавшиеся на установках Ок-Риджа, но и отходы с других площадок. В сравнении с ЖРО активность ТРО была незначительной, хотя определить точный уровень радиоактив-

ного загрязнения было невозможно из-за того, что все поставки отходов осуществлялись в виде партий неоднородных по своему составу материалов.

Табл. 1.6. Полигоны ТРО в Ок-Ридже [12]

Номер полигона	Годы эксплуатации	Площадь, га	Объемы/ (Σ активность)
№ 1	1943–1944	0,4	$1,4 \cdot 10^3 \text{ м}^3 / (1,5 \cdot 10^{14} \text{ Бк})$
№ 2	1944–1946	1,5	$1,4 \cdot 10^3 \text{ м}^3 / (1,5 \cdot 10^{14} \text{ Бк})$
№ 3	1946–1951	2,8	$2,0 \cdot 10^4 \text{ м}^3 / (1,9 \cdot 10^{15} \text{ Бк})$
№ 4	1951–1959	9,3	$5,7 \cdot 10^4 \text{ м}^3 / (4,1 \cdot 10^{15} \text{ Бк})$
№ 5	1958–1973	13,3	$9,1 \cdot 10^4 \text{ м}^3 / (7,8 \cdot 10^{15} \text{ Бк})$
№ 6	1973–1980	28,3	$2,2 \cdot 10^4 \text{ м}^3 / (9,3 \cdot 10^{15} \text{ Бк})^{1*}$

С декабря 1966 года основным способом обращения с жидкими САО (активностью до $3,7 \cdot 10^{16}$ Бк) стала их закачка в гидроразрывные установки (см. табл. 1.5). Суть практики заключалась в том, что посредством нагнетания гидравлического давления в пластах сланцевой глины создавались условия для их растрескивания. Щелочной раствор САО смешивался с твердой смесью цемента и специальных присадок и под давлением закачивался в водонепроницаемые сланцевые формации на глубину 200–300 м [11]. Результаты гамма-каротажа, проведенные позднее, показали, что формации подвержены также и вертикальному растрескиванию, из-за чего становилось невозможным с достаточной степенью уверенности судить о перемещении закаченного радиоактивного шлама. Кроме того, был установлен факт загрязнения грунтовых вод. И, несмотря на то, что прямой связи между закачкой отходов и возникшим загрязнением выявлено не было, закачка РАО была прекращена. Данные мониторинга свидетельствуют о том, что по сей день случаев выброса радиоактивных веществ из этих установок в поверхностные воды, донный осадок и поверхностный почвенный слой зафиксировано не было.

* по состоянию на конец 1983 г.

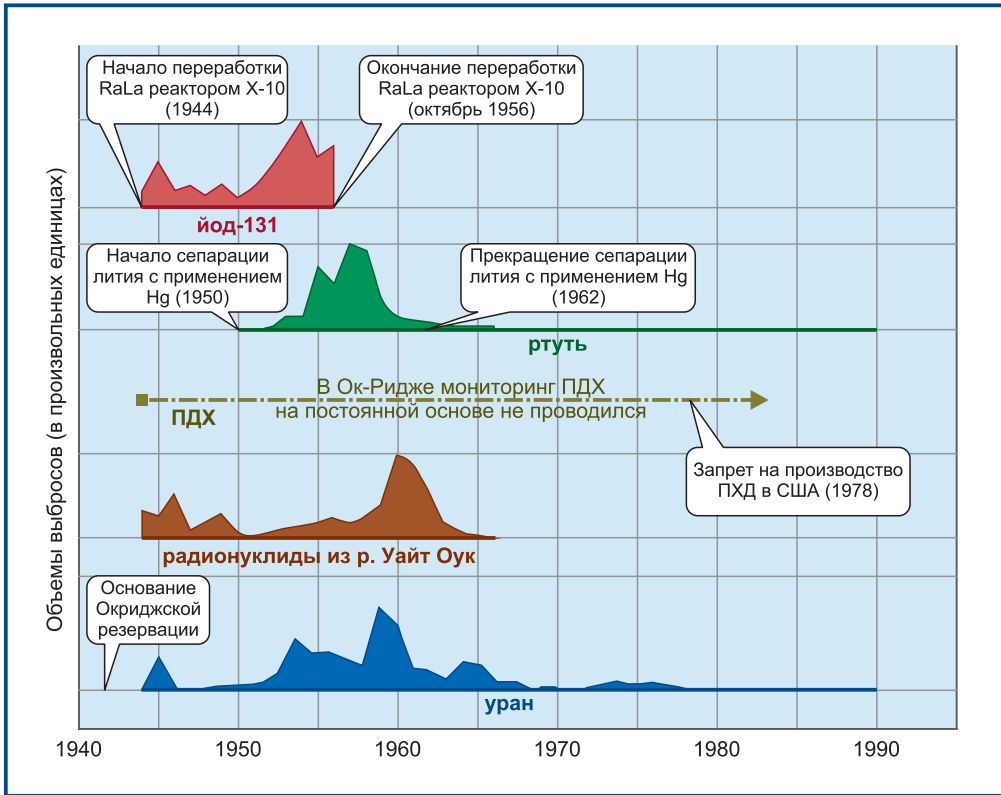


Рис. 1.10. Динамика выбросов загрязняющих веществ в период с 1944 по 1990 гг. в атмосферу; коричневым цветом показаны сбросы ЖРО с содержанием ^{60}Co , ^{106}Ru , ^{90}Sr , ПХД – полихлорированные дифенилы

В ходе эксплуатации установок Окриджского комплекса помимо загрязнения почвы, грунтовых и поверхностных вод значительные уровни радиоактивности также поступили в атмосферу. На рис. 1.10 в произвольных единицах представлена динамика газо-аэрозольных выбросов основных загрязняющих веществ за годы существования Окриджского комплекса: ^{131}I (отмечены красным цветом); ртути (зеленым) и урана (синим).

Пиковые выбросы ^{131}I пришлось на сентябрь 1944 – октябрь 1956 года и были обусловлены экстракцией из облученных в реакторе X-10 стержней ^{140}Ba , являющегося материнским радионуклидом ^{140}La (RaLa). Данный процесс заключался в растворении облученных топливных стержней в ваннах с азотной кислотой. Из-за малого периода полураспада ^{140}Ba (12,8 дней) растворение требовалось проводить сразу после извлечения стержней из реактора.

Необходимость в столь скорой переработке приводила к неминуемым выбросам в атмосферу короткоживущих летучих веществ, в частности, ^{131}I . Известно, что объемы производства бария в 60 раз превышали проектные. При этом оборудование для осуществления выпаривания и осаждения так и не было модернизировано и использовалось вплоть до 1956 года, пока в Айдахо не была запущена новая установка по производству бария. За 13 лет эксплуатации суммарный объем выброса радиоактивного йода составил

порядка $3,3 \cdot 10^{14}$ – $1,1 \cdot 10^{15}$ Бк; из них около $1,7 \cdot 10^{13}$ Бк поступило в воздух в результате аварии в апреле 1954 года. Тогда из-за недосмотра топливные стержни в течение 28 часов пролежали в сухих ваннах без растворителя, что привело к их перегреву, а когда азотную кислоту в бассейны все-таки залили, произошла бурная химическая реакция, в ходе которой в воздух и были выброшены столь значительные количества йода.

Загрязнение ртутью обусловлено использованием больших количеств этого вещества в период 1950–1960-х гг., когда на заводе Y-12 производились исследования COLEX-процесса обогащения лития, заключавшегося в селективном удалении изотопов ^6Li , обладающего большим сродством с ртутью, чем ^7Li . Всего для осуществления работ было использовано около 10 900 т ртути, из которых около 160 т было сброшено в воды реки Форк Поплар и в атмосферу. Причиной загрязнения воды стала промывка используемого в процессе обогащения оборудования (в общей сложности в воду было сброшено 127 т ртути).

Еще одним загрязняющим веществом, значительные количества которого поступили в атмосферу, является уран. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что в период с 1944 по 1995 гг. в ходе эксплуатации завода Y-12 и вспомогательных установок ЦНБ в общей сложности было выброшено около 50 т урана, а с заводов K-25 и S-50 в воздух поступило еще порядка 16 т [13].

Мероприятия по восстановлению качества окружающей среды и выводу из эксплуатации установок Ок-Риджа

Технологический парк Восточный Теннесси (ТПВТ)

Сегодня Технологический парк Восточного Теннесси занимает территорию бывшего газодиффузионного комплекса, где в период Второй мировой войны осуществлялось обогащение урана, использовавшегося для производства атомного оружия. После окончания войны комплекс установок завода был

переименован в площадку K-25, и с 1945 по 1985 гг. обогащение урана проводилось только в целях изготовления топлива энергетических реакторов. В 1987 году после окончательной остановки урановых производств Министерство энергетики переименовало площадку K-25 в Технологический парк Восточного Теннесси и запустило масштабную программу по ее реабилитации, по окончании которой ТПВТ должен превратиться в промышленный технопарк Центр Наследия (Heritage Center).

Основным подрядчиком, задействованным в проведении работ по реабилитации территории ТПВТ, выступает компания Bechtel Jacobs. После завершения всех работ Министерство энергетики передаст очищенные территории и незагрязненные здания в собственность Муниципальной организации по повторному использованию земельных ресурсов Восточного Теннесси (Community Reuse Organization of East Tennessee, CROET). CROET займется поиском предприятий, которые арендовали бы земельные участки ТПВТ для размещения собственных установок.



За 40 лет эксплуатации установок газодиффузионного комплекса по обогащению урана многие здания, расположенные на его промышленной площадке, подверглись существенному загрязнению радиоактивными веществами, тяжелыми металлами и токсичными органическими соединениями. Кроме того, в процессе обогащения урана образовывались значительные количества отходов, большая часть которых хранилась на площадке. Основной задачей программы по очистке территории ТПВТ является ликвидация всех неиспользуемых зданий и установок, а также восстановление условий окружающей среды, которые позволили бы в дальнейшем использовать эти территории в промышленных целях.

Для реализации поставленных задач вся территория ТПВТ площадью 890 га была разделена на 2 зоны: первая (567 га) находится за пределами охранного ограждения промышленной площадки завода, а вторая зона (324 га) – это непосредственно сама производственная площадка бывшего газодиффузионного комплекса (рис. 1.11).

Первоочередной задачей для обеих зон является обеспечение защиты здоровья персонала и предотвращение загрязнения грунтовых вод химическими и радиоактивными веществами, поступающими из почвы и с поверхностных сооружений. Работы по очистке территории Зон 1 и 2 стартовали в 2002 и 2005 гг. соответственно. За эти годы было снесено более 380 различных зданий и сооружений, с площадок вывезено порядка $1,3 \cdot 10^6$ м³ отходов и более 7 000 бочек с UF₆, а 90 % территории Зоны 1 перешло в неограниченное промышленное землепользование (табл. 1.7, стр. 46) [14].

Начиная с 1999 года, на территории ТПВТ проводятся работы по перезахоронению отходов. Так, отходы с четырех полигонов К-1070-С/Д (органические растворители), К-1070-А (материалы с газодиффузионного завода, загрязненные ураном), К-1085 были переупакованы и помещены в пункт *централизованного захоронения исторических РАО*, находящийся на территории Центра национальной безопасности [15].



Рис. 1.11. Вид сверху на газодиффузионный комплекс до начала работ по сносу (а); состояние площадки после окончания работ по ликвидации зданий и установок комплекса (б)

Табл. 1.7. Промежуточные итоги реализации программы по очистке территории ТПВТ (по состоянию на начало 2016 года)

Ликвидация загрязненных зданий и сооружений (газодиффузионный комплекс)					
	<u>К-29</u>	<u>К-33</u>	<u>К-25</u>	К-31	К-27
Сроки окончания работ	Август 2006 года	Сентябрь 2011 года	Декабрь 2013 года	Июнь 2015 года	Вторая половина 2016 года
Общая площадь, м ²	61 000	130 000	162 000	81 000	35 000
Затраты, доллар	1,5 млрд				219 млн
Очистка почвы					
<u>Зона 1</u> <i>территории ТПВТ вне промышленной площадки</i>			<u>Зона 2</u> <i>промышленная площадка ТПВТ</i>		
5,67 км ²			3,24 км ²		
<p><u>К настоящему времени:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> • выявлено 80 источников радиоактивного загрязнения, из которых полностью реабилитирован 71 источник; • имеется 1 396 точек отбора проб грунта; • проведена экскавация 80 м загрязненной почвы до глубины 3 м; • 61,4 м металлолома и строительных конструкций удалено с площадки; • показатель суммарного риска не превышает установленных пределов (10⁻⁴); • 5,14 км² земель Зоны 1 передано в промышленное использование. 			<p>Работы по реабилитации стар-туют только после окончательной ликвидации всех зданий газодиффузионного комплекса.</p> <p>В первую очередь будет реализован комплекс работ по оценке масштабов радиоактивного и химического загрязнения территории, после чего будут проведены работы по очистке почвы и приняты меры по реабилитации грунтовых вод.</p>		
<p><u>В планах:</u></p> <p>обеспечить условия для передачи территорий внутри Зоны 1 в неограниченное промышленное землепользование, для чего верхний слой почвы (до глубины 3 м) должен отвечать установленным критериям по уровням радиоактивного и химического загрязнения.</p>					
Использование объектов инфраструктуры и земельных ресурсов					
территории общей площадью 3 км ² предоставлены в аренду промышленным предприятиям;			в аренду сдается 20 установок, по площади занимающих около 2,14 км ² ;		
в аренду сдается 14 зданий общей площадью около 31 000 м ² ;			20 частных компаний работают на территории ТПВТ.		

Работы по сносу здания газодиффузионного завода К-25 площадью 16 га, включавшего более 3 000 газодиффузионных ступеней и различное вспомогательное оборудование, стартовали в 2011 году. Главную трудность представлял снос последних двух секций здания, загрязненных технецием – очень подвижным радионуклидом с большим периодом полураспада, из-за чего пришлось предварительно провести масштабные работы по дезактивации, и в сентябре 2013 года последняя шестая секция завода была успешно снесена. Загрязненные технецием конструкции были размещены в пункте централизованного захоронения. Самым сложным этапом проведения демонтажных работ стало извлечение так называемых ловушек из фтористого натрия, использовавшихся для сорбции урана. Они представляли особую опасность при транспортировке в случае падения или возникновения пожара. Для их удаления в крыше здания были сделаны отверстия, через которые ловушки извлекали при помощи поворотного крана [16].

В итоге к середине 2015 года были завершены работы по сносу пяти зданий газодиффузионного комплекса (К-25 – в 2013 году, К-29 – в августе 2006 года, К-31 – в июне 2015 года и К-33 – в сентябре 2011 года). По предварительным оценкам общие затраты на их проведение составили порядка 1,5 млрд долларов [17]. В ходе ликвидации зданий К-29, К-31 и К-33 с площадки газодиффузионного комплекса было вывезено около 159 000 тонн различных материалов и демонтированного оборудования, а общая площадь этих зданий под крышей составила порядка 450 000 м².

В течение нескольких лет на площадке реализовывалась программа работ по подготовке к ликвидации последнего оставшегося здания газодиффузионного комплекса – К-27, занимавшего территорию общей площадью около 36 000 м². В итоге были проведены работы по дезактивации и разобрано около 80 % всех асбестоцементных панелей. Осенью 2016 года на площадке стартовали работы по сносу здания газодиффузионного комплекса. Приблизительные затраты на выполнение всех работ по ликвидации здания К-27 оцениваются в порядка 219 млн долларов [17].

На протяжении 19 лет с 1991 по 2009 год на территории ТПВТ действовала единственная в своем роде установка для сжигания радиоактивных и опасных токсичных отходов, в основном полихлорированных дифенилов (ПХД), поступавших со всех площадок Окриджской резервации. В общей сложности через установку прошло более 16,6 млн кг жидких и твердых отходов. В декабре 2009 года установка была окончательно остановлена, а в 2012 году регулятор выдал разрешение на проведение подготовительных работ, предваряющих вывод из эксплуатации. В целях минимизации затрат на техническое обслуживание и мониторинг из здания в первую очередь были удалены все подвергшиеся радиоактивному загрязнению материалы, а также материалы, содержащие ПХД. Все подготовительные работы к настоящему времени завершены, и в скором времени здание будет полностью ликвидировано [17].

Что касается грунтовых вод, то на территории ТПВТ их загрязнение в первую очередь обусловлено шестивалентным хромом. В ТПВТ действует система очистки воды от низкоактивных летучих соединений и хрома, позволяющая преобразовать гексавалентный хром в более безопасную форму этого элемента – трехвалентный хром. До этого функции удаления радиоактивных веществ, металлов и взвешенных твердых частиц выполняла центральная очистная установка, состоявшая из 49 сооружений и резервуаров для хранения отходов, обеспечивавших первичную очистку грунтовых вод, удаление металлов, окисление органических соединений, их фильтрацию, осаждение твердых частиц и их удаление. Шлам с центральной установки упаковывали в контейне-

ры и направляли на захоронение. В основном эта установка использовалась для очистки грунтовых вод от гексавалентного хрома, а также жидких отходов, образующихся в результате сжигания РАО и других опасных отходов.

Сооружение новой установки позволило избежать больших затрат, связанных с необходимостью проведения ремонтных работ на старой, а также сократить ежегодные эксплуатационные расходы на 1,5 млн долларов. На данный момент система включает две скважины, производящие откачку грунтовых вод со скоростью 23 л/мин, после чего вода прогоняется через слой «стальной шерсти», задерживающей крупные частицы и преобразующей шестивалентный хром в трехвалентный. Общая продолжительность процесса очистки от момента забора воды до ее выброса в реку Клинч через трубу протяженностью 6,4 км занимает всего 17 минут. За первый год работы установки было очищено более 7,3 млн л грунтовых вод [18].

На территории ТПВТ также расположено *два промышленных водоема* К-901-А и К-1007Р1. Искусственный водоем К-901-А площадью около 69 000 м² глубиной порядка 3 м был сооружен в 1955–1956 гг. и использовался для охлаждения и промежуточной выдержки хромсодержащих промышленных стоков перед их сбросом в реку Клинч. Также в К-901-А были захоронены канистры с гексафторидом урана. Оценка уровней загрязнения в К-901-А проводилась дважды – в 1986 и 1994 гг. Результаты исследований проб донных отложений свидетельствовали о превышении предельно допустимых концентраций по хromу, селену, цинку и ПХД, что обуславливало неприемлемо высокие уровни риска для здоровья человека и рыбоядных хищников (цапель, норок и зимородков). Дополнительные риски также были связаны с захороненными в воде канистрами, содержащими гексафторид урана.

В 1997 году в целях их извлечения водоем был полностью осушен, что позволило поднять со дна все захороненные канистры и другой мусор, а также погибшую рыбу. В дальнейшем проводился регулярный мониторинг концентраций загрязняющих веществ в водоеме К-901-А, а также в водоеме К-1007Р1 площадью 89 000 м², принимающем технологические стоки из лабораторий Окриджского комплекса. Загрязнение водоема К-1007Р1 в первую очередь обусловлено ПХД. Результаты исследований, проведенных в 1990-х гг., показали наличие чрезвычайно высоких концентрации этих веществ в донных отложениях и обитающей в водоеме рыбе. Потребление человеком такой рыбы в пищу обуславливало неприемлемо высокие уровни риска для здоровья. В качестве предупредительной меры знаки и информационные таблички, запрещающие ловлю рыбы, были установлены на берегах водоема.

В дальнейшем в целях реабилитации водоемов К-901-А и К-1007Р1 была выбрана стратегия экологической оптимизации*. Экологическая оптимизация представляет собой инновационный подход к реабилитации, заключающийся в намеренном изменении структуры и состава популяций рыб, растений и других организмов, населяющих водоем. В данном случае в водоемах требовалось создать такие условия, которые бы способствовали снижению уровня риска, обуславливаемого ПХД. Достичь этой цели было решено за счет активизации тех компонентов окружающей среды, которые позволили бы минимизировать потребление ПХД. В итоге из водоемов были удалены те виды рыб, которые вносили наибольший вклад в биоаккумуляцию ПХД, а их место за-

* англ. ecological enhancement.

няли другие виды, в частности, длиннопёрый солнечник, практически не способный накапливать эти вещества. Посадка водных растений также позволила ограничить вторичный подъем загрязняющих веществ со дна водоемов. К настоящему времени все работы по экологической оптимизации водоемов завершены, проводится регулярный мониторинг, результаты которого позволят судить об эффективности и результативности принятых мер [17].

Центр национальной безопасности (ЦНБ)

В прошлом на территориях, принадлежащих ЦНБ, располагался комплекс электромагнитной сепарации Y-12, а также ряд установок, где осуществлялась сборка элементов ядерных боеголовок, содержавших высокие концентрации урана и лития. Эти работы требовали применения больших количеств ртути, что привело к значительному загрязнению зданий, почвы, поверхностных и грунтовых вод, донных отложений этим элементом. Сегодня в ЦНБ производятся ядерные материалы и комплектующие для ядерного оружия, а также хранится основная часть американского запаса обогащённого урана.



Основными задачами в области восстановления качества окружающей среды для ЦНБ является демонтаж технологической оснастки и снос 99 зданий и сооружений старого производственного комплекса общей площадью около 14 000 м², а также очистка грунтовых и поверхностных вод (реки Аппер Ист Форк Поплар и Ист Форк Поплар), загрязненных ртутью (рис. 1.12).

Что касается устранения источников поступления ртути в почву и грунтовые воды, то работы по сносу производственных строений, а также очистке донных от-



Рис. 1.12. План-схема размещения основных установок на территории ЦНБ

ложений планируется начать лишь в 2021 году. Перенос этих мероприятий на более поздний срок связан с тем, что вскоре пункт централизованного захоронения исторических РАО, действующий на территории Окриджской резервации, будет полностью заполнен, и для проведения очистных работ понадобится сооружение нового объекта окончательной изоляции РАО, ввод в эксплуатацию которого состоится не ранее 2020 года.

Согласно предварительным оценкам, суммарные затраты на реализацию комплекса мероприятий по очистке территории ЦНБ продолжительностью около 35 лет могут составить порядка 7,5–8,4 млрд долларов. При этом около 25 % этих средств будет израсходовано на выполнение работ по устранению ртутного загрязнения, еще 25 % – на дезактивацию и ликвидацию загрязненных зданий и сооружений, а оставшиеся 50 % уйдут на техническое обслуживание установок, осуществление мониторинга окружающей среды, обеспечение физической безопасности, а также сооружение, эксплуатацию и закрытие нового пункта захоронения (табл. 1.8).

Табл. 1.8. График выполнения работ по очистке территории ЦНБ

Мероприятия по очистке территории ЦНБ	Финансовый год					
	2013–2017	2018–2022	2023–2027	2028–2032	2033–2037	2038–2046
Работы по очистке загрязненных компонентов окружающей среды и ликвидации зданий и сооружений, связанные с устранением ртутного загрязнения						
Эксплуатация системы очистки грунтовых вод	■	■	■	■	■	■
Ликвидация зданий и сооружений		■	■	■	■	■
Другие работы			■	■	■	■
Другие работы, связанные с очисткой загрязненных компонентов окружающей среды и ликвидацией зданий и сооружений						
Дезактивация и ликвидация зданий и сооружений				■	■	■
Очистка загрязненных компонентов окружающей среды		■		■	■	■
Эксплуатация и техническое обслуживание установок						
Пункт захоронения (проектирование, сооружение, эксплуатация, закрытие)	■	■	■	■	■	■
Техническое обслуживание, мониторинг, физзащита и т. п.	■	■	■	■	■	■



Рис. 1.13. Четыре здания на территории ЦНБ, где в прошлом осуществлялась большая часть технологических операций с использованием ртути

Выбросы ртутного загрязнения, регулярно происходившего в ходе осуществления технологических процессов на территории комплекса Y-12 в период с 1950-х по начало 1960-х, привели к значительному загрязнению компонентов окружающей среды, зданий и сооружений в пределах промышленной площадки, а также реки Ист Форк Поплар.

Работы по обезвреживанию водной среды, стартовавшие в 1980-е, позволили добиться значительного сокращения концентрации ртути в водной среде как непосредственно на территории самого комплекса Y-12, так и в экосистеме реки Ист Форк Поплар. Тем не менее, превышение допустимых концентраций по некоторым загрязняющим веществам до сих пор фиксируется в почве, донных отложениях, воде, биоте, а также в конструкционных материалах зданий, сооружений, установок и оборудования на участках, где в прошлом проводились работы с использованием ртути [19].

Наибольшему загрязнению подверглись 4 здания: 9201-2 (Alpha-2), 9204-4 (Beta-4), 9201-4 (Alpha-4) и 9201-5 (Alpha-5) (рис. 1.13).

В табл. 1.9 (стр. 51) приведены результаты оценки объемов ртути, выброшенных в окружающую среду с территории Y-12.

С 1980-х за счет реализации целого комплекса мер удалось добиться значительного прогресса в снижении объемов ртути (табл. 1.10, стр. 52–53), поступающих в реку Ист Форк Поплар и мигрирующих за пределы промышленной площадки, что отражено в зависимостях, представленные на рис. 1.14 (стр. 53).

Табл. 1.9. Объемы поступления ртути в окружающую среду с территории комплекса Y-12

Источник загрязнения	Путь поступления	Объемы ртути, кг
Выбросы в воздух (1950–1963 гг.)	Вентиляционные системы	23 000
Сбросы в р. Ист Форк Поплар (1950–1982 гг.)	Технологические сточные воды	109 000
Инфильтрация в почву	Аварии/проливы	195 000
Накопление в донных отложениях водоема Нью Хоуп	Канализационная система зданий	7 000
Источник выбросов/сбросов не установлен		587 000
Всего		921 000

Табл. 1.10. Основные мероприятия, реализованные на территории ЦНБ с целью снижения ртутного загрязнения площадки

Сроки	Проект	Основные результаты
1985 – 1995 гг.	Удаление источников загрязнения в зданиях	удаление источников ртутного загрязнения, прокладка новой системы трубопроводов в зданиях 9201-2, 9204-4, 9201-4 и 9201-5; дезактивация и очистка установок и оборудования, демонтаж оборудования.
1986 – 1987 гг.	Очистка ливневой системы канализации, удаление содержащих ртуть отложений	очищено 1 680 м канализационных труб; удалено 227 тонн отложений.
1988 – 1989 гг.	Закрытие акватории искусственного осадительного водоема Нью Хоуп, использовавшегося с 1962 года для приема донных отложений из реки Аппер Форк Поплар	в 1972 году донные отложения были извлечены из водоема и захоронены на специально отведенной для этих целей площадке; в 1989 году – завершены работы по засыпке и закрытию акватории водоема; для целей выдержки донных отложений используется озеро Реалити.
1992 г.	Реабилитация 3 бетонных резервуаров-хранилищ, потерявших герметичность	удалено 31,6 тонн отложений.
1982 – 1994 гг.	Комплекс мер по снижению концентраций ртути в технологических сбросах с площадки	сооружение обводного канала на озере Реалити; запуск опытной водоочистной установки; концентрации ртути в технологических сбросах были снижены на 90 %.
с 1996 г.	Увеличение водного расхода в реке Аппер Форк Поплар	подкачка воды из р. Клинч позволила повысить водный расход на более чем 17 000 л/сутки.
с 1996 г.	Эксплуатация Центральной установки по удалению ртути (CNTS)	очистка технологических стоков, поступающих из зданий 9201-4 и 9201-5.

Сроки	Проект	Основные результаты
1996 – 1997 гг.	Удаление загрязненного грунта из поймы реки Ист Форк Поплар	удалено 27 000 м ³ загрязненной почвы.
2001 г.	Укрепление берегов реки Аппер Ист Форк Поплар	принятые меры позволили снизить поступление ртуты в воды реки в случае обильных осадков.
с 2005 г.	Запуск системы водоочистки Биг Спринг (BSWTS)	установка расположена неподалеку от здания Alpha-2; очистка проводится с помощью ранаулированного активированного угля; производительность установки: 1 136 л/ мин.
с 2009 г.	Новый этап работ по очистке промышленной площадки от ртутного загрязнения	проект по очистке системы ливневой канализации WEMA (с использованием видеоаппаратуры проинспектировано около 4,7 км системы, проведена очистка труб общей протяженностью около 2,5 км, переоблицовка выполнена для 370 м канализационных труб); проведена характеристика территории полигона для хранения металлолома; результаты свидетельствуют об отсутствии необходимости предварительной очистки почвы до захоронения; завершены работы по характеристике здания Alpha-5; все исторические материалы и отходы удалены из зданий Beta-4 и Alpha-5 (17 000 м ³).

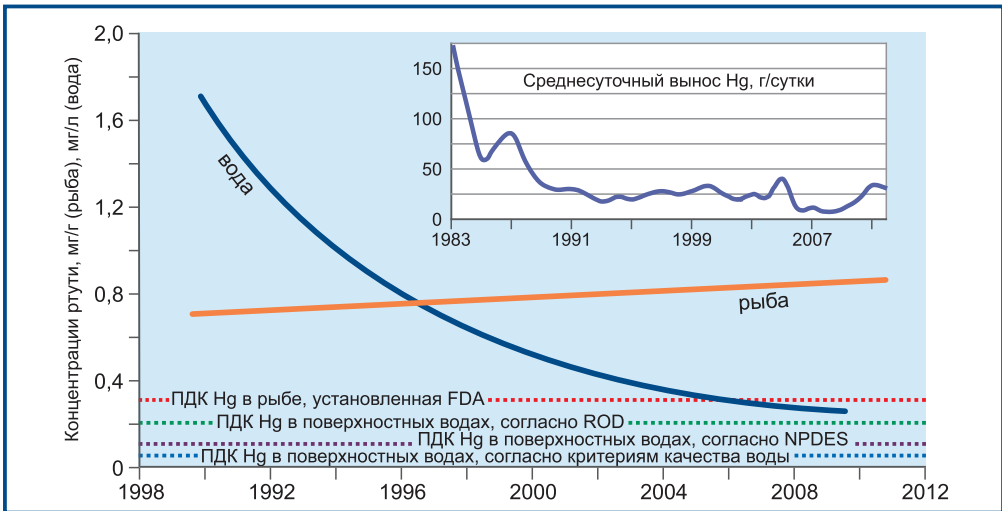


Рис. 1.14. Данные мониторинга по содержанию ртути в реке/рыбе и действующие стандарты качества воды (FDA – Управление по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов; NPDES – Национальная система предотвращения сброса загрязняющих веществ)

В то же время результаты оценки содержания ртути в тканях рыб, обитающих в реке, проведенной ЕРА, свидетельствуют о куда менее заметном снижении концентраций этого вещества при том, что именно такие оценки позволяют судить о безопасности водного объекта в целом.

Кроме того сотрудниками ЕРА было установлено, что за последние несколько лет наметилась отчетливая тенденция к увеличению интенсивности миграции ртути за пределы промышленной площадки. В 2008–2010 гг. этот факт связывали с аномальными осадками, а в 2011 году – с последствиями промывки канализационной системы, что привело к взмучиванию донных отложений, являющихся основным источником миграции ртути. В итоге к 2012 году поступление ртути снизилось с 31 г/день (2011 год) до 3–7 г/день.

На территории ЦНБ действует две технологические установки, предназначенные для очистки грунтовых вод от соединений ртути и летучих органических загрязнителей. В 2012 году завершилась разработка стратегического плана по снижению ртутного загрязнения, и в первую очередь поступления этого вещества в воды реки Ист Форк Поплар, основывающегося на пяти ключевых элементах (рис. 1.15) [20].

<i>компоненты стратегии</i>	<i>уже реализованные мероприятия</i>	<i>предстоящие мероприятия</i>
Рациональное водопользование	<ul style="list-style-type: none"> увеличение расхода водотока устранение вторичных источников миграции Hg 	изменение технологических схем системы трубопроводов
Системы очистки	<ul style="list-style-type: none"> BSWTS CMTS разработка проекта системы OF 200 	сооружение и эксплуатация системы OF 200
Устранение источников загрязнения	<ul style="list-style-type: none"> характеризация и удаление исторических материалов из зданий Beta 4 и Beta 5 характеризация условий внутри здания Beta 5 	дезактивация / ликвидация
	<ul style="list-style-type: none"> удаление свободной ртути дезактивация и демонтаж пяти резервуаров-хранилищ ликвидация здания 81-10 и очистка загрязненной почвы (затраты ~ 71 млн \$) 	реабилитация
Изоляция источников загрязнения	укрепление берега р. Аппер Ист Поплар	НИОКР, испытания, применение технологий реабилитации «на месте»
Разработка новых технологий и планирование	<ul style="list-style-type: none"> технология сернополимерной стабилизации почвы исследования различных технологий почвенной очистки 	анализ методов паровой экстракции Hg из почвы

Рис. 1.15. Основные компоненты стратегии по очистке территории ЦНБ от ртути

Еще одну проблему для ЦНБ представляют значительные объемы шлама, содержащего трансурановые элементы (ТРУ). Общий реестр трансурановых РАО Ок-Риджа включает:

1. Супернатант – 1 610 м (переработка завершена в 2004 году);
2. ТРУ РАО, допускающие контактное обращение – 1 500 м (ТРУ РАО КО);
3. ТРУ РАО, требующие дистанционного обращения – 560 м (ТРУ РАО ДО);
4. Шлам, содержащий трансурановые элементы – около 2 000 м .

Что касается ТРУ РАО под пунктами два и три, то с их переработкой успешно справляется специальная установка, действующая с 2004 года.

Переработать весь объем ТРУ РАО планируется уже к концу 2018 года.

На данный момент ведется проектирование новой установки, которая позволит переработать весь объем ТРУ шлама. Сейчас ТРУ шлам размещен в 8 резервуарах приповерхностного пункта хранения в Мэлтон Вэлли. В апреле 2015 года контракт на проектирование опытной установки стоимостью 1,5 млн долларов был заключен с инженеринговой компанией CH2M Hill. Также с CH2M Hill было подписано еще два контракта: один на сооружение опытной установки, а второй на строительство промышленной установки по переработке ТРУ шлама, которая должна заработать в середине 2020-х гг. [21].

Окриджская национальная лаборатория (ОНЛ)

Окриджская национальная лаборатория, изначально именовавшаяся Клинтонскими лабораториями, была учреждена в 1943 году в целях реализации единственной задачи: создание опытных мощностей для производства и сепарации оружейного плутония в рамках Манхэттенского проекта.

Лаборатория также была активно задействована в проектах по изучению и производству различных изотопов. С тех пор ОНЛ трансформировалась в единственный в своем роде научный центр, где решаются важнейшие национальные и глобальные проблемы в области энергетики и защиты окружающей среды. Сегодня на территории ОНЛ современные установки и лаборатории соседствуют с многочисленными старыми постройками и участками, загрязненными в ходе прошлой производственной и научной деятельности и выполнения работ по обращению с РАО.

В целях проведения восстановительных работ вся территория ОНЛ была поделена на два участка: Бетел Вэлли, где располагаются основные исследовательские установки, горячие камеры, установки для производства изотопов и их сепарации, и Мэлтон Вэлли, где находятся основные установки для обращения с отходами и их переработки, исследовательские реакторы, а также полигоны ТРО и гидроразрывные установки, использовавшиеся в прошлом для закачки ЖРО [22].



В ходе проведения работ по реабилитации территории ОНЛ предстоит решить следующие основные задачи:

- реабилитировать площадку в целях обеспечения безопасности и защиты населения, сотрудников лаборатории, наземной и водной биоты, а также грунтовых вод;
- ликвидировать неиспользуемые установки либо подготовить их к повторному использованию (извлечение исторических ядерных материалов, дезактивация);
- провести очистку загрязненной почвы и грунтовых вод до уровня, при котором в дальнейшем понадобится лишь реализация программы долгосрочного мониторинга состояния площадки;
- окончательная изоляция всех отходов, находящихся на площадке;
- освобождение площадей под новую застройку.

Объектами проведения восстановительных работ в Бетел Вэлли являются 4 неактивных исследовательских реактора, подземные резервуары с отходами, системы трубопроводов, протяженностью в несколько десятков километров, открытые хранилища жидких отходов и загрязненные почвы (рис. 1.16).

Протечки из хранилищ ЖРО и трубопроводов, соединяющих многочисленные резервуары и осадительные бассейны, привели к значительному загрязнению почвы и грунтовых вод стронцием и ураном. Кроме того, на территории Бетел Вэлли расположен пункт хранения твердых НАО и ТРУ РАО, обуславливающий загрязнение неглубоко залегающих грунтовых и поверхностных вод цезием и стронцием.

Почва вследствие протечек жидких НАО из трубопроводов также подверглась значительному загрязнению радиоактивными веществами и ртутью. Кроме того, следует отметить, что осуществление восстановительных работ в Бетел Вэлли ослож-



Рис. 1.16. Схема размещения объектов на территории Бетел Вэлли

нено тем, что график их проведения необходимо согласовывать с графиком проведения работ на расположенных в пределах площадки действующих исследовательских установках [23].

В рамках проведения работ по восстановлению, очистке и рекультивации территории Бетел Вэлли можно выделить четыре основные задачи:

- *Дезактивация и ликвидация неиспользуемых установок и стабилизация активной зоны реактора X-10.* На территории Бетел Вэлли также располагается здание 3019, внутри которого хранятся значительные объемы ^2U . На сегодняшний день 10 % урана уже захоронено на испытательном полигоне в Неваде, еще 40 % материалов до конца 2017 года будут направлены на захоронение в Неваду, а остальная часть материалов будет переработана до получения обедненного урана.

- *Экспкавация грунта* до максимальной глубины в 0,6 м в санитарной зоне промышленной площадки и до 3 м на приреакторной площадке.

- *Сооружение гидрологических изоляционных барьеров* в пунктах хранения твердых ТРУ РАО и НАО. На территории Бетел Вэлли таких полигонов девять. Работы по установке изоляционных барьеров уже проведены на трех из них. Подобные барьеры представляют собой многослойное покрытие: верхний слой – растительный грунт, далее идут дренажный слой и малопроницаемый слой из синтетического покрытия, установленного поверх слоя уплотненной глины толщиной 0,6 м. Кроме того, по периметру полигонов были оборудованы дренажные траншеи и каналы для отвода поверхностных вод (рис. 1. 17) [24].

- *Внедрение системы очистки грунтовых вод* от радиоактивных веществ и летучих органических соединений, основная задача которых – предотвратить загрязнение поверхностных вод. В 2013 году были инициированы исследования по оценке возможности использования метода биологической очистки грунтовых вод от трихлорэтилена. Для этого в четыре мониторинговые скважины, расположенные в пределах ореола загрязнения, был закачен слабый раствор эмульгированного растительного масла. Закачка позволила увеличить содержание углерода в воде и привела к росту популяции населяющих грунтовые воды микробов, способных разлагать трихлорэтилен. Результаты последующего мониторинга свидетельствовали о том, что подобная технология анаэробного дихлорирования может быть успешно реализована в промышленном масштабе для очистки грунтовых вод на площадке ОНЛ.

На территории второго участка – *Мэлтон Вэлли*, площадью более 4 км², сосредоточены различные полигоны за-



Рис. 1.17. Работы по сооружению гидроизоляционного барьера

хоронения ЖРО и ТРО, в частности, именно здесь расположены гидроразрывные установки, а также загрязненные поймы реки и озера Уайт Оук.

Наиболее загрязненными площадками Мэлтон Вэлли являются:

- Река Уайт Оук и ее притоки, а также озеро Уайт Оук и прилегающие к нему территории. Превалирующие загрязнители донных отложений – ^{137}Cs и ^{60}Co .
- Пункт хранения ТРО № 4, использовавшийся для захоронения твердых НАО в траншеях и скважинах шнекового бурения. Эта зона является мощным источником загрязнения вод озера Уайт Оук, а, следовательно, и реки Клинч ^{90}Sr . Помимо ^{90}Sr грунтовые воды на этом участке содержат значительные концентрации трития и трансурановых элементов.
- Пункт хранения ТРО №5, использовавшийся для захоронения ТРУ РАО, является источником загрязнения реки Клинч тритием – ежегодно отсюда в реку попадает более $6,7 \cdot 10^{13}$ Бк активности. Грунтовые воды загрязнены трансурановыми элементами, стронцием, тритием, а также летучими органическими соединениями.
- Пункт хранения ТРО № 6. Загрязнение грунтовых вод обусловлено органическими растворителями, а также тритием.
- Почва вокруг колодцев и траншей, использовавшихся в период с 1950-х по 1970-е гг. для захоронения ЖРО была загрязнена в результате просачивания загрязняющих веществ, из-за чего в грунтовых водах присутствуют повышенные концентрации стронция, кобальта и трансурановых элементов.
- На промышленной площадке гидроразрывных установок, где в 1960–1980-е гг. осуществлялась закачка ЖРО активностью до $3,7 \cdot 10^{16}$ Бк, также наблюдаются повышенные концентрации некоторых радионуклидов. Тем не менее, до сих пор ни единого случая выброса радиоактивных веществ в поверхностные воды, донные отложения или приповерхностный почвенный слой из этих установок зафиксировано не было.

Мероприятия по очистке и восстановлению территории Мэлтон Вэлли предусматривают проведение целого ряда работ, в том числе:

- Сооружение многослойных гидрологических изоляционных барьеров на полигонах хранения ТРО № 4, 5 и 6, а также на нескольких колодцах и траншеях. Системы барьеров предполагается оснастить сборными коллекторами для отвода ливневых стоков и грунтовых вод, что повысит эффективность гидравлической изоляции [25].
- Извлечение ТРУ РАО из 22 траншей полигона захоронения ТРО № 5 с последующей переработкой и транспортировкой в WIPP (Нью-Мексико).
- Проведение работ по выемке донных отложений из бассейна выдержки экспериментального реактора с гомогенной активной зоной и четырех бассейнов изотопных реакторов с большой плотностью нейтронного потока, которые затем будут направлены в пункт централизованного захоронения исторических РАО.
- Ликвидацию зданий на площадке новой (второй) гидроразрывной установки и установок по обращению с отходами, размещенных на территории полигонов ТРО № 5 и 6. Четыре шахты закачки и все контрольные скважины гидроразрывной установки подлежат закупорке.

- Извлечение и переупаковку всего ОЯТ, находящегося на территории Мэлтон Вэлли, с его последующей транспортировкой на полигон национальной лаборатории в Айдахо.

В табл. 1.11 указаны приблизительные сроки осуществления запланированных восстановительных мероприятий на территории ОНЛ [26].

Табл. 1.11. График работ по восстановлению и рекультивации территории ОНЛ

Перечень работ	2013– 2017	2018– 2022	2023– 2027	2028– 2032	2033– 2037	2038– 2046
Захоронение U-содержащих материалов	■	■	■	■	■	■
Захоронение ТРУ РАО	■	■	■	■	■	■
Снос сооружений и рекультивация территории Бетел Вэлли	■	■	■	■	■	■
Снос сооружений и рекультивация территории Мэлтон Вэлли	■	■	■	■	■	■

Обращение с РАО

Трансурановые РАО являются наиболее опасной категорией отходов Окриджской резервации. По преимуществу ТРУ РАО сосредоточены на площадке ОНЛ и ТПВТ, а их накопление на территории ОНЛ связано с переработкой мишеней из америция и урана в центре радиохимических исследований с целью выделения калифорния, берклия, эйнштейния и фермия. В результате ионообменной переработки мишеней образовывалось две категории отходов: жидкий радиоактивный шлам и ТРО – расходные материалы от проведения работ в горячих камерах (бумага, стекло, пластиковые трубки, обувь, ветошь и т. п.), активированные высокоэнергетическими частицами фильтры систем очистки отходных газов, а также списанное оборудование. Большая часть таких ТРО была упакована в стальные бочки или полиэтиленовые мешки, помещенные внутрь металлических ящиков, канистр и контейнеров из бетона, и затем в период с 1971 по 1981 гг. захоронена на полигоне № 5 – всего около 500 м³ отходов [27].

Что касается ТРУ ЖРО, то значительная их часть приходится на шлам, образовавшийся в 1980-е в ходе промывки осадительных бассейнов. Сегодня ТРУ ЖРО от реализации научно-исследовательских программ по производству изотопов, хранятся в резервуарном парке Мэлтон Вэлли (табл. 1.12) [28].

В 2003 году на территории ОНЛ завершились работы по сооружению центра переработки трансурановых отходов как жидких, так и твердых. Миссия центра заключается в характеристике, переработке и упаковке ТРУ отходов в целях их последующей транспортировки и захоронения в опытной установке для окончательной изоляции ТРУ РАО (WIPP). Процедура обращения с ТРУ РАО определяется в зависимости от их состава. Если отходы признаются допускающими контактное обращение, то работы с такими РАО проводятся без использования дистанционных манипуляторов персоналом, облаченным в средства индивидуальной защиты (рис. 1.18).

Табл. 1.12. Приблизительный реестр ЖРО ТРУ на территории ОНЛ

Тип РАО	Объем отходов, м ³	Установка
ТРУ шлам	740	Резервуарный парк Мэлтон Вэлли (MVST)
	63	Дополнительные резервуары Мэлтон Вэлли (MVST-CIP)
	19	Расходный резервуар выпарной установки Бетел Вэлли (BVWAT)
ВСЕГО	822	
ОНАО ТРУ	131	Резервуарный парк Мэлтон Вэлли (MVST)
	1478	Дополнительные резервуары Мэлтон Вэлли (MVST-CIP)
	498	Расходный резервуар выпарной установки Бетел Вэлли (BVWAT)
	1136	Резервуары из торкретбетона (GAAT)
ВСЕГО	3243	

Работа с ТРУ РАО, требующими дистанционного обращения, осуществляется в горячих камерах с использованием дистанционно управляемых роботов.

По состоянию на конец 2015 года центр переработал порядка 97 % ТРУ, допускающих контактное обращение, и около 80 % ТРУ, требующих дистанционного обращения. Согласно оценкам на промышленной площадке ОНЛ пока остается порядка 2 000 м³ не переработанного трансуранового шлама [29].

В 2015 году между DOE и инжиниринговой компанией CH2M Hill был заключен контракт на проектирование и сооружение новой установки для дистанционной переработки ТРУ шлама. Приблизительная стоимость создания такой установки составит более 100 млн долларов, а ее ввод в эксплуатацию намечен на середину 2020-х гг. [30].

Еще одной установкой, занимающей центральное место в осуществлении программы реабилитации Окриджского комплекса, является пункт *централизованного захоронения исторических отходов** – это приповерхностный пункт захоронения, предназначенный для окончательной изоляции отходов, образующихся в результате проведения работ по реабилитации и ре-



Рис. 1.18. Работы с ТРУ РАО, допускающими контактное обращение

* англ. Environmental Management Waste Disposal Facility.

культивации территории Окриджской резервации, в том числе НАО, опасных и токсичных отходов, а также смешанных радиационно токсичных отходов (шлама, донных отложений, средств индивидуальной защиты и элементов демонтированного оборудования).

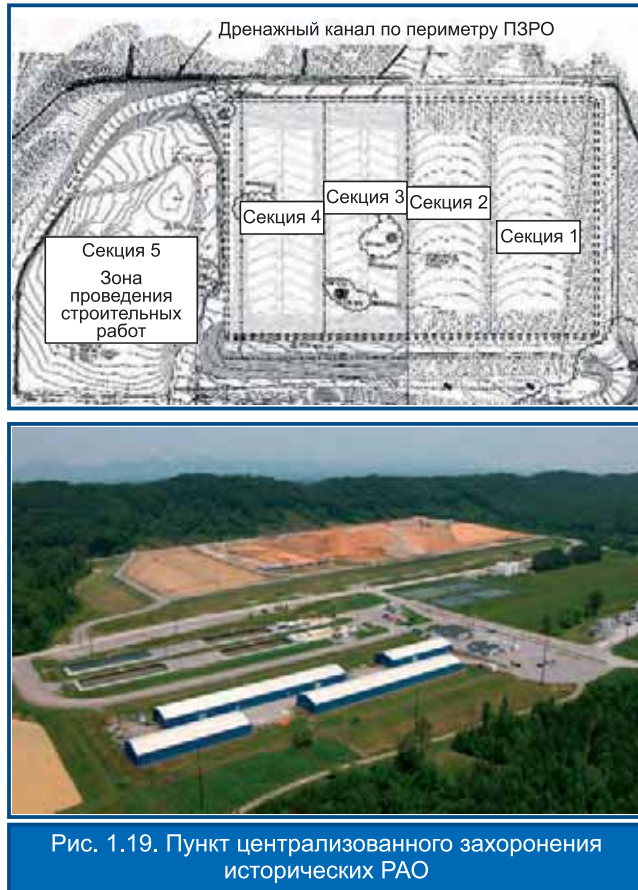
Полигон состоит из пяти секций глубиной до 23 м. Общая вместимость секций 1–4 составляет порядка 920 000 м³. После заполнения первых четырех секций в эксплуатацию будет введена пятая, способная увеличить полезный объем пункта захоронения до 1 300 000 м³. На рис. 1.19 показана принципиальная схема установки, а на рис. 1.20 (стр. 62) представлена принципиальная схема устройства внутренних изоляционных барьеров и покрытия,

устанавливаемого после завершения всех работ по размещению свыше 1,45 млн тонн отходов, в основном элементов строительных конструкций, снесенных на территории ТПВТ (здания К-25, К-27, К-33 газодиффузионного комплекса) [31, 32].

На сегодняшний день свободными остаются лишь 40 % полезного объема пункта захоронения. Ожидается, что к 2020–2021 гг. все пять камер полигона будут полностью заполнены. Между тем, согласно предварительным оценкам суммарный объем подлежащих захоронению отходов от проведения намеченных работ по очистке территории Окриджской резервации после 2020 г. может составить порядка $1,5 \cdot 10^6$ м³.

На данный момент Министерство энергетики рассматривает возможность сооружения нового пункта захоронения, который обойдется правительству США по меньшей мере в 817 млн долларов.

Всё же, затраты на реализацию альтернативного варианта, предполагающего транспортировку РАО по железной дороге и их захоронение на испытательном полигоне в Неваде, могут составить свыше 2 млрд долларов. Стоит отметить, что транспортировка отходов сама по себе нежелательна, так как она ассоциируется с куда более высоким риском облучения как персонала, так и населения. Эксперты отмечают, что для того,



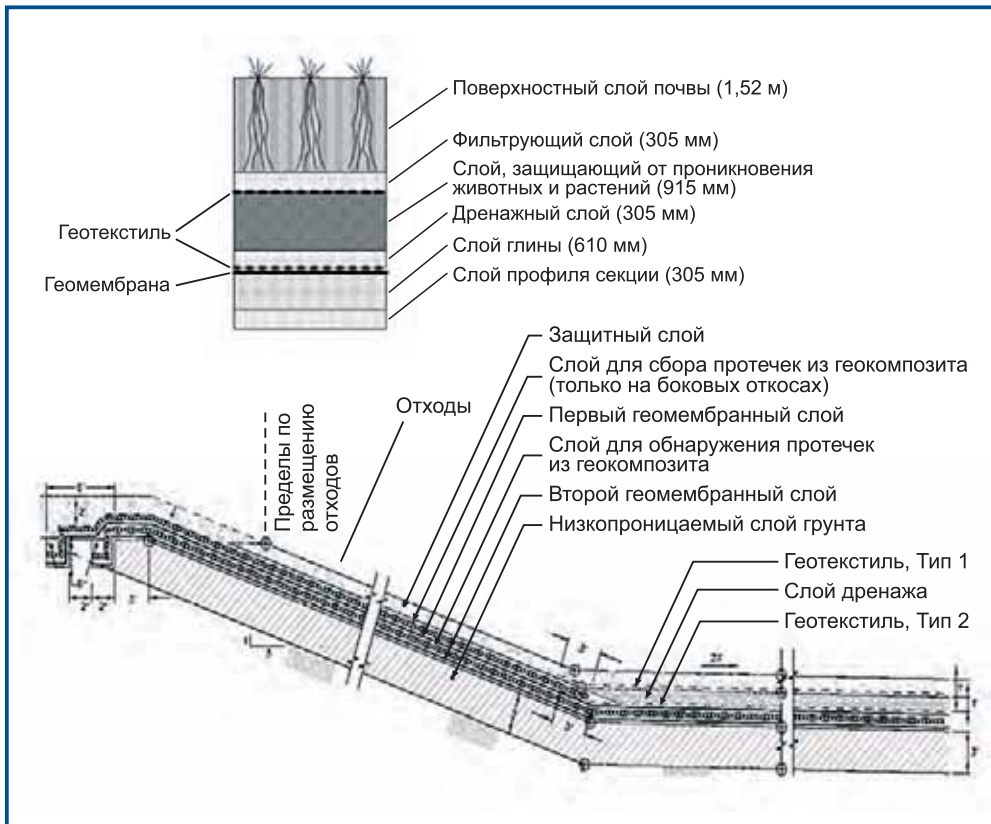


Рис. 1.20. Принципиальная схема засыпки секций захоронения (сверху) и внутренних изоляционных барьеров (снизу)

чтобы соблюсти график программы по восстановлению и рекультивации территории Окриджской резервации, возведение нового пункта захоронения необходимо начать не позднее середины 2017 года [33].

Финансовое обеспечение работ и основные подрядчики

Программу реализации работ по восстановлению и рекультивации территории Окриджской резервации можно поделить на два этапа. В краткосрочной перспективе (2014–2024 гг.) приоритетными направлениями осуществления работ является поддержание функционирования систем по обращению с отходами, очистке грунтовых вод и проведению мониторинга, а также реализация мероприятий по извлечению и перезахоронению исторических отходов и материалов. В ходе второго этапа работ, намеченного на 2025–2045 гг., планируется полностью ликвидировать неиспользуемые здания и установки на территории ОНЛ и Мэлтон Вэлли, завершить проведение мероприятий по рекультивации этих территорий с последующей передачей земель ОНЛ. На рис. 1.21 и в табл. 1.13 (стр. 64) представлен утвержденный в конце 2013 года план финансирования основных мероприятий, предусмотренных на первом этапе программы [16].

В проведении работ на территории Окриджской резервации принимают участие три основных подрядчика: URS|CH2M Oak Ridge LLC (UCOR), Wastren Advantage Inc. (WAI) и Isotek Systems LLC. Компания URS|CH2M задействована на всех трех участках Окриджской резервации, но в основном занимается проведением работ на площадке бывшего газодиффузионного комплекса.

WAI является оператором центра по переработке трансурановых отходов и отвечает за деятельность по переработке, упаковке и транспортировке всех ТРУ РАО. Кроме того, WAI занимается переработкой и подготовкой НАО и смешанных НАО, а также опасных промышленных отходов к захоронению. И наконец, основная задача Isotek, дочерней компании корпорации Energy Solutions, заключается в захоронении содержащих ^{235}U материалов [34].

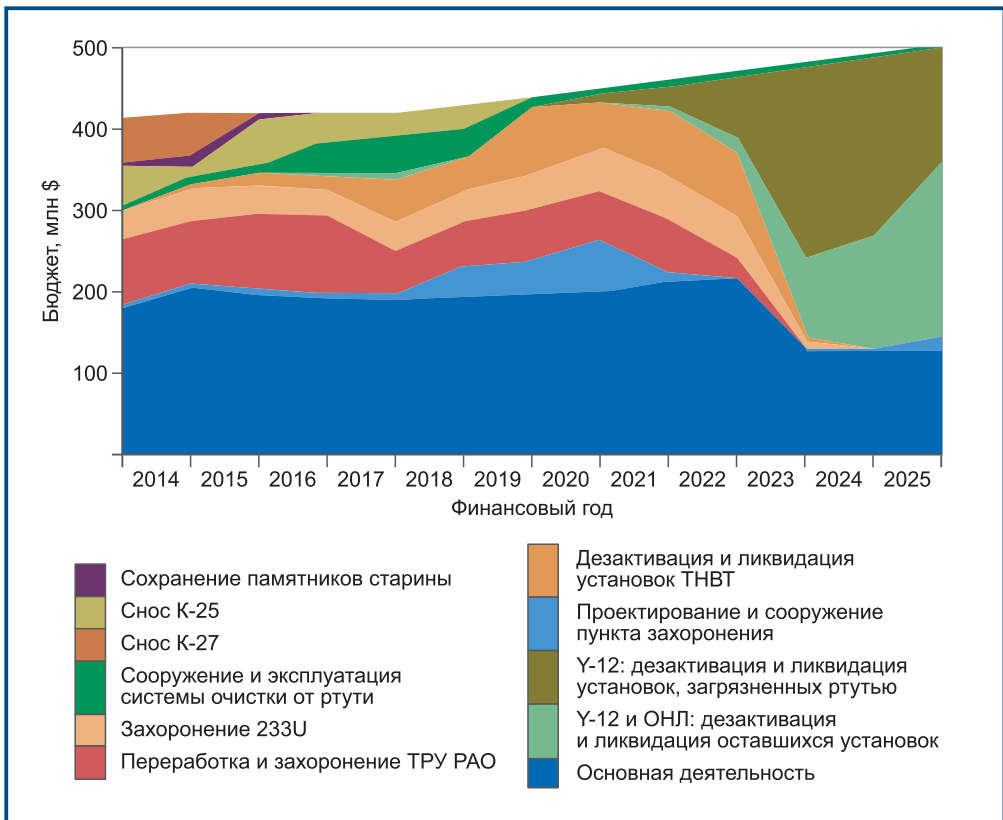


Рис. 1.21. График финансирования основных мероприятий по реабилитации Окриджской резервации на период с 2014 по 2024 годы

Табл. 1.13. График осуществления работ по очистке территории Окриджской резервации

График осуществления работ	Финансовый год											
	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Задача 1: Завершить работы по реабилитации территории ТНВТ												
Дезактивация и снос К-25	■	■										
Дезактивация и снос К-27	■	■	■	■	■	■						
Работы по защите памятников старины	■	■	■	■								
Дезактивация и снос оставшихся зданий		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Задача 2: Захоронение содержащих ²³³U материалов, размещенных в Здании 3019												
Захоронение	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
Задача 3: Завершить захоронение ТРУ РАО Окриджской национальной лаборатории												
Переработка и захоронение ТРУ РАО	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Задача 4: Устранить загрязнение ртутью на территории комплекса Y-12												
Проектирование, сооружение и эксплуатация очистной установки	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Демонтаж очистных установок								■	■	■	■	■
Задача 5: Поддержка эффективной реализации программы по очистке территории Окриджской резервации												
Проектирование и сооружение пункта захоронения	■	■	■	■	■	■	■	■	■		■	■
Основная деятельность (переработка и захоронение отходов, поддержание инфраструктуры)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

1.1.3. Хэнфорд

Хэнфорд – самая крупная промышленная площадка ядерного оружейного комплекса США, созданная в рамках Манхэттенского проекта (рис. 1.22, 1.23). На девяти реакторах и четырех перерабатывающих заводах ХЯК было произведено более 2/3 плутония США [35].

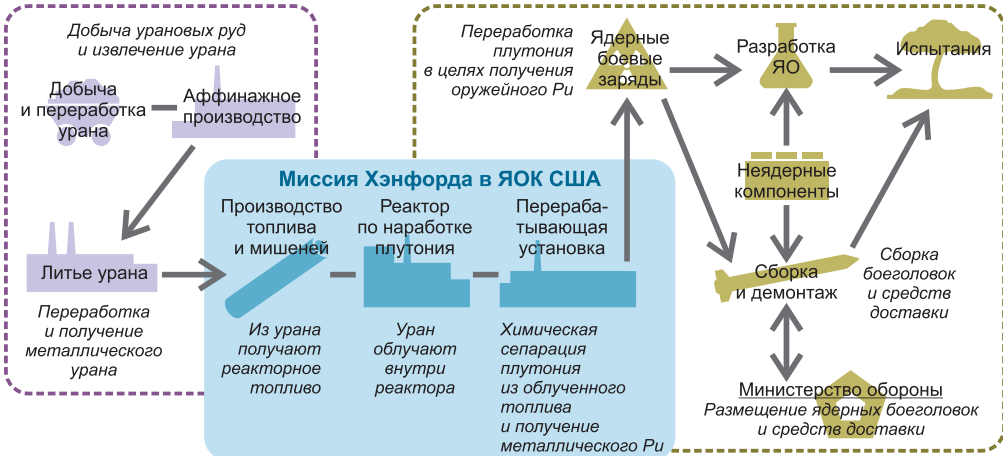


Рис. 1.22. Миссия Хэнфорда в ЯОК США

1 – Зона 300: установка для обработки ЖРО. 2 – действующий промышленный реактор. 3 – опытная установка на быстрых нейтронах. 4 – наблюдательная станция. 5 – лазерно-интерферометрическая гравитационно-волновая обсерватория. 6 – бывшая территория города Хэнфорд. 7 – завод по регенерации урана и плутония посредством экстракции (PUREX). 8 – завод В. 9 – прототип поверхностного инженерного барьера. 10 – Зона 200: установка для обработки ЖРО. 11 – пункт захоронения АПЛ. 12 – ПЗ ТРО компании U.S.Ecology. 13 – пункт централизованного захоронения. 14 – установка для инкапсуляции и пункт хранения. 15 – контейнерное хранилище. 16 – установка REDOX. 17 – завод U. 18 – завод Т. 19 – установка для аффинажа плутония. 20 – установка для приема и переработки РАО. 21 – реактор F. 22 – реактор H. 23 – реакторы D и DR. 24 – реактор N. 25 – реакторы KE и KW и установка для холодной вакуумной сушки. 26 – реакторы B и C.

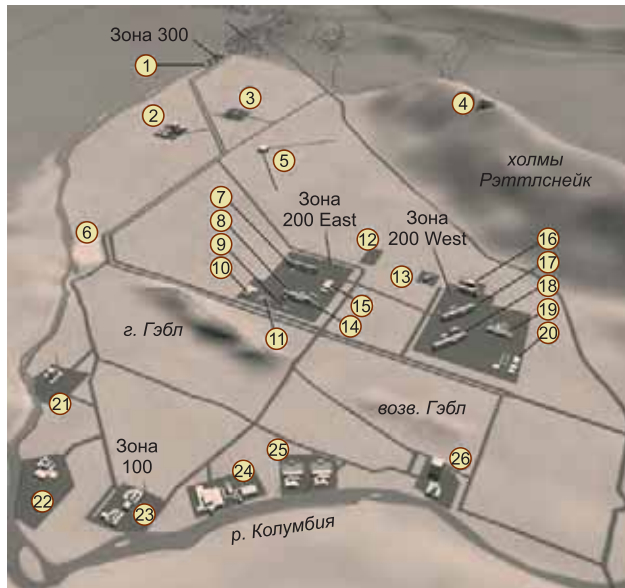


Рис. 1.23. Схема расположения основных объектов ХЯК

История создания и ключевые объекты

В 1942 году правительством США на национальном уровне была поставлена задача в кратчайшие сроки организовать промышленное производство урана и плутония. Первоочередной задачей стал выбор места для сооружения будущего комплекса. Специалисты компании «DuPont», главного подрядчика по строительству, выдвинули целый ряд требований к месту размещения нового объекта:

- возможность создания «зоны опасного производства» (не менее 19×26 км);
- наличие пространства для размещения комплекса лабораторий на удалении не менее 13 км от ближайшего реактора или радиохимического завода;
- отсутствие населенных пунктов с населением более 1 000 человек в радиусе 30 км от комплекса;
- наличие магистральной железной дороги или автомагистралей для доставки оборудования и строительных материалов;
- наличие мощного источника электроэнергии и чистой воды (требуемая скорость поступления воды для охлаждения реакторов должна превышать 95 л/мин);
- рельеф местности должен соответствовать требованиям, предъявляемым к строительству особо крупных сооружений.

Окрестности города Хэнфорд, находившегося на достаточном удалении от крупных промышленных объектов и населенных пунктов на берегу одной из крупнейших рек США – реки Колумбия, стали идеальным местом для сооружения нового комплекса. В 1943 году правительство США экспроприировало участок площадью 1 600 км² и за три недели произвело отселение местного населения из города Хэнфорд и его окрестностей – всего около 1 300 человек [35].

Строительные работы на площадке стартовали в 1943 году и вскоре приобрели невиданный размах: около 50 тысяч человек – строителей, инженеров, ученых – было задействовано в проекте сооружения объектов нового ядерного комплекса. Еще до конца второй мировой войны на территории ХЯК было построено 554 здания, включая 3 ядерных реактора («105-B», «105-D» и «105-F») и 3 линии переработки плутония («221-T», «221-B» и «221-U»), каждая протяженностью в 250 м.

Для хранения радиоактивных отходов, образывавшихся в процессе химической сепарации плутония, были сооружены «подземные резервуарные парки» по 64 резервуара каждый («241-B», «241-C», «241-T», и «241-U»). Потребовалось проложить 621 км автомобильных и 254 км железных дорог, построить 4 электрические подстанции. На строительные нужды ушло более 600 000 м³ бетона и 36 000 т конструкционной стали, а суммарные затраты на реализацию проекта в период с 1943 по 1946 год составили порядка 230 млн долларов. В табл. 1.14 приведены сроки пуска и текущее состояние основных производств Хэнфорда.

Табл. 1.14. Сроки ввода в эксплуатацию и текущее состояние основных мощностей ХЯК

Объект	Этапы пуска	Текущее состояние
Реактор В	Август 1943 г. – начало строительных работ; Сентябрь 1944 г. – реактор достиг критического состояния; 6 ноября 1944 г. – произведена первая партия плутония; Март 1949 г. – реактор начинает производство трития для создания водородной бомбы; Февраль 1968 г. – заглушен и выведен из эксплуатации; 1976 г. – реактор В объявлен памятником исторического наследия.	С 2013 г. на территории бывшей реакторной площадки действует музей
Реактор D	Начало 1940 гг. – строительные работы на площадке; Декабрь 1944 г. – ввод в эксплуатацию; Июнь 1967 г. – реактор остановлен.	Законсервирован в 2004 г.
Реактор F	Февраль 1945 г. – ввод в эксплуатацию; Июнь 1965 г. – реактор остановлен.	Законсервирован в 2003 г.
Реактор H	Октябрь 1949 г. – ввод в эксплуатацию; Апрель 1965 г. – остановлен.	Законсервирован в 2005 г.
Реактор DR	Октябрь 1950 г. – ввод в эксплуатацию; 1964 г. – реактор остановлен.	Законсервирован
Реактор С	Конец 1940 гг. – начало строительных работ; 1952 г. – ввод в эксплуатацию; 1969 г. – реактор остановлен.	Выведен из эксплуатации и законсервирован в 1998 г.
Реактор	Апрель 1955 г. – ввод в эксплуатацию; 1971 г. – реактор остановлен.	Подготовка к консервации
Реактор	Январь 1955 г. – ввод в эксплуатацию; 1970 г. – остановлен.	Подготовка к консервации
Реактор N	1963 г. – ввод в эксплуатацию; 1987 г. – реактор остановлен.	Законсервирован в 2012 г.
Завод Т	1943 г. – начало строительных работ; 1945 г. – ввод в эксплуатацию.	Эксплуатируется (операции по дезактивации, техническому обслуживанию, обработке, проверке и переупаковке РАО, а также отбору проб газа из упаковок с отходами)
Завод В	1945 г. – ввод в эксплуатацию (сепарация плутония); 1957 г. – остановлен, начало работ по модернизации; 1968 г. – вновь введен в эксплуатацию (сепарация стронция и цезия из ЖРО, хранящихся в резервуарных парках); 1985 г. – закрыт.	Дезактивирован и выведен из эксплуатации в 1998 г.

Объект	Этапы пуска	Текущее состояние
Завод S (REDOX)	1952 г. – ввод в эксплуатацию; 1967 г. – закрытие.	Здание и прилегающие территории остаются сильно загрязненными, работы по характеристике площадки и подготовке ТЭО планируется завершить к июню 2026 г.
Завод A (PUREX)	1956 г. – ввод в эксплуатацию; 1972 г. – остановлен; 1983 г. – вновь введен в эксплуатацию; 1988 г. – закрытие.	Проводятся работы по дезактивации и демонтажу, часть строений снесена, работы по характеристике площадки и подготовке ТЭО планируется завершить к июню 2026 г.
Завод U	1944 г. – ввод в эксплуатацию, до 1952 г. использовался исключительно для тренировки и подготовки персонала; с 1952 г. – химическая сепарация урана из отходов, образовавшихся в результате экстракции плутония; с 1958 г. – проведение операций по приемке, дезактивации и обслуживанию загрязненного оборудования, поступающего с других установок; 1964 г. – завод закрыт, проведены работы по дезактивации.	2010 г. – начало работ по сносу части вспомогательных сооружений и цементация внутренних помещений основного здания; здание планируется полностью ликвидировать к 2021 г.
Аффинажный завод Z	1949 г. – ввод в эксплуатацию; 1962 г. – инцидент, в ходе которого в окружающую среду было выпущено 1 200 Ки радиоактивного газа.	На более чем 90 % завершены работы по подготовке к сносу здания завода
Резервуарные парки ЖРО	1943 г. – начало сооружения однослойных емкостей для хранения ЖРО; 1964 г. – окончание строительства однослойных емкостей для хранения ЖРО – всего 149 резервуаров; 1968 г. – начало сооружения двухслойных резервуаров (всего 28); 1978 г. – начало работ по промежуточной стабилизации ЖРО из однослойных резервуаров, в ходе которых жидкость, поддающаяся откачке, была перекачена в двухслойные резервуары.	2015 г. – завершены операции по извлечению ЖРО из 15 однослойных резервуаров хранилищ; из емкостей удалено в общей сложности около 11 млн л ЖРО.

Объект	Этапы пуска	Текущее состояние
Бассейны для временного хранения ОЯТ KW и KE	Середина 1950-х гг. – строительство бассейнов с проектным сроком эксплуатации 20 лет; В начале 1990-х гг. – обнаружена утечка загрязненных вод из бассейна KE в грунт; 1994 г. – начало работ по удалению загрязненных материалов и воды из обоих бассейнов; 2004 г. – из бассейнов извлечено порядка 2 100 тонн облученных топливных стержней, направлены на сухое хранение; 2007 г. – шлам со дна бассейнов KW и KE помещен в контейнеры и направлен на временное хранение в бассейн KW, после откачки воды бассейн KE ликвидирован.	Бассейн KE ликвидирован, после того как контейнеры со шламом будут транспортированы в WIPP, KW также будет ликвидирован (к работам по извлечению шлама планируется приступить не позднее 2018 г.).
Выпарная установка 242-А	1974–1977 гг. – строительные работы; 1978 г. – начало обработки ЖРО, перекачиваемых из двухслойных резервуаров-хранилищ.	Эксплуатируется, срок службы продлен до 2040 года. С начала эксплуатации на установке было переработано порядка 300 млн л ЖРО, извлеченных из двухслойных резервуаров-хранилищ.

Реактор В (рис. 1.24) с графитовым замедлителем и водяным охлаждением стал первым полномасштабным реактором для промышленного производства плутония в США. В основу проекта была положена конструкция экспериментального реактора CP-1, разработанного Энрико Ферми, и Окриджского реактора X-10.

Сооружение реактора В заняло чуть больше года (август 1943 года – сентябрь 1944 года). В конце сентября 1944 года он достиг критического состояния и 6 ноября 1944 года после преодоления «нейтронного отравления» произвел первую партию плутония. Всего через пару недель 28 ноября была получена первая порция облученного топлива. Еще два реактора – *реактор D* и *реактор F* – были запущены чуть позже.



Рис. 1.24. Реактор В в 1944 г. (слева) и после завершения работ по выводу из эксплуатации (справа)

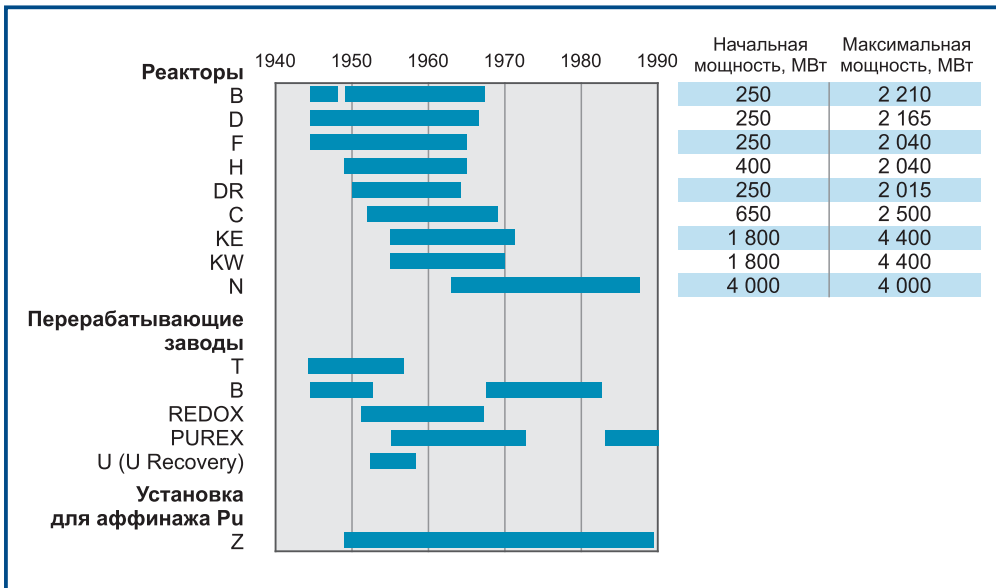


Рис. 1.25. Сроки эксплуатации и производительность основных мощностей ХЯК

Первый завод по переработке топлива (*Завод Т*) был введен в эксплуатацию в декабре 1944 года. В первые годы на хэнфордской площадке не было мощностей для производства металлического плутония, и соли нитрата плутония вывозили в Лос-Аламос. К апрелю 1945 года такие поставки осуществлялись каждые пять дней, и вскоре было получено достаточное количество плутония для производства экспериментальной установки *Тринити*, испытанной на полигоне в Аламогордо (штат Нью-Мексико), и бомбы *Толстяк*, сброшенной в Нагасаки.

За не слишком продолжительное время существования *Манхэттенского проекта* инженеры Хэнфордского комплекса достигли значительных успехов в производстве плутония. На самом деле, поскольку реактор В был первым в своем роде, многие инженерные решения, принятые его создателями, оказались поистине новаторскими. Одной из сложнейших проблем, вставших перед американскими специалистами, стало обслуживание линий сепарации: после завершения операций по переработке всего одной партии плутония оборудование линии становилось настолько загрязненным, что персоналу было небезопасно даже просто приближаться к нему. Требовалось разработать способы дистанционно управляемой замены любой детали оборудования. Инженеры компании «DuPont» решили проблему путем модульной организации агрегатов линий сепарации. Любой модуль мог быть извлечен и заменен оператором крана, находящимся в защищенной от воздействия радиации кабине. Это решение потребовало внедрения новейших для того времени технических решений: тефлона, использовавшегося как уплотнительный материал, и систем видеонаблюдения, позволявших операторам обслуживающих кранов контролировать с безопасного расстояния все производимые операции.

В сентябре 1946 года Хэнфордский комплекс был выведен из подчинения Министерства обороны США, а руководство объектом перешло к компании «General Electric». Управление комплексом осуществлялось под строгим надзором недавно созданной Ко-

миссии по атомной энергии США. После окончания второй мировой войны США столкнулись с новым противником – 29 августа 1949 года Советский Союз провел испытания собственной атомной бомбы. Началась холодная война.

В августе 1947 года предчувствие нависшей угрозы заставило правительство США принять решение о строительстве в Хэнфорде еще двух реакторов и продолжении работ по совершенствованию процессов химической сепарации плутония.

К 1963 году на территории комплекса работало уже 9 реакторов (рис. 1.25), расположенных вдоль берега реки Колумбия, 5 линий сепарации плутония на Центральном плато и более 900 вспомогательных установок и исследовательских лабораторий.

Три реактора, построенные в рамках *Манхэттенского проекта*, также подверглись значительной модернизации. Кроме того, было сооружено 177 подземных резервуаров для хранения жидких радиоактивных отходов.

Пик производства пришелся на период с 1956 по 1965 год, а всего за 40 лет эксплуатации комплекс произвел 67,4 тонны плутония (рис. 1.26).

К середине 1960-х в результате снижения потребности в оружейных ядерных материалах объемы производства плутония на установках Хэнфордского комплекса резко сократились, а к 1971 году были остановлены все реакторы, за исключением *реактора N*, который вплоть до 1987 года продолжал снабжать электроэнергией штат Вашингтон. В 1977 году ХЯК перешел под контроль Министерства энергетики США. В период между 1972–1983 гг. после закрытия единственного на площадке завода по переработке наработка плутония была полностью прекращена, что положило конец более чем 45-летней истории производства ядерных оружейных материалов в Хэнфорде.

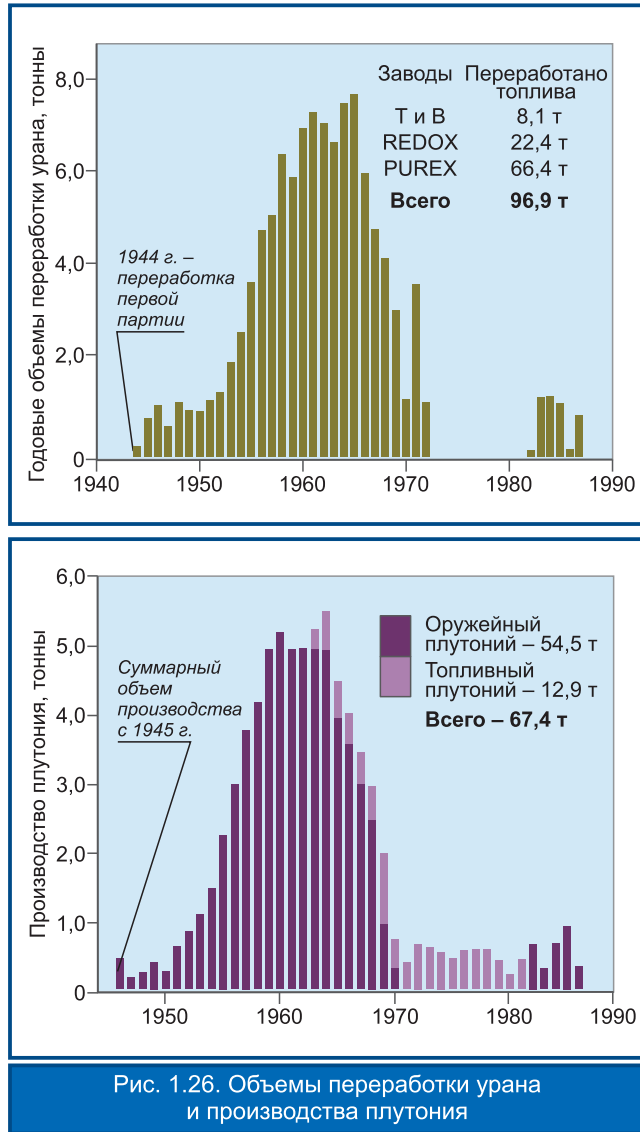


Рис. 1.26. Объемы переработки урана и производства плутония

Исторические практики обращения с РАО и загрязнение окружающей среды

За десятилетия эксплуатации объектов Хэнфорда на площадке были накоплены громадные количества как радиоактивных, так и химических отходов, большая их часть размещалась в пунктах хранения на территории комплекса. Кроме того, значительному загрязнению подверглись воды реки Колумбия, почва и грунтовые воды. В целом, на долю Хэнфордского комплекса приходится около 40 % всего радиоактивного загрязнения ЯОК США. Причем большая часть отходов (более 85 %) образовалась в результате эксплуатации перерабатывающих установок.

По мере внедрения все более и более совершенных и эффективных технологий объем генерируемых отходов становился меньше. Так, в период 40–50-х гг. при осуществлении висмут-фосфатной переработки на заводах Т и В на каждую метрическую тонну переработанного топлива приходилось по 30 м³ отходов. Позднее переработку стали осуществлять на установке REDOX, при этом объем образующихся отходов был сокращен до 15 м³/т. Затем после ее модернизации удалось добиться снижения этой величины всего до 2 м³. Усовершенствован с точки зрения образования отходов был и PUREX процесс: если вначале на тонну переработанного топлива приходилось 5 м³ отходов, то после модернизации производства количество образующихся отходов было сокращено до 1 м³.

Высокоактивные отходы радиохимического производства хранились в расположенных под землей бетонных резервуарах, изнутри облицованных углеродистой сталью («резервуарные парки»). Низкоактивные ЖРО и охлаждающая реакторная жидкость закачивались в специальные осадительные бассейны и пруды. Поскольку большая часть таких ЖРО содержала значительные количества короткоживущих радионуклидов, то выдержка сбросных вод в промежуточных бассейнах приводила к уменьшению их активности до 150–200 тысяч раз [36]. После выдержки загрязненная вода сбрасывалась обратно в реку. Хранение ТРО производилось в неглубоких траншеях или внутри специальных установок. Всего территория комплекса насчитывала более 1 600 объектов, содержащих РАО. Среди наиболее загрязненных участков следует отметить участок 618-11 площадью 2,5 га, расположенный в 13 км к северу от Зоны 300 и примыкающий к площадке Северо-западного промышленного реакторного комплекса. В 1999 году в пробах грунтовых вод, отобранных на этом участке, была найдена самая высокая концентрация трития – в 400 раз выше значений, прописанных в стандарте качества питьевой воды. В период с 1962 по 1967 гг. на этом полигоне захоранивались НАО и ВАО, полученные в ходе проведения исследований и экспериментов в Зоне 300: в общей сложности около 10 000 м³ материалов, загрязненных трансурановыми элементами [37].

Все отходы и ядерные материалы, имеющиеся на территории Хэнфордского комплекса, можно разделить на следующие группы:

- жидкие радиоактивные отходы и ядерные материалы в пунктах хранения;
- твердые радиоактивные отходы в пунктах захоронения и хранения;
- сбросы и выбросы радиоактивных материалов.

ЖРО и ядерные материалы в пунктах хранения

Хранение ЖРО и ядерных материалов в Хэнфорде производится в разного рода сооружениях: зданиях, подземных резервуарах и бетонированных бассейнах – всего более 500 различных объектов.

В период с 1944 года и до конца 1980-х гг. ХЯК произвел в общей сложности около $2 \cdot 10^6$ м³ жидких ВАО. В результате выпаривания, сброса отходов на почву, химической переработки и утечки отходов из резервуаров-хранилищ фактический объем жидких ВАО сократился приблизительно на 90% и составил всего $204 \cdot 10^3$ м³. Их суммарная активность оценивалась приблизительно в $7,2 \cdot 10^{18}$ Бк, а содержание химических загрязнителей превышало 220 000 т.

В общей сложности на территории ХЯК расположено 18 резервуарных парков состоящих из 177 подземных емкостей. В период 1943–1964 гг. было сооружено 149 резервуаров объемом 210–3800 м³ с однослойной оболочкой из углеродистой стали и расчетным сроком службы 20 лет. Известно, что 67 из них впоследствии дали течь, в результате в окружающую среду было выброшено более 3800 м³ ЖРО. Впервые такая

протечка была зафиксирована в 1956 году. Начиная с 1968 года, в целях обеспечения более надежного удержания отходов было сооружено 28 резервуаров с двухслойной оболочкой из углеродистой стали (рис. 1.27) объемом 3800 – 4400 м³ каждый с расчетным сроком службы 50 лет.

В последующие годы в них была перекачана большая часть ЖРО из однослойных резервуаров. До сих пор не было зафиксировано ни одной протечки двухслойных емкостей, даже несмотря на то, что многие из них эксплуатируются уже на протяжении более 45 лет.

Вплоть до 2004 года около 80% оставшегося облученного уранового топлива хранилось на площадках реакторов KE и KW в двух стареющих наполненных водой бетонных резервуарах, облицованных изнутри углеродистой сталью (рис. 1.28, стр. 74) – около 105 000 топливных сборок, произведенных реактором N, общим весом в 2100 т. и суммарной активностью $2 \cdot 10^{18}$ Бк.

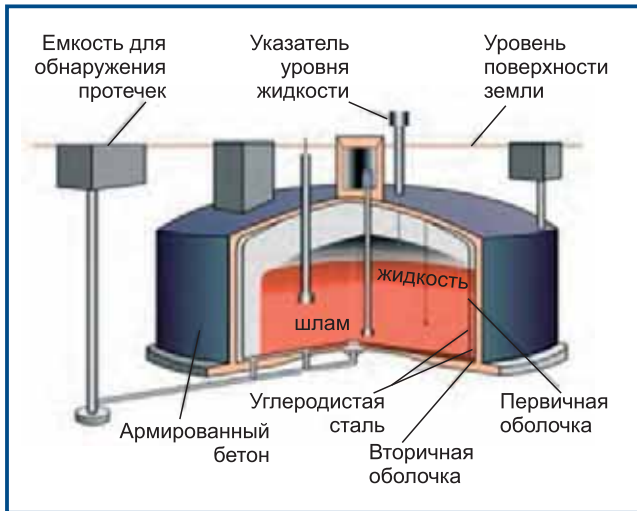


Рис. 1.27. Двухслойный резервуар-хранилище ЖРО



А – здание реактора. В – водоподготовительная установка. С – установка для хранения обработанной воды. D – насосная станция для подачи охлаждающей воды. E – бассейны выдержки охлаждающей воды.

Рис. 1.28. Вид с воздуха на реакторы KE и KW, а также вспомогательные установки, расположенные вдоль берега реки Колумбия.

Некоторые сборки корродировали, и, как следствие, вода бассейнов, донные отложения и бетонные стены резервуаров подверглись значительному радиоактивному загрязнению, а из-за многократных утечек в прошлом радиоактивные вещества также проникли в почву и грунтовые воды. Количество плутония, содержащегося в ОЯТ бассейнов К и опытной установке на быстрых нейтронах, а также на территории завода по аффинной обработке плутония, составляет около 11 т.

Пункты захоронения ТРО

На территории ХЯК расположено 75 пунктов захоронения (рис. 1.29), содержащих в общей сложности $710\,000\text{ м}^3$ ТРО, суммарная активность которых не превышает $2 \cdot 10^{18}$ Бк. Кроме того, эти объекты содержат порядка 65 тыс. т. химических отходов. В Зоне 200 в виде ТРО хранятся 590 т. урана и 360 кг плутония, а в подземных тоннелях площадки завода А размещены крупногабаритные агрегаты, в том числе загрязненные железнодорожные вагоны и локомотивы.

Вплоть до 1970 года тщательной характеристики отходов перед их захоронением не проводилось: трансурановые отходы часто размещали вместе с обычными РАО. Более того, не предпринималось никаких мер для облегчения работ по последующему извлечению, переупаковке и перевозке отходов, что в дальнейшем существенно образом затруднило проведение работ по реабилитации территории ХЯК.



Рис. 1.29. Открытые траншеи пункта захоронения ТРО в Зоне 200 до закрытия слоем грунта

Сбросы и выбросы РАО

По приблизительным оценкам суммарная активность веществ, поступивших в почву и грунтовые воды Хэнфорда, составляет около $7,4 \cdot 10^{16}$ Бк. Кроме того, в окружающую среду были выброшены значительные количества опасных химических веществ –

всего около 90 000–270 000 т. Наиболее загрязненной считается Зона 200 и прилегающие к ней территории.

В первые месяцы работы ХЯК в целях осаждения низкоактивные ЖРО сбрасывались в неглубокие котлованы. В результате жидкость просачивалась сквозь песчаный грунт, обуславливая радиоактивное загрязнение почвы и грунтовых вод. Часть жидкости испарялась, а оставшиеся на поверхности вещества усваивались растениями и животными, разносились ветром. Так, на территории комплекса образовались многочисленные загрязненные заболоченные участки.

Вскоре такая практика была признана недопустимой. ЖРО стали закачиваться в скважины, что приводило к перемещению радионуклидов в низлежащие водоносные горизонты. Через несколько месяцев от этой практики тоже отказались, и впоследствии использовали для удаления лишь незначительных объемов ЖРО. Большие объемы жидких отходов стали сбрасывать в колодцы, заполненные гравием поля фильтрации (французская дрена), дренажные и открытые траншеи, которые затем засыпали гравием (рис. 1.30) [37].

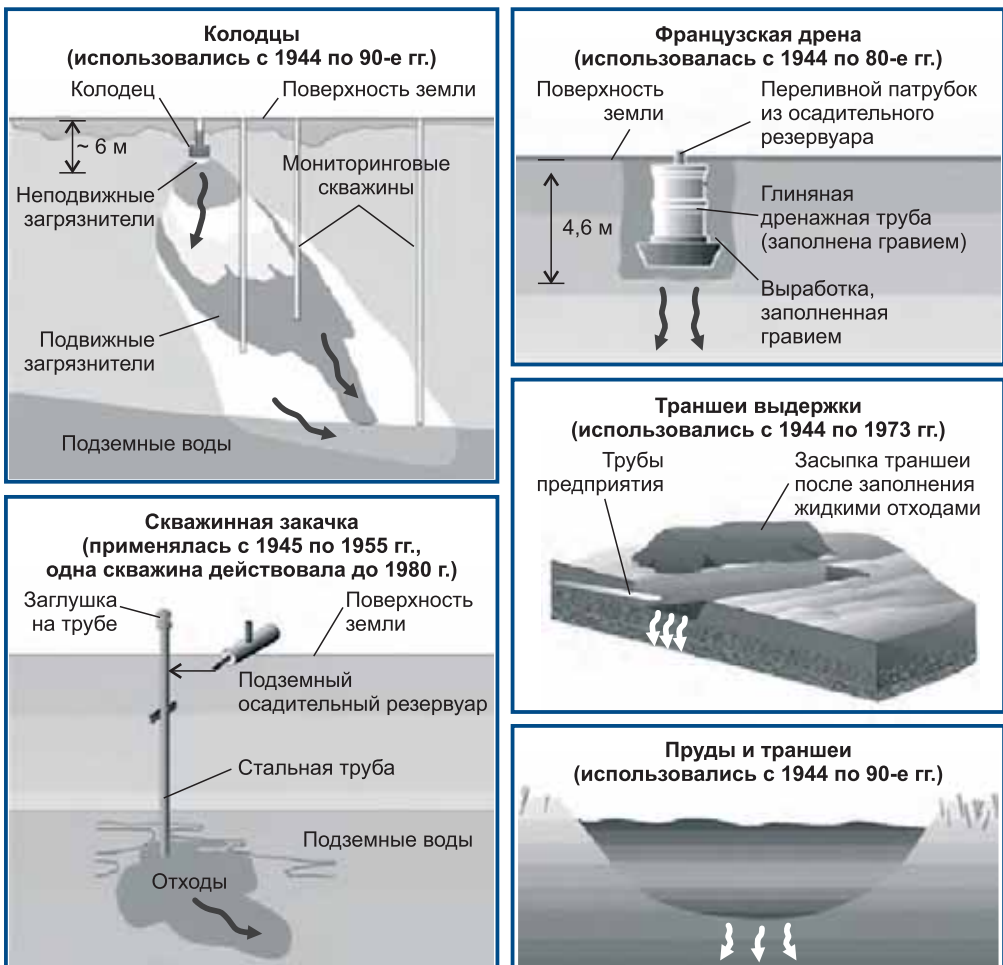


Рис. 1.30. Исторические практики обращения с ЖРО в Хэнфорде

За последние 50 лет суммарный объем сброса ЖРО в почву и подземные воды составил порядка 1,5–1,7 млрд м³, при этом большая часть загрязнения приходится на Зону 200. Столь значительные объемы поступления ЖРО обусловили возникновение гидравлических сил, способствовавших ускоренной миграции загрязняющих веществ и увеличению глубины их проникновения.

Ареал загрязнения грунтовых вод, характеризующийся присутствием металлов (например, хрома), химических веществ (солей азотной кислоты, трихлорэтилена, тетрахлорметана) и радиоактивных веществ (трития, ⁹⁹Tc, ⁹⁰Sr), распространился на территорию площадью около 400 км² (рис. 1.31). На некоторых участках этого ареала концентрации загрязнителей превышают значения, прописанные в стандарте качества питьевой воды и других нормах безопасности.

Известно, что тритий, ⁹⁹Tc, ¹²⁹I, Sr и нитраты способны мигрировать со скоростью, сопоставимой со скоростью движения подземных вод, а такие загрязнители, как ⁶⁰Co, ²³⁹Pu, ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr перемещаются медленнее из-за частичного задерживания осадочными породами. Отдельные радионуклиды, а также нерадиоактивные металлы хорошо сорбируются на поверхности или внутри кристаллической структуры таких пород.

Для наиболее мобильных загрязнителей время перемещения грунтовых вод от Зоны 200 East до реки Колумбия по выгнутой линии протяженностью 16 км может составить несколько десятилетий. Так, например, тритий начал поступать в реку лишь спустя 20 лет с момента захоронения отходов. Время перемещения загрязнителей из Зоны 200 West может вообще превысить 100 лет. Это связано с тем, что осадочные породы в нижележащем водоносном горизонте обладают меньшим коэффициентом фильтрации, чем в Зоне 200 East. Именно по этой причине ареал загрязнения грунтовых вод Зоны 200 East распространился на 250 км², а ареал загрязнения Зоны 200 West занимает намного меньшую площадь.

Как отмечалось выше, утечки из 67 резервуаров с однослойной оболочкой привели к значительному загрязнению почвы и поверхностных вод. Химический состав этих отходов (нитрат натрия, Cs) и характеристики площадок, где происходили утечки, позволили загрязняющим веществам мигрировать в намного более глубокие слои грунта, чем предполагалось изначально. Кроме того, с 1946 по 1958 гг. около 450 000–490 000 м³ ЖРО были намеренно слиты из резервуаров-хранилищ в целях высвобождения свободного места для закачки новых объе-

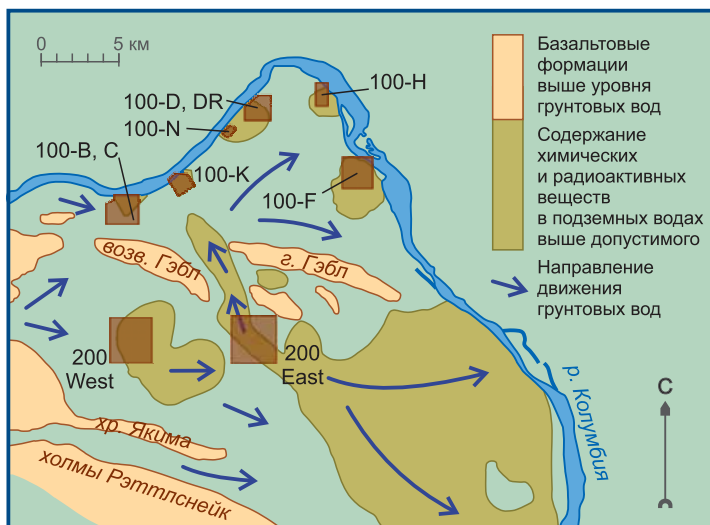


Рис. 1.31. Ареал химического и радиоактивного загрязнения подземных вод Хэнфорда

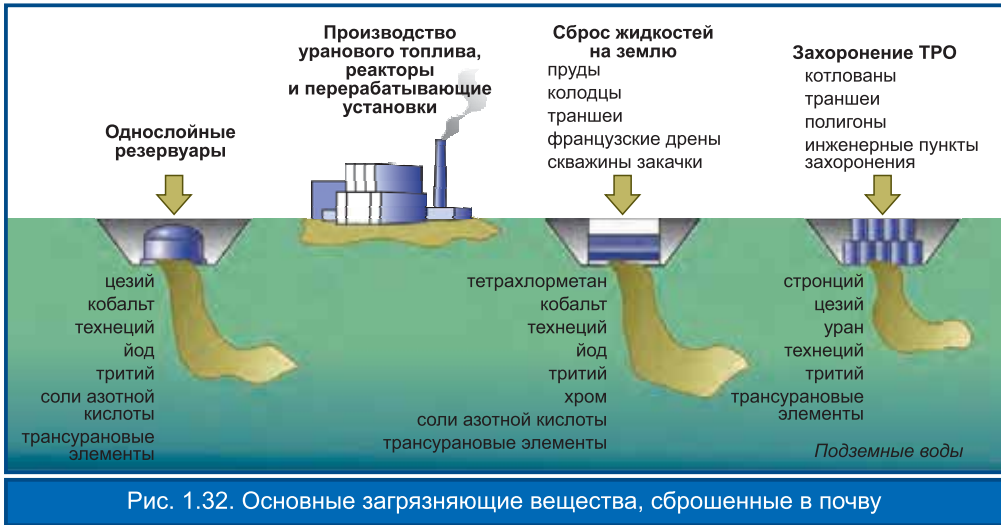


Рис. 1.32. Основные загрязняющие вещества, сброшенные в почву

мов отходов. Известно, что предварительной переработке подверглась лишь небольшая часть этих ЖРО. В общей сложности в почву было сброшено более 275 000 т. химикатов и радиоактивные вещества суммарной активностью около $2,2 \cdot 10^{15}$ Бк.

Выбросы ЖРО привели к загрязнению части водоносных горизонтов (рис. 1.32).

Так, в грунтовых водах Зоны 100 присутствуют такие загрязнители, как тритий, нитраты, ^{90}Sr , ^{99}Tc , U, Ni, Cr, трихлорэтилен и Pu, а загрязнение Зоны 200 обусловлено тетрахлорметаном, нитратами, тритием, ^{99}Tc , ^{129}I , ^{60}Co , ^{239}Pu , ^{137}Cs , U и ^{90}Sr .

В период 1940–70-х гг. значительными оказались и сбросы ЖРО в воды реки Колумбия. Суммарная активность сбросов, по большей части определявшихся короткоживущими радионуклидами*, произведенных восьмью реакторами в период с 1944 по 1971 гг. в реку Колумбия составила около $4,07 \cdot 10^{18}$ Бк.

В табл. 1.15 представлены значения суммарной активности сбросов для пяти радионуклидов, обуславливавших 94 % общей величины дозовой нагрузки на население, проживавшее ниже по течению. Следует отметить, что в донных отложениях и стоячих водах вблизи берегов речных островов и плотин, расположенных ниже по течению реки Колумбия, обнаруживаются и долгоживущие радионуклиды (^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{138}U , ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu).

Табл. 1.15. Пять радионуклидов, определявших 94 % дозовой нагрузки на людей, проживавших ниже по течению от ХЯК

Радионуклид	Активность, Бк
^{24}Na	$4,66 \cdot 10^{17}$
^{32}P	$8,51 \cdot 10^{15}$
^{239}Np	$2,33 \cdot 10^{17}$
^{65}Zn	$1,81 \cdot 10^{16}$
^{76}As	$9,25 \cdot 10^{16}$

* ^{56}Mn , на который приходится две трети выброшенной активности, обладает периодом полураспада всего в 2,6 ч.

Наиболее интенсивные выбросы загрязняющих веществ в реку Колумбия наблюдались в период с 1956 по 1965 гг., когда на территории комплекса одновременно работало сразу восемь реакторных установок. В то время объем выбросов составлял от $3,7 \cdot 10^{14}$ до $4,44 \cdot 10^{14}$ Бк/день. Пик загрязнения пришелся на 1963 год – ежедневно в реку сбрасывались ЖРО суммарной активностью около $5,4 \cdot 10^{14}$ Бк, что обуславливало дополнительный вклад в облучение населения, и для среднестатистического жителя близлежащих населенных пунктов составляло от 0,01 до 0,05 мЗв/год. При этом люди, активно употреблявшие в пищу рыбу и использовавшие воду из реки, могли получить до 0,5–1,3 мЗв/год, что в среднем на 15–45 % выше, уровня облучения от естественного радиационного фона. На сегодняшний день уровни активности вод реки Колумбия существенно ниже, хотя загрязняющие вещества, переносимые грунтовыми водами, до сих пор поступают в реку (в основном активность вод обусловлена тритием) [35].

Радиоактивные выбросы в атмосферу с реакторных установок были невелики и в основном определялись наведенным в примесях гелия аргоном. До 1960 года воздушные выбросы в Хэнфорде вообще не подвергались очистке, а первые фильтры на системе воздушных сбросов появились только в 1961 году [38].

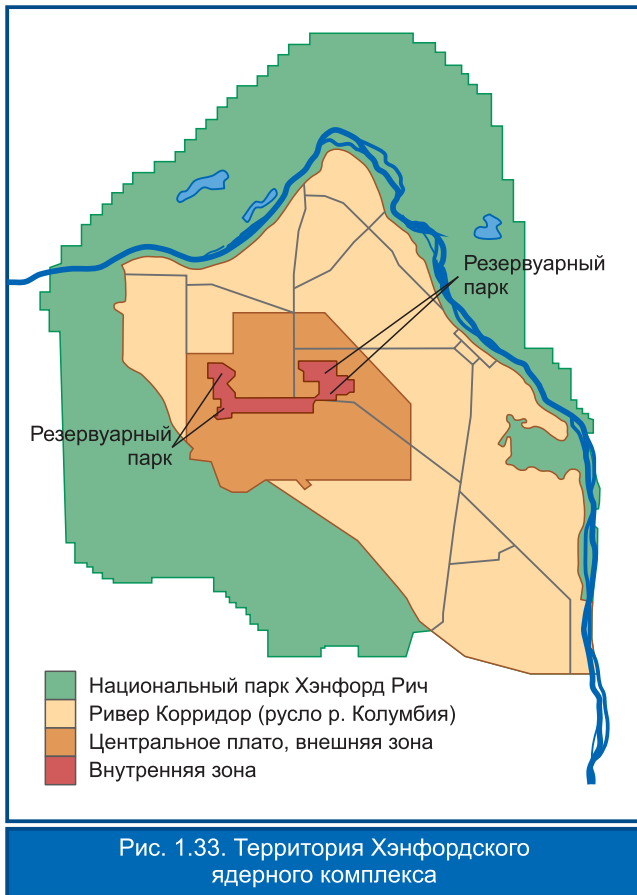
В общей сложности в период эксплуатации ХЯК суммарная активность газо-аэрозольных выбросов от реакторов и перерабатывающих заводов составила порядка $1,15 \cdot 10^{18}$ Бк. На долю реакторов пришлось $4,44 \cdot 10^{17}$ Бк, из них $3,7 \cdot 10^{17}$ Бк в период между 1944–1970 гг. было выброшено в ходе эксплуатации первых восьми реакторных установок, а остальные $7,4 \cdot 10^{16}$ Бк – реактором N. Более 99 % от объема выбросов приходится на ^{41}Ag с незначительной примесью ^{14}C и трития. В целом эти выбросы привели к совсем незначительному увеличению дозовой нагрузки на местное население – около 0,02–0,04 мЗв/год, что всего на 1 % выше уровня облучения от естественного радиационного фона.

Что касается перерабатывающих заводов, то суммарная активность газо-аэрозольных выбросов в период с 1944 по 1972 год составила около $7,4 \cdot 10^{17}$ Бк. При этом основная активность (99 %) аэрозолей определялась ^{131}I , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{90}Sr , ^{239}Pu и ^{144}Ce . Максимальные уровни выброса ^{131}I отмечались в первые годы работы предприятий. Например, в октябре 1945 года месячный выброс ^{131}I составил $1,2 \cdot 10^{15}$ Бк. Всего за период с 1944 по 1946 гг. суммарный выброс йода оценивался на уровне $1,76 \cdot 10^{16}$ Бк. Лишь в 1948 году на заводах В и Т были установлены водяные системы улавливания аэрозолей йода. Фильтрационные системы с использованием серебра были введены в эксплуатацию в 1950 году, что позволило снизить выбросы ^{131}I примерно в 1000 раз. Суммарный выброс йода за все годы работы радиохимического производства составил порядка $2,73 \cdot 10^{16}$ Бк.

Следует отметить еще один случай, произошедший в 1949 году, когда на территории Хэнфорда произошел намеренный выброс радиоактивных веществ в атмосферу. В сентябре того года пробы воздуха, взятые американским самолетом вблизи побережья полуострова Камчатка, насторожили американских специалистов. Тогда американцы еще не знали, что Советский Союз произвел испытание своей первой атомной бомбы, и решили, что русские начали переработку ОЯТ малой выдержки, т. е. топлива, выгруженного из реактора менее чем за 3 недели до начала переработки. Американцы решили оценить объемы производства плутония в СССР и провели эксперимент под кодовым названием «Green Run». 1 декабря 1949 года на заводе Т была произведена переработка 1 тонны ОЯТ, выгруженной из реактора всего за 16 дней до этого. В ходе перера-

ботки в атмосферу через вентиляционную систему завода поступило около $4,07 \cdot 10^{14}$ Бк ^{131}I и ^{133}Xe . Затем пробы воздуха были взяты на анализ с целью сопоставления объемов производства плутония в США и СССР.

Мероприятия по реабилитации территории ХЯК



В 80-е гг. после того, как правительство США рассекретило многие документы по Хэнфорду, вокруг ядерного комплекса стали разгораться жаркие дискуссии по поводу необходимости рекультивации и восстановления радиоактивно загрязненных территорий ХЯК. В мае 1989 года Министерство энергетики США (DOE), Агентство по охране окружающей среды (EPA) и Экологический департамент штата Вашингтон (Ecology) подписали трехстороннее соглашение* о начале работ по восстановлению территории Хэнфордского ядерного комплекса и совершенствованию практик обращения, хранения и захоронения опасных отходов. В соответствии с этим соглашением был утвержден официальный график проведения работ по рекультивации и выводу из эксплуатации установок ХЯК сроком на 30 лет.

Программа работ предусматривала решение 8 основных задач:

- защита вод реки Колумбия;
- восстановление качества грунтовых вод и обеспечение защиты здоровья человека и окружающей среды;
- рекультивация и восстановление участка Ривер Корридор (русло реки Колумбия) и вывод из эксплуатации установок, расположенных в его пределах (рис. 1.33);
- очистка территории Центрального плато и резервуарных парков;

* (англ.) Tri-Party Agreement

- реализация мероприятий, направленных на снижение уровня опасности, исходящей от резервуарных хранилищ ЖРО, в том числе:
 - обеспечение безопасного хранения ЖРО до момента их передачи на переработку;
 - иммобилизация отходов;
 - закрытие парков резервуарных хранилищ и устранение последствий прошлых проливов радиоактивных и химических веществ в почву;
- обеспечение безопасного обращения с материалами, относящимися к объектам ядерного наследия, для которых предусмотрено захоронение вне территории ХЯК, в том числе с особыми ядерными материалами (включая плутоний), ОЯТ, трансурановыми РАО и остеклованными ВАО;
- консолидация операций по переработке, хранению и захоронению отходов на территории Центрального плато;
- разработка и внедрение системы ведомственного контроля и ответственного планирования и распределения ресурсов в целях обеспечения защиты человека и окружающей среды, а также культурных, исторических и экологических ресурсов территории ХЯК после окончания проведения восстановительных мероприятий [39].

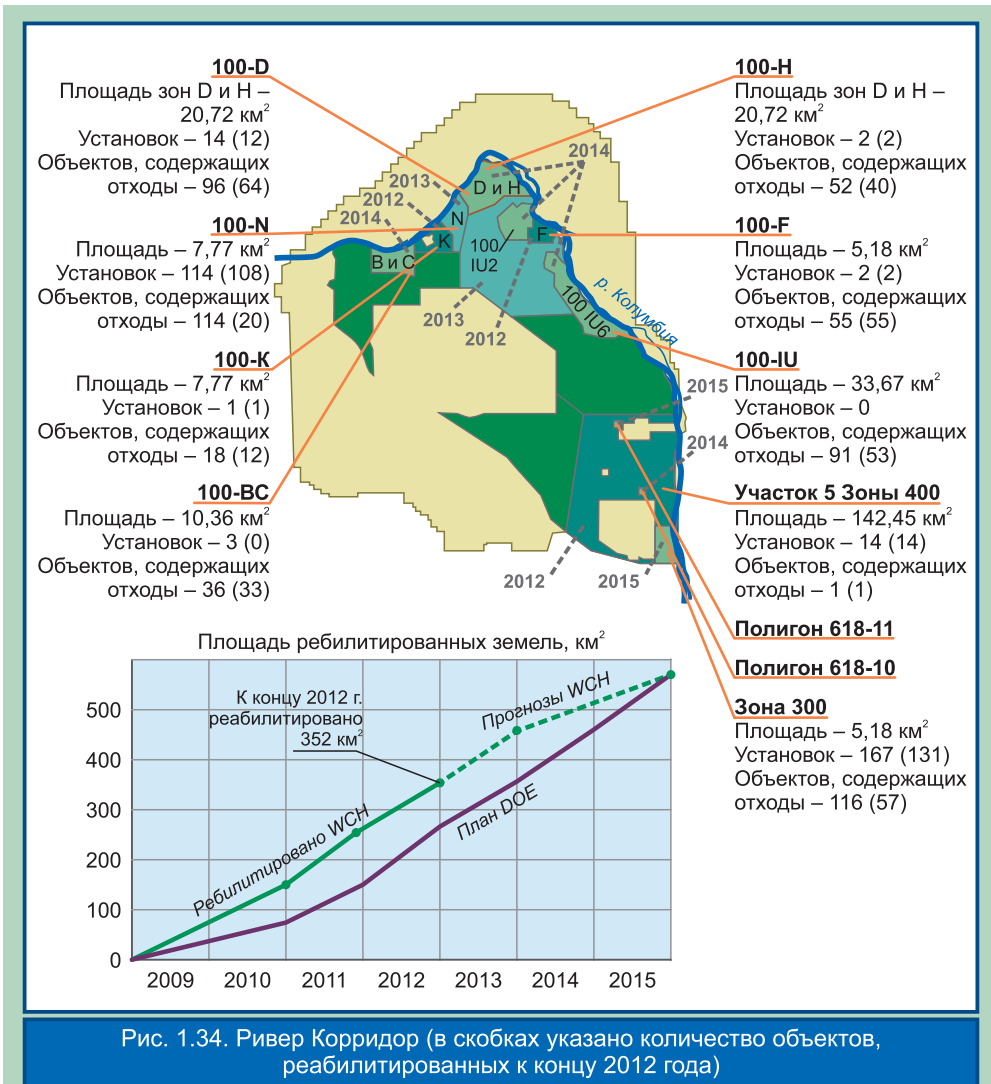
Ривер Корридор

Участок Ривер Корридор представляет собой часть территории ХЯК площадью около 570 км², протянувшийся вдоль южного берега реки Колумбия. Территория Ривер Корридор разбита на несколько зон:

- **Зона 100** площадью 11 км², где расположены девять остановленных промышленных реакторов, а также множество вспомогательных установок и пунктов хранения ТРО и ЖРО;
- **Зона 300** площадью 1,5 км², где находятся заводы по производству топлива, многочисленные научно-исследовательские лаборатории и опытные установки, а также пункты захоронения ТРО и ЖРО;
- **Зона 400**, где располагается остановленный опытный реактор на быстрых нейтронах;
- **Зона 600**, включающая более 150 различных установок и более 100 пунктов захоронения, в том числе два полигона с трансурановыми РАО, представляющими особо сложную задачу с точки зрения проведения работ по реабилитации.

Десятилетняя программа по реабилитации территории Ривер Корридор стартовала в сентябре 2005 года. Контракт на проведение большей части работ, включенных в программу общей стоимостью 1,9 млрд долларов, получила компания Washington Closure Hanford (WCH).





WCH предстояло:

- ликвидировать 329 зданий и сооружений;
- произвести очистку 555 пунктов захоронения и иных площадок, содержащих отходы;
- осуществить комплекс мероприятий по консервации двух дезактивированных реакторов-наработчиков плутония и одной ядерной установки;
- захоронить более четырех тонн загрязненных материалов в Пункте централизованного захоронения исторических РАО, действующем на территории Хэнфорда (Зона 200).

Наиболее важной задачей в области реабилитации территории Ривер Корридор является восстановление качества грунтовых вод до уровня, при котором концентрации содержащихся в них химических и радиоактивных веществ не превысили бы значений,

установленных стандартами качества питьевой воды. В случае если для каких-либо участков добиться желаемого уровня реабилитации технически невозможно или нецелесообразно, принимают меры по ограничению миграции загрязнителей в грунтовые воды. Кроме того, согласно разработанной концепции, основные источники загрязнения, расположенные вблизи берега реки Колумбия, планируется окончательно изолировать в пункте захоронения, действующем на территории Центрального плато (ERDF).

В рамках программы по восстановлению русла реки Колумбия вся территория Ривер Корридор была разделена на несколько площадок (см. рис. 1.34). В зоне 100 расположены 6 из них: 100-BC, 100-K, 100-N, 100-D/H, 100-IU, 100-F. На этих площадках работы по восстановлению и рекультивации стартовали еще в 1996 году и продолжаются по сей день, хотя выполнение основной части работ (около 90 %) было завершено еще к концу 2015 года.

За это время в Зоне 100 был осуществлен целый комплекс различных мероприятий: демонтаж установок, удаление загрязненной почвы и захоронение загрязненного материала в централизованном пункте захоронения (ERDF). На большинстве площадок толщина удаляемого слоя загрязненной почвы составила 4,5 м, однако в ряде случаев в целях предотвращения загрязнения грунтовых вод приходилось проводить экскавацию и более глубоких слоев грунта. Только за 2012 год в централизованный пункт захоронения поступило 1 089 500 тонн загрязненного грунта из Зоны 100. Основной трудностью, с которой пришлось столкнуться при проведении реабилитации, стало отсутствие полных сведений об отходах, размещенных на полигонах в период эксплуатации реакторов. В этой связи особое значение на данном этапе приобрели работы по характеристике РАО в целях обеспечения безопасности персонала и оптимизации процедур обращения с отходами и их захоронения.

Среди важнейших задач программы рекультивации Зоны 100 следует отметить комплекс мер по предотвращению поступления гексавалентного хрома, являющегося наиболее распространенным веществом, обуславливающим загрязнение грунтовых вод на участках 100-B/C, 100-D, 100-N и 100-K, в воды реки Колумбия. Содержание этого элемента более чем в 100 раз превышает нормативные значения, а его присутствие в таких количествах связано с тем, что в прошлом для химической обработки охлаждающей воды прямоточных реакторов использовался бихромат натрия. Вода с содержанием этого вещества после выдержки в промежуточных бассейнах сбрасывалась в реку. Кроме того, на некоторых участках загрязнение явилось следствием многочисленных проливов при выгрузке и хранении бихромата натрия. Для решения данной проблемы производится удаление загрязненного слоя почвы и внедрение систем по обработке грунтовых вод, так называемых насосных системы очистки.

Еще одним опасным загрязняющим веществом является ^{90}Sr . Наибольшие концентрации ^{90}Sr встречаются в грунтовых водах площадки 100-N. Удаление ^{90}Sr представляет особую сложность в связи с тем, что данный элемент имеет свойство прочно прикрепляться к частицам грунта, что делает невозможным использование обычных насосных систем обработки грунтовых вод. Применение подобных технологий в 90-е гг. показало, что такие системы позволяют удалить всего 1/10 часть загрязнения по массе в сравнении со скоростью естественного радиоактивного распада в течение сходного периода времени. Результаты последних исследований свидетельствуют о том, что добиться значительного снижения поступления этого загрязнителя в реку можно только благодаря использованию реактивного барьера протяженностью около 760 м.

На площадке 100-К располагаются два бассейна KE и KW, предназначенные для хранения ОТВС. В 2004 году все сборки общим весом 2 300 тонн были успешно извлечены из обоих бассейнов. Из-за того, что большая часть ОТВС корродировала в процессе хранения, промывки и переупаковки образовалось около 28 м³ высокоактивного шлама. Сами ОТВС были направлены в пункт сухого хранения, расположенный на территории Центрального плато. Загрязненная вода из бассейна KE была удалена, а сам бассейн демонтирован. Шлам из обоих бассейнов был упакован в контейнеры, которые в свою очередь были размещены в бассейне KW. После того, как шлам пройдет обработку в баках сепарации, способных улавливать частицы размером более 500 мкм, и в осадительных резервуарах для частиц размером менее 500 мкм, его направят в промежуточный пункт контейнерного хранения на территории Центрального плато в ожидании транспортировки в WIPP (Нью-Мексико); затем бассейн KW будет также демонтирован [40].

Начиная с 1990-х на территории ХЯК производятся работы по консервации 8 реакторных блоков. При консервации 80 % реакторного здания и вспомогательных сооружений демонтируются, а оставшиеся 20 %, включая активную зону реактора, заключают в воздухонепроницаемую и водонепроницаемую оболочку из цемента и стали, которую принято называть «коконом». Такой «кокон» предотвращает проникновение любых радиоактивных и иных загрязняющих веществ, образовавшихся при эксплуатации реактора, в окружающую среду.

На данный момент выполнена консервация 6 реакторов (C, D, DR, F, N и H). Еще два реактора – K-East и K-West – будут законсервированы в ближайшее время. Каждые пять лет специалисты ХЯК будут проникать внутрь «коконов» и проводить инспекции на предмет нарушения их герметичности. Планируется, что через 75 лет, когда в результате радиоактивного распада уровни радиации внутри зданий снизятся до безопасных для здоровья человека и окружающей среды, «коконы» будут сняты, а здания ликвидированы. Что касается реактора В, то министерство внутренних дел США провозгласило его национальным историческим памятником, а с 2009 года в здании действует музей, куда проводятся регулярные экскурсии [41].

За последнее десятилетие в Зоне 300 была демонтирована большая часть сооружений и установок. В общей сложности снесено более сотни различных зданий и сооружений. Радиоактивное загрязнение этой территории по большей части обусловлено ураном. На данный момент проводится масштабная исследовательская работа в целях определения наиболее эффективных способов дезактивации территории и изучения геохимических особенностей распространения ареала загрязнения. В рамках этих исследований проводятся испытания технологии закачки в почву полифосфата, позволяющего уловить частицы урана.

Также на территории Зоны 300 расположены два полигона 618-10 (2,1 га) (рис. 1.35, стр. 84) и 618-11 (3,5 га), где в 50-е и 60-е годы захоранивались трансураниевые отходы, образовывавшиеся в ходе проведения исследований и испытаний в Зоне 300.

Работы по реабилитации этих площадок стартовали в 2011 году. Так как точной информации о реестре захороненных отходов не было, то в первую очередь пришлось провести тщательную характеристику отходов. Изначально планировалось завершить работы по реабилитации площадки 618-10 к концу 2015 года, после чего с учетом полученного опыта и знаний приступить к очистке полигона 618-11. Однако по состоянию на декабрь 2015 года работы на площадке 618-10 так и не были полностью завершены: в конце 2016 года приступили к проведению мероприятий по бетонированию площадки.

В состав площадки Ривер Корридор также входит Зона 400, где расположен остановленный опытный реактор на быстрых нейтронах* с натриевым теплоносителем мощностью 400 МВт (тепл.) и целый ряд вспомогательных установок и сооружений. Строительные работы на площадке были завершены в 1978 году, к началу 1980 года реактор достиг состояния критичности и вышел на проектную мощность уже к концу года. С 1982 по 1992 гг. на установке было проведено множество НИОКР, направленных на разработку и испытание усовершенствованных видов ядерного топлива и ядерных материалов. Кроме того, реактор использовался для получения различных изотопов для медицинских и промышленных нужд.

В 1993 году DOE приняло решение о закрытии реактора в связи с отсутствием экономически эффективных задач, которые бы могли быть решены в ходе его дальнейшей эксплуатации. Работы по дезактивации установки заняли больше десяти лет, и лишь в 2009 году реактор был приведен в стабильное состояние, при котором затраты на техническое обслуживание и мониторинг оказались сведены к минимуму. В 2013 году DOE утвердило стратегию вывода реактора из эксплуатации по типу «захоронения на месте». Такая концепция предусматривает ликвидацию всех секций реакторного здания, расположенных выше уровня поверхности земли, а также всех вспомогательных зданий, сооружений и установок. Конструкции, расположенные ниже уровня земли, в том числе корпус реактора и система трубопроводов, будут сохранены, а свободное пространство заполнено строительным мусором и обломками конструкций, образовавшимися в результате работ по сносу верхних секций зданий. Затем будет выполнена засыпка шахты барьерными материалами, предотвращающими дальнейшее распространение радиоактивных и химических веществ в окружающую среду. Согласно положениям Закона о сохранении и восстановлении ресурсов (RCRA) для этих целей планируется использовать усовершенствованную барьерную конструкцию типа С



Рис. 1.35. Работы по извлечению захороненных РАО на полигоне 618-10 (а) и остановленный опытный реактор на быстрых нейтронах (б)

* англ. Fast Flux Test Facility (FFTF).

(Resource and Conservation Recovery Act Subtitle C barrier). На рис. 1.36 представлен общий вид стандартного барьера типа С, состоящего из следующих основных слоев:

- геомембрана с низким коэффициентом фильтрации/почвенный слой. Слой спрессованного грунта мощностью 60 см и коэффициентом фильтрации $1 \cdot 10^{-7}$ см/с, непосредственно прилегающий к геомембране толщиной не менее 0,5 мм;
- дренажный слой. Слой грунта мощностью не менее 30 см и коэффициентом фильтрации не менее $1 \cdot 10^{-2}$ см/с или слой геосинтетического материала с теми же характеристиками;
- верхний почвенный слой с растительным покровом (или искусственно укрепленный слой) мощностью не менее 60 см и величиной уклона от 3 до 5 %.

Утвержденная стратегия вывода из эксплуатации также предусматривает обработку конструктивных элементов реактора, содержащих остатки радиоактивно загрязненного теплоносителя, на установке в Айдахо, после чего переработанные РАО будут возвращены в Хэнфорд и захоронены в Интегрированном пункте захоронения. Все накопленные объемы натриевого теплоносителя будут переработаны в щелочной раствор гидроксида натрия на действующей в Хэнфорде установке и помещены на хранение в целях их дальнейшего использования после ввода в эксплуатацию Хэнфордского завода по переработке ЖРО.

На сегодняшний день WCH выполнила практически все обязательства, предусмотренные контрактом по реабилитации территории Ривер Корридор (91 %). Несмотря на то, что программа фактически завершена, некоторые работы на площадке все еще продолжаются (например, восстановление растительного покрова, присущего данной местности, и перемещение оставшихся РАО в пункт окончательного захоронения ERDF). В табл. 1.16 (стр. 86) представлены основные результаты реабилитации территории Ривер Корридор.

Также следует отметить, что WCH пришлось превысить изначально предусмотренные контрактом затраты на осуществление всего комплекса мероприятий – вместо 1,9 млрд долларов на реализацию программы было потрачено около 2,7 млрд долларов.

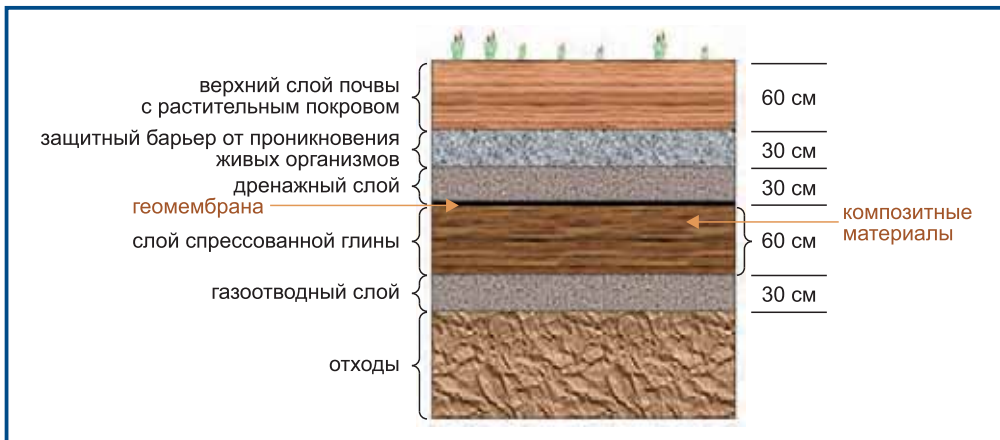


Рис. 1.36. Общая схема устройства стандартной барьерной системы типа С

Табл. 1.16. Результаты программы по реабилитации территории Ривер Корридор (по состоянию на конец 2015 года)

Площадь очищенных территорий	461 км ² из 570 км ²
Очищено площадок, содержавших РАО	521 из 584
Ликвидировано зданий и сооружений	321 из 331
Объем РАО, транспортированных в пункт централизованного захоронения	12 000 000 т
Объем грунтовых вод, подвергшихся очистке	9 000 000 л
Законсервировано реакторов	6 из 8

Центральное плато (Зона 200)

Зона 200 площадью 194 км², известная также как Центральное плато, состоит из трех отдельных участков (Зона 200 Запад (West), Зона 200 Восток (East), Зона 200 Север (North)), расположенных на удалении нескольких километров друг от друга. Исторически миссия действовавших здесь промышленных объектов заключалась в извлечении плутония из урановых топливных стержней, облученных на реакторах Зоны 100. Эти операции выполнялись на пяти гигантских промышленных установках,



из-за своих огромных размеров названных «каньонами» (протяженность каждого объекта эквивалентна длине трех футбольных полей при высоте стен 18 метров).

Операции по выделению плутония неминуемо приводили к образованию значительных объемов ЖРО. Наиболее опасные из них были размещены в 177 емкостях восемнадцати резервуарных парков, находящихся на территории Центрального плато. Каждая такая емкость способна вместить от 190 м³ до 38 000 м³ отходов. На сегодняшний день в резервуарах остается порядка 2·10⁶ м³ ЖРО. Помимо этого значительные объемы ЖРО намеренно и ненамеренно сбрасывались в окружающую среду – всего, по оценкам экспертов, в почву поступило несколько миллионов кубических метров ЖРО, что привело к формированию «ареалов» загрязнения площадью в десятки квадратных километров.

Помимо обращения с ЖРО определенные проблемы возникают и при выполнении работ по реабилитации территорий многочисленных полигонов захоронения ТРО Зоны 200. В прошлом отходы захоранивались совершенно бессистемно в бочках и ящиках: эти РАО предстоит извлечь, охарактеризовать и определить их дальнейшую судьбу. Большой объем работ предстоит и по сносу сотен вспомогательных зданий, сооружений и установок, большая часть которых также подверглась радиоактивному загрязнению.

За последние годы Центральное плато стало местом осуществления двух крупных строительных проектов. Один из них – сооружение комплекса по переработке ЖРО (Waste Treatment Plant) в Зоне 200 East, предназначенного для остекло-

вываяния отходов, хранящихся в емкостях резервуарных парков, планируется завершить в 2020 году. Второй проект – расширение действующего с 1996 года пункта централизованного захоронения ТРО (Environmental Restoration Disposal Facility, ERDF), образующихся в результате ликвидации объектов ядерного наследия ХЯК, а также ТРО, извлеченных из старых могильников.

В 2014 году были завершены работы по сооружению двух камер пункта захоронения сверхбольшой вместимости, каждая из которых способна принять до 3 млн тонн ТРО.

Для целей реабилитации территория Центрального плато разделена на внутреннюю (26 км²) и внешнюю (168 км²) области (рис. 1.37).

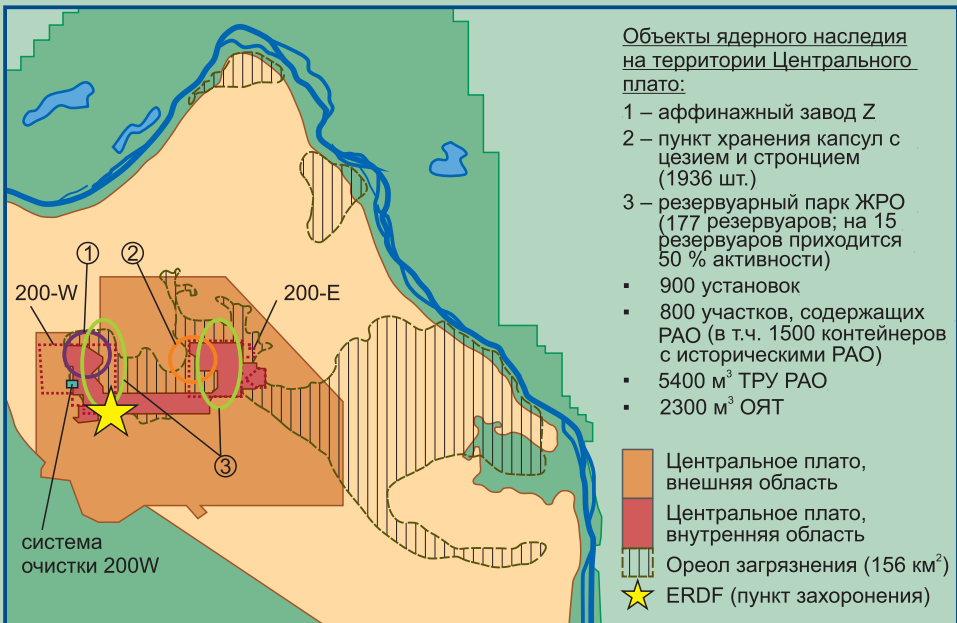


Рис. 1.37. Объекты ядерного наследия на территории Центрального плато

В пределах внутренней области расположены основные установки по переработке топлива и обращению с отходами, необходимые для очистки остальной территории ХЯК, а также пункты захоронения, в которые будут окончательно удалены отходы, образующиеся от проведения восстановительных мероприятий и работ по выводу из эксплуатации. Что касается внешней области, то работы по ее очистке будут завершены не ранее 2022 года.

В результате прошлой деятельности в Зоне 200 более $1,7 \cdot 10^8$ л охлаждающей реакторной жидкости и ЖРО (протечки из колодцев, резервуарных хранилищ, траншей) было сброшено в почву, что привело к загрязнению грунтовых вод на территории общей площадью более 200 км².

В настоящее время ареал загрязнения простирается далеко за пределы Центрального плато, поэтому одна из основных задач программы по реабилитации Зоны 200 – добиться, по мере возможности, снижения концентраций загрязняющих веществ, содер-

жащихся в грунтовых водах, до уровня, соответствующего нормам качества питьевой воды, а в случае отсутствия такой возможности – предотвратить дальнейшее поступление загрязняющих веществ в грунтовые воды и контролировать перемещение ареала загрязнения.

Одной из первоочередных мер по решению этой проблемы является экскавация загрязненного грунта. Кроме того, исследуется возможность сооружения системы поверхностных и приповерхностных инженерных барьеров (вокруг пунктов хранения и захоронения РАО, в том числе вокруг объекта ERDF, пункта интегрированного захоронения, траншей захоронения смешанных отходов), которые позволили бы предотвратить дальнейшее распространение ареала загрязнения, задержать радионуклиды и снизить уровень риска для здоровья человека и окружающей среды.

На данный момент проводятся исследования долгосрочного поведения и стабильности таких барьеров. В 1994 году поверхностный барьер был установлен на территории одного из резервуарных парков в Зоне 200 East (Хэнфордский прототипный барьер). В течение двух десятилетий специалисты ХЯК следили за изменениями его эксплуатационных характеристик и на основе полученных данных создали специальную модель, позволяющую вносить изменения в проект барьера в целях оптимизации показателей его функционирования.

Следует отметить, что на большинстве участков Зоны 200 загрязняющие вещества находятся в глубинной вадозной зоне (ГВЗ), т. е. радионуклиды мигрировали на глубину свыше 76 м и достигли уровня грунтовых вод, поступающих в реку Колумбия (рис. 1.38).

Из-за столь большой глубины загрязнения и наличия сложной геологической, геохимической и микробиологической среды проведение работ по экскавации загрязненного грунта или сооружение поверхностного барьера признано нецелесообразным.

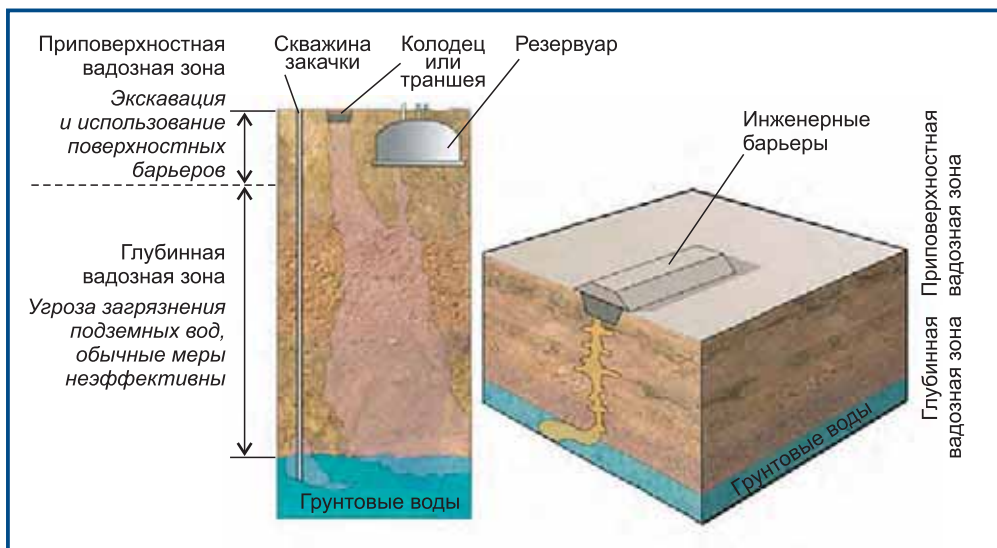


Рис. 1.38. Методы, применяемые в целях реабилитации ПВЗ (инженерный барьер предотвращает проникновение влаги, которая могла бы форсировать поступление загрязнителей в грунтовые воды) и ГВЗ

В 1992 году был запущен проект по реабилитации ГВЗ в Зоне 200 West с применением дренажной системы газового удаления загрязняющих веществ, что позволило удалить из почвы в общей сложности более 80 000 кг тетрахлорметана. На данный момент Министерство энергетики проводит ряд испытаний, направленных на выявление и анализ наиболее эффективных методов очистки ГВЗ от урана и ^{99}Tc [43].

В целях испытания технологий восстановления качества грунтовых вод вся территория Центрального плато поделена на 4 рабочие области (табл. 1.17).

Табл. 1.17. Рабочие области систем очистки грунтовых вод в Зоне 200

Рабочая область	Расположение	Преобладающие загрязнители
200-PO-1	Южная часть Зоны 200 East	Тритий, ^{129}I , соли азотной кислоты
200-BP-5	Северная часть Зоны 200 East	Уран и ^{99}Tc
200-UP-1	Южная часть Зоны 200 West	Уран и ^{99}Tc
200-ZP-1	Северная часть Зоны 200 West	Значительные концентрации тетрахлорметана, меньшие концентрации – ^{99}Tc , Cr, гексавалентного хрома, трихлорэтилена, солей азотной кислоты, трития и ^{129}I

С середины 1990-х гг. в областях 200-UP-1 и 200-ZP-1 действуют системы насосной очистки, позволяющие удалять наиболее высокие концентрации загрязняющих веществ.

В 2011 году в области 200-ZP-1 была запущена система очистки, которая позволит значительным образом снизить концентрации урана и технеция в области 200-UP-1. Расчетный срок ее эксплуатации составляет 25 лет. Предполагается, что за это время она позволит удалить 95 % тетрахлорметана, на данный момент обнаруживаемого в водоносном горизонте. Сама установка занимает территорию по площади равную двум футбольным полям и является одной из самых масштабных систем очистки, имеющих в арсенале Министерства энергетики США, и самой крупной из шести действующих на территории ХЯК.

Основная задача таких систем – предотвратить поступление загрязненных грунтовых вод в реку Колумбия, являющуюся важным источником питьевой воды. Очистная установка в Зоне 200 способна производить обработку более 7 500 л воды в минуту, т. е. около $11 \cdot 10^6$ л/день. Принцип действия системы заключается в откачке загрязненных грунтовых вод с последующей многоступенчатой очисткой, после чего очищенная вода закачивается обратно в водоносный горизонт (рис. 1.39, стр. 90).

На первой стадии процесса загрязненная вода проходит через ионообменную систему очистки, активные вещества которой подобраны таким образом, чтобы задерживать определенные радионуклиды, например, ^{99}Tc и ^{129}I . Затем, вода, очищенная от радионуклидов, проходит через биореактор с псевдооживленным слоем из микроорганизмов, расщепляющих загрязняющие примеси и позволяющих удалить соли азотной кислоты, металлы и некоторые летучие соединения, такие как тетрахлорметан. На следующем этапе вода прогоняется через еще один псевдооживленный слой, нейтрализующий летучие соединения. Этот слой также выполняет функцию фильтра, задерживающего шлам, образующийся на предыдущем этапе очистки.

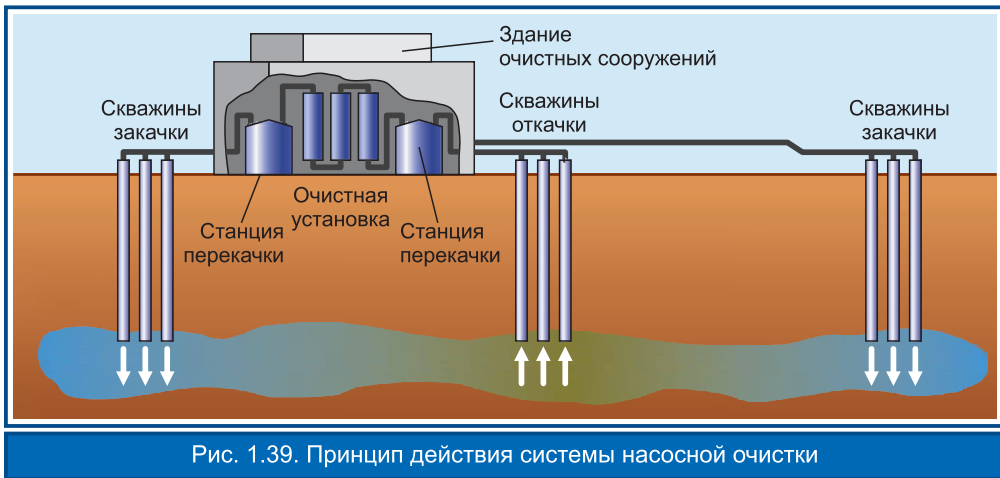


Рис. 1.39. Принцип действия системы насосной очистки

Заключительный этап – удаление оставшихся летучих соединений при помощи системы воздушной отгонки, после чего очищенная вода через скважины закачивается обратно в водоносный горизонт.

Всего очистная система Зоны 200 состоит из 15 скважин глубиной до 160 м для извлечения загрязненных грунтовых вод и 9 скважин для закачки очищенной воды. Многие скважины расположены на значительном удалении от очистной установки, что потребовало внедрения системы дистанционного мониторинга колебаний температуры, давления и расхода жидкости. Для доставки загрязненной воды из скважин откачки было проложено 56 км труб из высокоплотного пропилена и сооружено 3 станции перекачки; еще две станции используются для отведения очищенной воды, поступившей с очистной установки в скважины закачки.

Общая производительность всех шести очистных систем составляет $636 \cdot 10^6$ л в месяц. За следующие 25 лет одна только установка в Зоне 200 позволит очистить $90,85 \cdot 10^9$ л загрязненных грунтовых вод и удалить более 50 000 кг тетрахлорметана [44].

Еще одно направление работ по Центральному плато – снижение уровня опасности, исходящего от резервуарных парков ЖРО (рис. 1.40).

Парки состоят из 177 подземных емкостей-хранилищ, содержащих в общей сложности 208 млн л РАО. В прошлом 67 однослойных емкостей потеряли герметичность, в результате чего до начала проведения восстановительных мероприятий скорость утечки ЖРО составляла порядка 3,8 млн л/год. В течение нескольких лет ЖРО из однослойных емкостей перекачивались в двухслойные. По состоянию на конец 2012 года суммарный объем ЖРО, перекачанных в двухслойные емкости, составил 98 млн л.

В рамках программы по рекультивации и восстановлению территории резервуарных парков можно выделить шесть основных задач:

- Обеспечение безопасного хранения ЖРО в емкостях резервуарных парков до момента их направления на переработку и устранение последствий прошлых проливов химических и радиоактивных веществ.
- Сооружение и эксплуатация завода по переработке отходов, который будет включать установки для остекловывания ВАО и НАО из резервуарных хранилищ.

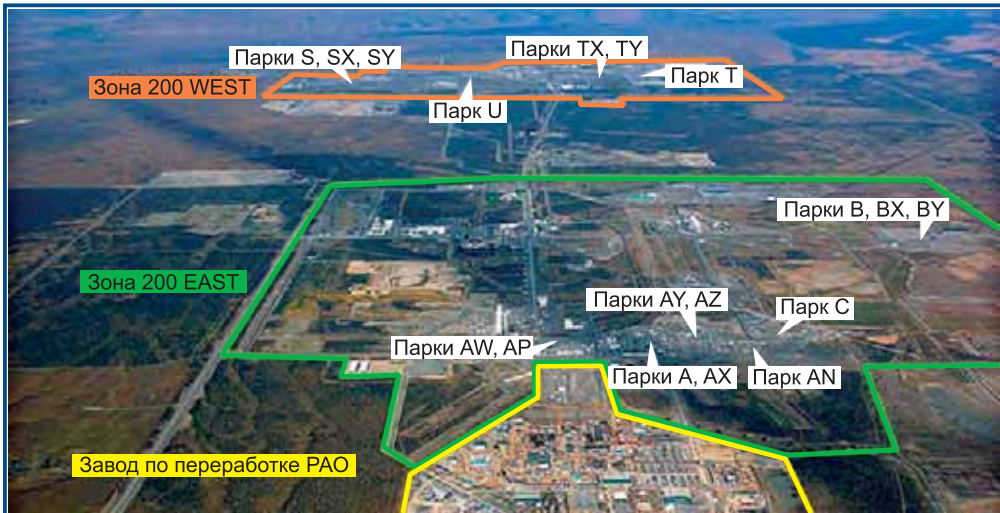


Рис. 1.40. Схема расположения резервуарных парков

- Разработка и внедрение дополнительных мощностей для обращения с НАО, которые не сможет переработать строящийся завод (50 % накопленного объема НАО).
- Создание пунктов промежуточного хранения остеклованных ВАО, где они будут находиться в ожидании транспортировки в пункт окончательной изоляции.
- Захоронение остеклованных НАО на территории ХЯК.
- Закрытие однослойных и двухслойных резервуарных хранилищ, а также вспомогательных установок.

Сроки выполнения указанных работ указаны в табл. 1.18.

Табл. 1.18. Ожидаемые сроки окончания проведения мероприятий по очистке территории резервуарных парков

Завершение операций по извлечению отходов из резервуаров парка С (10 емкостей)	Сентябрь 2014
Закрытие резервуарного парка С	Июнь 2019
Ввод в эксплуатацию завода по переработке отходов	Декабрь 2019
Выход завода по переработке на проектную мощность	Декабрь 2022
Завершение операций по извлечению отходов из 9 однослойных резервуарных хранилищ, не являющихся частью парка С	Сентябрь 2022
Завершение операций по извлечению отходов из однослойных резервуаров	Декабрь 2040
Закрытие всех однослойных резервуарных хранилищ	Январь 2043
Завершение переработки отходов из резервуарных хранилищ	Декабрь 2047
Закрытие всех двухслойных резервуарных хранилищ	Сентябрь 2052

Программы по обеспечению безопасного хранения отходов в однослойных и двухслойных резервуарах предусматривают:

- проведение структурного анализа по выявлению случаев нарушения целостности резервуаров;
- анализ развития коррозионных процессов и деградации, результаты которого позволили бы оценить вероятность возникновения протечек в будущем и наметить пути их предотвращения (например, добавление химических агентов, позволяющих контролировать коррозионные процессы);
- внедрение усовершенствованных методов мониторинга возможных протечек и устранения их последствий.

Сооружение завода по переработке РАО (рис. 1.41) можно по праву считать краеугольным камнем всего проекта.

Строительные работы стартовали еще в 2001 году, а ввод объекта в эксплуатацию намечен на 2019 год. Комплекс установок завода разместится на площади в 26 га в Зоне 200 East и будет состоять из четырех основных и 20 вспомогательных установок и строений:

- установки для предварительной обработки ЖРО (разделение потоков ЖРО, поступивших из резервуарных парков, на ВАО и НАО);
- установки для остекловывания ВАО (будут переработаны 100 % ВАО, поступивших с установки для предварительной обработки);
- установки для остекловывания НАО (будут переработаны 50 % НАО, поступивших с установки для предварительной обработки);
- аналитическая лаборатория (оценка качества стеклянной матрицы).



Рис. 1.41. Завод по переработке ЖРО

Помимо завода по переработке ЖРО Министерство энергетики изучает возможность сооружения еще нескольких установок, которые бы позволили успешно и своевременно реализовать программу по очистке территории резервуарного парка:

Установка по извлечению отходов. Так как комплексы резервуаров В и Т (однослойные резервуары) расположены на слишком большом удалении от двухслойных, отходы планируется сначала направить на промежуточную установку по извлечению отходов. Кроме того, рассматривается возможность использования данной установки для смешивания или кондиционирования ЖРО в целях формирования более равномерного потока отходов.

Дополнительная установка для обработки трансураниевых отходов. 20 резервуаров (17 однослойных и 3 двухслойных) могут потенциально содержать отходы, относящиеся в соответствии с положениями закона «Об изъятии земель под строительство WIPP» к категории трансураниевых. Известно, что 11 однослойных резервуаров содержат трансураниевые отходы, допускающие контактное обращение. Такие материалы могут до момента определения места их окончательного захоронения храниться на территории центрального комплекса по обращению с отходами ХЯК, а в случае отнесения этих РАО к категории трансураниевых, продолжать извлечение отходов из однослойных резервуаров можно будет даже в случае полного заполнения двухслойных резервуаров.

Вторая установка для обработки НАО. Строящийся завод по переработке НАО позволит остекловать лишь 40–50 % НАО, поступающих с установки для предварительной обработки, поэтому Министерство энергетики с момента запуска данной программы планировало создать еще один подобный объект, на котором для иммобилизации отходов могла бы применяться технология, отличная от основной (бетонирование, паровой реформинг псевдооживленного слоя и др.).

Хранилище остеклованных ВАО понадобится для хранения канистр с отходами до момента их транспортировки в пункт централизованного геологического захоронения. К настоящему времени продолжается проработка инженерно-технических решений для проекта пункта промежуточного хранения ВАО и вспомогательных средств погрузки. Из-за того, что реализация программы глубинного геологического захоронения РАО в Якка-Маунтин была остановлена на неопределенное время, необходимо предусмотреть возможности для увеличения вместимости такого хранилища. Что касается остеклованных НАО, то их планируется размещать в интегрированном пункте захоронения, действующем на территории ХЯК.

Дополнительная установка для обращения с ЖРО. В результате эксплуатации завода по переработке ЖРО будут образовываться вторичные ЖРО, которые также необходимо перерабатывать. Сейчас на территории Центрального плато действуют две установки для обработки ЖРО, мощности которых не хватит для переработки всех вторичных отходов будущего завода [44].

На территории Центрального плато также полным ходом идут работы по сносу множества старых неиспользуемых построек. Одним из наиболее сложных проектов в этой области стала ликвидация аффинажного завода Z, который с 1949 по 1989 гг. произвел почти 2/3 всего объема американского плутония. На установках завода из облученных в Хэнфордских реакторах топливных сборок выделяли плутоний. Раствор нитрата плутония переводили в твердую форму с получением плутониевых блочков

размером с хоккейную шайбу и порошка на основе оксида плутония. Кроме того, на заводе имелись мощности по восстановлению плутония из списанных металлических конструкций и оборудования.

Завод состоит из более чем 60 различных построек – все они в конечном итоге будут полностью ликвидированы (ликвидация объекта «до основания»). Концепция ликвидации «до основания» предусматривает дезактивацию и снос зданий с последующим удалением строительного мусора с территории площадки. В результате всё, что должно остаться от завода, – это бетонные плиты пола. Первым шагом на пути ликвидации завода Z стало завершение проекта по удалению накопленных объемов плутония с площадки: он был стабилизирован, упакован и в декабре 2009 года отправлен на хранение в Саванна-Ривер. Тогда же был запущен проект по ликвидации завода. Специалистам предстояло решить целый ряд задач:

- удалить несколько килограммов плутония и америция, оставшихся в установках завода;
- демонтировать 239 горячих камер;
- ликвидировать 196 резервуаров, в прошлом использовавшихся для осуществления контролируемых ядерных реакций;
- демонтировать более 1,5 км трубопровода вакуумной системы;
- демонтировать вентиляционную систему.

К январю 2016 года удалось завершить выполнение практически всех работ, предваряющих снос построек завода, оставалось ликвидировать лишь несколько горячих камер.

Проведенные работы потребовали применения инновационных технологий и методик в целях обеспечения безопасности и защиты здоровья персонала. Так, например, была усовершенствована конструкция индивидуальных средств защиты дыхательных путей, впервые применена новая разработка GreyQb – анализатор гамма-излучения, позволяющий оперативно получать наглядное и точное представление о распределении доз гамма-излучения в помещениях завода. Согласно графику работ, к концу 2016 года все постройки завода Z были ликвидированы «до основания».

Следует отметить, что не все установки комплекса заводов по переработке плутония Зоны 200 подлежат ликвидации. Завод Т является старейшей все еще действующей ядерной установкой в США. Его строительство началось в 1943 году, а с 1945 года здесь осуществлялась экстракция плутония из топливных стержней, облученных в реакторе В. Сегодня в помещениях завода проводятся различные технологические операции по обращению с РАО: обработка, контроль и переупаковка, отбор проб газа, скопившегося в бочках с РАО, захороненных на многочисленных полигонах ХЯК.

Таким образом, из пяти «каньонов» лишь один завод используется в рамках текущей деятельности ХЯК, а остальные четыре находятся на разных этапах вывода из эксплуатации. К числу последних относится остановленный в 1985 году завод В, где с 1945 по 1957 гг. осуществлялись технологические операции по химической сепарации плутония. Затем он был закрыт на реконструкцию, а с 1968 по 1985 гг. здесь проводились работы по выделению цезия и стронция из ЖРО резервуарных хранилищ. Цезий и стронций были заключены в 1 936 капсул и хранятся в заполненных водой бассейнах в специально построенном вблизи Завода Т здании. На данный момент проводятся работы по характеризации здания завода В. Еще два каньона (U и S) будут ликвидированы в ближайшее время.

Каньон U стал третьим по счету заводом по сепарации плутония, построенным на территории ХЯК. Однако в 1944 году сразу после завершения строительных работ стало очевидно, что мощностей первых двух заводов вполне хватает для реализации поставленных правительством США задач. В результате было решено использовать его как площадку лишь для обучения и подготовки сотрудников, которым предстояло работать на заводах T и B. С 1952 года здесь также проводилось извлечение урана из отходов, образующихся в результате экстракции плутония. В 1958 году завод закрыли после того, как в Хэнфорде были запущены более совершенные установки по переработке плутония.

С 1958 по 1964 гг. помещения каньона U использовались для приема, дезактивации и технического обслуживания оборудования, поступающего с других перерабатывающих установок. Затем после частичной дезактивации здание бездействовало еще 45 лет.

В 2005 году было принято так называемое Принципиальное решение о ликвидации комплекса перерабатывающих заводов. После чего на площадке завода U начались работы по дезактивации строительных конструкций и оборудования, а также удалению содержащихся в здании отходов. В дальнейшем стены здания частично обрушат, а поверх строительного мусора будет установлен эвапотранспирационный барьер из песка, глины и суглинков с растительным покровом, действующий по принципу «гигантской губки». Зимой, когда идут дожди или снег, такой барьер будет поглощать и удерживать весь объем выпавших атмосферных осадков, что позволит избежать мобилизации загрязняющих веществ из лежащих ниже отходов и интенсификации процессов их миграции в грунтовые воды. Весной, летом и осенью влага, накопленная в барьере, будет удаляться обратно в атмосферу за счет процессов естественного испарения и транспирации растениями.

Согласно требованиям законодательства, после установки такого барьера Агентство по защите окружающей среды США несет ответственность за осуществление программы долгосрочного мониторинга его состояния и выполнение регулярных проверок соответствия эксплуатационных характеристик барьера установленным требованиям. Некоторые работы по сносу строительных конструкций завода U были выполнены в 2010 и 2011 гг. Затем внутреннее пространство здания было заполнено цементным раствором, позволившем зафиксировать загрязняющие вещества и удерживать их до того времени, пока здание не будет ликвидировано полностью.

Четвертый каньон (завод REDOX или завод S), действовавший в период с 1952 по 1967 гг., позволил переработать свыше 24 000 тон урановых топливных стержней. Он был построен последним и его конструкция отличается от остальных: если другие заводы имеют выражено продолговатую форму, то завод S имеет более прямоугольные очертания (143 м на 49 м). Кроме того, производственные мощности завода REDOX позволяли выделять не только плутоний из оружейных материалов, но и уран из топливных сборок, который мог быть использован в производстве новых ТВС. Производительность нового завода также была выше – 12 тонн в день вместо 1 и 1,5 тонн на заводах T и B. Основным недостатком REDOX-процесса было образование ЖРО: их объем значительно уступал объемам отходов, образовавшихся на заводах T и B, однако удельная активность была намного выше. Кроме того, в состав ЖРО с завода S входило намного больше различных токсичных химических веществ. Дополнительную опасность при экстракции плутония из топливных стержней обуславливала необходимость использо-

вания взрывчатого вещества гексона. Хотя официальное Принципиальное решение по этому объекту до сих пор не принято, в виду значительного радиоактивного загрязнения строительных конструкций здание завода, по всей видимости, будет ликвидировано по методу, примененному в отношении завода U.

В табл. 1.19 обобщены промежуточные результаты, достигнутые за годы проведения работ по очистке территории Центрального плато.

Табл. 1.19. Промежуточные результаты работ по очистке территории Центрального плато (по состоянию на конец 2015 года)

Общий объем ЖРО, откачанный из емкостей резервуарных хранилищ, м ³	9 500
Общий объем ЖРО, откачанных из резервуарного парка С, м ³	5 800
Общий объем ЖРО, откачанных из резервуарного парка S, м ³	4 099
Количество опустошенных емкостей резервуарных парков, приведенных в соответствие со стандартами безопасности	15
Объем пространства, освобожденного в двухслойных емкостях резервуарного парка благодаря работе выпарной установки 242-А (за 2015 год), м ³	7 200
Общий объем ЖРО из двухслойных емкостей резервуарных парков, прошедших обработку на установке 242-А с момента ее ввода в эксплуатацию (1977 год), м ³	2,6·10 ⁶
Общий объем очищенных грунтовых вод, м ³	35·10 ³
Снесено зданий и сооружений	185

Обращение с твердыми радиоактивными отходами

Сейчас в Хэнфорде работают 8 установок по обращению с твердыми радиоактивными отходами, образующимися как при проведении работ по восстановлению и рекультивации на территории самого комплекса, так и на других площадках Министерства энергетики США (табл. 1.20).

Табл. 1.20. Установки по обращению с ТРО, действующие на территории ХЯК*

<p>Центральный комплекс по обращению с отходами (Зона 200)</p>	<p>Пункт хранения НАО, смешанных НАО**, ТРУ РАО и радиоактивных полихлорированных дифенилов, состоящий из 19 зданий и 12 модулей для хранения легковоспламеняющихся отходов.</p> <p>При максимальной вместимости в 20 800 м³ в пункте хранения размещено 8 802 м³ отходов. В 2007 году на территории комплекса была сооружена пристройка, предназначенная для размещения трансураниевых отходов, образующихся в результате проведения реабилитационных работ. Сейчас в ней хранится 5 534 м³ ТРУ РАО.</p>
--	--

* данные по объемам РАО приведены за декабрь 2014 года

** смесь НАО и химически опасных отходов

<p><u>Установка по приему и переработке ТРО (Зона 200 West)</u> <i>Waste Receiving and Processing Facility, WRPF</i></p> 	<p>Комплекс установок, действующий с 1997 года, по анализу, характеризации и подготовке контейнеров и канистр с НАО, смешанными НАО, ТРУ РАО для захоронения. Сюда поступают как отходы со старых полигонов ХЯК, так и вновь образующиеся РАО от проведения работ по реабилитации (средства индивидуальной защиты, бумага, резина, металл, пластик и т. п.). В случае если отходы относят к категории НАО, то они подлежат захоронению в пунктах захоронения, действующих на территории ХЯК. Если же отходы не соответствуют критериям приемлемости, то после переработки в WRPF их захоранивают на территории ХЯК или вывозят на другие площадки.</p>
<p>Комплекс завода Т (Зона 200 West)</p> 	<p>Площадка бывшего завода по сепарации плутония была перепрофилирована в целях создания комплекса по обращению с РАО и их временному хранению. Помещения установки также используются для проведения работ по дезактивации.</p>
<p>Контейнерное хранилище (Зона 200 East) <i>Canister Storage Building, CSB</i></p> 	<p>В установке общей площадью около 4000 м² хранится около 2300 тонн ОЯТ, упакованного в 400 многослойных контейнеров, поступивших из бассейнов 100-К, реактора N и комплекса Т. Сами контейнеры с отходами размещены в 200 трубах из углеродистой стали внутри подземного бетонированного бункера. Первая партия отходов поступила на хранение в 2004 году. Пункт рассчитан на 40 лет эксплуатации, после чего размещенные в нем отходы планируется транспортировать в пункт глубинного геологического захоронения.</p>
<p><u>Полигоны НАО (Зоны 200 West и 200 East)</u> <i>Low-level Burial Grounds, LLBG</i></p> 	<p>На территории ХЯК действует восемь полигонов для захоронения НАО: два в Зоне 200 East для НАО и смешанных НАО (в том числе площадка 218-Е-12В (траншейный пункт захоронения 94) для захоронения реакторных отсеков АПЛ и конструкций военных крейсеров) и шесть в Зоне 200 West, предназначенных для захоронения НАО или хранения ТРУ РАО с возможностью повторного извлечения.</p>

<p><u>Завод по инкапсуляции РАО и пункт хранения (Зона 200 East)</u> <i>Waste Encapsulation and Storage Facility, WESF</i></p> 	<p>В установке хранятся 1 936 капсул с цезием и стронцием, выделенными из ВАО резервуарных хранилищ в период с 1968 по 1985 гг. Сам комплекс по инкапсуляции и хранению был создан на базе закрытого в 1957 году Завода В по сепарации плутония.</p>
<p><u>Интегрированный пункт захоронения (Зона 200 East)</u> <i>Integrated Disposal Facility, IDF</i></p> 	<p>Строящийся пункт приповерхностного захоронения для окончательной изоляции НАО и смешанных НАО общей вместимостью 82 000 м³. Ввод в эксплуатацию намечен на 2019 год.</p>
<p><u>Пункт централизованного захоронения исторических РАО (Зона 200West)</u> <i>Environmental Restoration Disposal Facility, ERDF</i></p> 	<p>Крупнейший пункт приповерхностного захоронения DOE площадью 43,3 га, способный вместить 16,3 млн тонн ТРО. С 1996 года в ERDF захоранивают РАО, образовавшиеся в результате проведения работ по восстановлению и рекультивации территории ХЯК, в том числе радиоактивно и химически загрязненную почву, ионно-обменные смолы и другие ТРО. ERDF состоит из 8 участков вместимостью 1,27 млн т и двух «супер-участков» вдвое большей вместимости, построенных в 2011 году. Каждый участок захоронения облицован несколькими слоями пластика и других водонепроницаемых материалов, а также оснащен системой сбора и удаления протечек (атмосферные осадки и вода от проведения операций по пылеудалению). Собранные ЖРО подвергаются очистке до уровня, при котором разрешен их сброс в окружающую среду. Сейчас в ERDF размещено 17 млн тонн РАО.</p>

Обращение с жидкими радиоактивными отходами

На территории ХЯК расположены четыре крупные установки по обращению с ЖРО:

Очистная установка Зоны 200 (Effluent Treatment Facility, ETF) предназначена для хранения и обработки жидких отходов в целях удаления из них токсичных металлов, радионуклидов, аммиака, а также разрушения органических соединений. ETF находится в эксплуатации с декабря 1995 года и способна выполнять обработку более 500 л ЖРО в минуту. Переработанные жидкие отходы хранят в специальных бассейнах, после чего их по трубопроводу перекачивают в пункт захоронения, расположенный в Зоне 200 West (поле фильтрации, покрытое слоем грунта). За 2014 год объем переработанных на установке отходов составил 4,5 млн л.

Установка для выдержки жидких отходов (Liquid Effluent Retention Facility, LERF) расположена в Зоне 200 East и предназначена для хранения технологического конденсата, поступающего с выпарной установкой 242-A; грунтовых вод, прошедших через различные элементы системы насосной очистки; воды, собранной в ERDF и др. Состоит из двух бассейнов вместимостью 29,5 млн л каждый, выполненных из двух слоев высокоплотного полиэтилена и оснащенных системой выявления, контроля и удаления протечек. Сверху бассейны покрыты высокоплотной пленкой (рис. 1.42), препятствующей проникновению пыли, а также сводящей к минимуму объем испаряющихся органических соединений и трития. LERF находится в эксплуатации с 1994 года, и по состоянию на конец 2014 года содержит 50,7 млн л жидких отходов.



Рис. 1.42. Бассейны выдержки ЖРО

Установка по обработке жидких отходов Зоны 200 (Treated Effluent Disposal Facility, TEDF), состоящая из системы заглубленных в землю трубопроводов общей протяженностью 18 км, соединенных с тремя насосными станциями, установкой для отбора проб и двумя прудами площадью по 2 га (рис. 1.43), находится в эксплуатации с 1995 года. В 2014 году TEDF производительностью 12 900 л/мин приняла на захоронение около 1 360 млн л жидких отходов.

Выпарная установка 242-E (242-A Evaporator), находящаяся в зоне 200 East, предназначена для обработки ЖРО из резервуарных хранилищ. Образующийся при выпаривании водяной пар улавливается, конденсируется, фильтруется, после чего направляется для дальнейшей обработки в установку для выдержки жидких отходов. В 2014 году на установке был переработан весь объем ЖРО из подземных резервуаров хранилищ с двойной оболочкой (8,3 млн л), благодаря чему объем отходов сократился на 3 002 000 литров [45].



Рис. 1.43. Промышленные водоемы выдержки ЖРО, являющиеся частью установки TEDF (пруд А и пруд В)

Предстоящие работы по реабилитации территории Хэнфордского ядерного комплекса

На рис. 1.44 представлены основные этапы осуществления работ по очистке территории ХЯК, а также показаны темпы последовательного уменьшения зоны проведения восстановительных мероприятий и потенциальные категории землепользования, которые планируется присвоить различным участкам.

По состоянию на 2014 год выполнение мероприятий по восстановлению и рекультивации было завершено для большей части территории национального заповедника Хэнфорд Рич. К концу 2016 года планируется завершить работы по рекультивации на всей территории Ривер Корридор за исключением Зоны 100К, здания 324 (радиологические и нерадиологические лаборатории) и полигона 618-11. Согласно предварительным планам, до 2020 года будут завершены все работы по очистке русла реки Колумбия, а системы очистки грунтовых вод продолжают функционировать до тех пор, пока не будет достигнут соответствующий уровень качества воды либо дальнейшая эксплуатация таких систем будет признана нецелесообразной.

При условии достаточного финансирования к 2020 году будут завершены и работы по рекультивации оставшейся части внешней области Центрального Плато. Что касается внутренней области, то работы по обращению с ЖРО и ТРО и их захоронению завершатся не ранее 2050 года. Ввод в эксплуатацию WTP позволит начать переработку 210 млн л радиоактивных и химически опасных отходов из резервуарных хранилищ. В табл. 1.20 (стр. 102–103) представлены остальные приоритетные задачи для периода с 2012 по 2020 гг. [46].

Финансовое обеспечение работ и основные подрядчики

На рис. 1.45 (стр. 104) представлены сроки реализации отдельных этапов программы по рекультивации ХЯК, а также приблизительное распределение финансовых затрат на их проведение по годам [47, 48].

Следует отметить, что в целом до настоящего времени наблюдалась тенденция к повышению стоимости реализации программы и продления сроков ее выполнения. Если в 2012 финансовом году общая сумма затрат на выполнение программы составляла всего 112 млрд долларов, то в 2013 году эта сумма возросла до 114,8 млрд долларов,

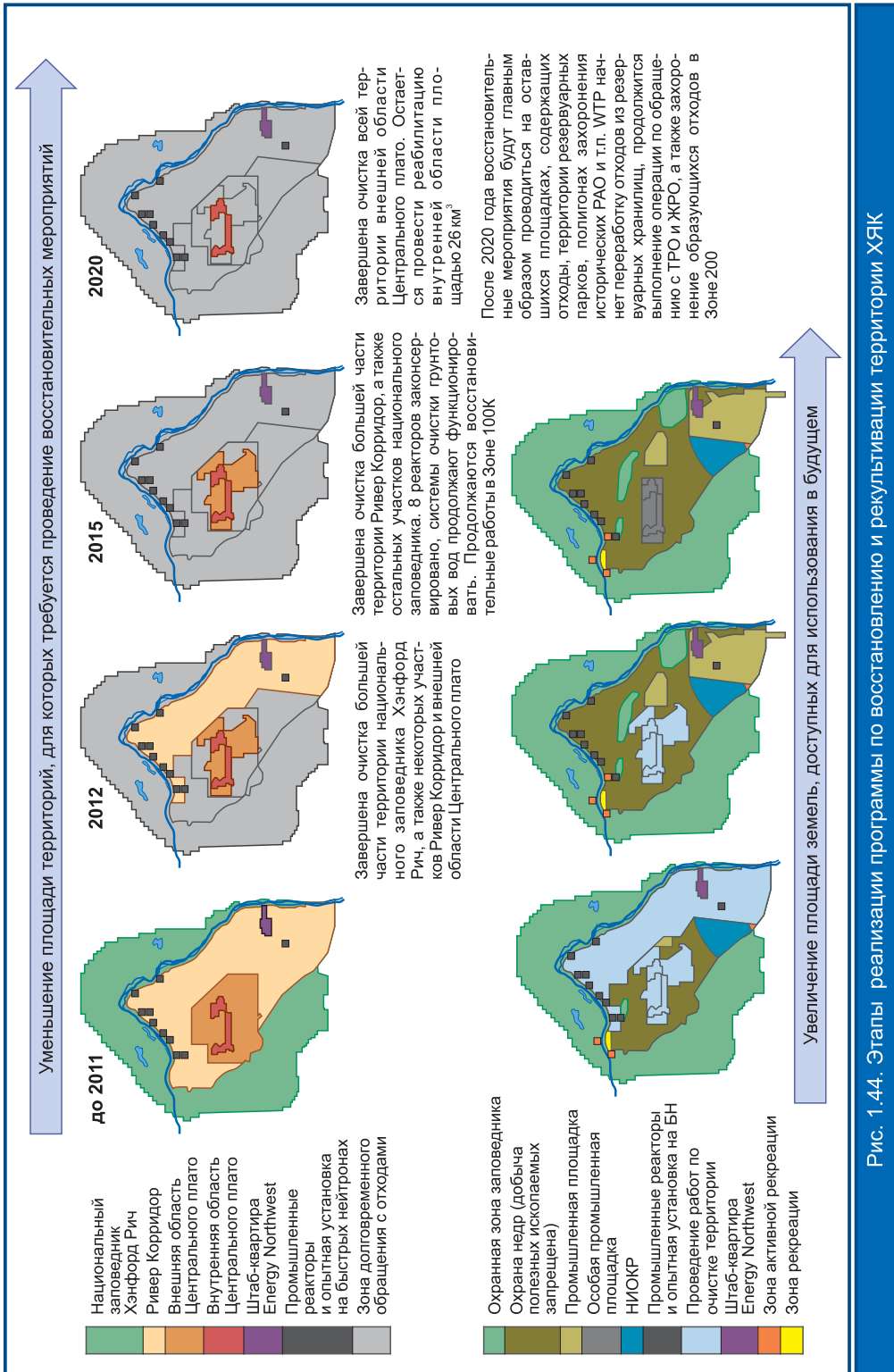


Рис. 1.44. Этапы реализации программы по восстановлению и рекультивации территории ХЯК

Табл. 1.20. План по рекультивации и очистке территории ХЯК

	2014–2015 гг.	2016–2020 гг.	С 2021 г. и до завершения программы	
Ривер Корридор	<p>Завершить установку систем очистки грунтовых вод во всех зонах; остановить поступление повышенных концентраций хрома в воды реки Колумбия; внедрить системы очистки грунтовых вод от стронция и урана (Зона 300);</p> <p>Завершить работы по консервации 6 реакторов (за исключением K East, E West, B); Удалить весь шлам из бассейна K West; Перевести FFTF в стабильное состояние, в котором затраты на мониторинг и его техническое обслуживание были бы сведены к минимуму.</p>	<p>Демонтировать бассейн K West и провести рекультивацию Зоны 100-K;</p> <p>Завершить работы по консервации реакторов KW и KE;</p> <p>Завершить проведение восстановительных мероприятий на площадках 618-10/11/, осуществить демонтаж здания 324;</p> <p>Продолжать мониторинг и осуществление технического обслуживания опытной установки на быстрых нейтронах;</p> <p>Продолжить эксплуатацию систем очистки грунтовых вод, оптимизировать систему удаления гексавалентного хрома.</p>	<p>Принять окончательное решение по промышленным реакторам (например, захоронение на месте или ликвидация);</p> <p>Принять окончательное решение по опытному реактору на быстрых нейтронах (FFTF);</p> <p>Передать в ведение Ричлендского управления по реабилитации четыре установки, расположенные в Зоне 300, до этого принадлежавшие научному управлению Министерства энергетики США.</p>	
Центральное плато	<p>Поддерживать работу системы очистки грунтовых вод в Зоне 200;</p> <p>Начать работы по реабилитации внутренней области;</p> <p>Продолжить выполнение мероприятий по извлечению, упаковке и транспортировке на другие площадки хранящихся на территории Центрального плато трансуранных материалов;</p>	<p>Завершить демонтаж комплекса сооружений аффинажного завода;</p> <p>Принять решения по системам очистки грунтовых вод и завершить восстановительные мероприятия во внешней области Центрального плато;</p> <p>Начать рекультивацию отдельных участков внутренней области Центрального плато;</p> <p>Начать переработку шлама из бассейнов К;</p> <p>Поддерживать работу системы очистки грунтовых вод.</p>	<p>Завершить проведение восстановительных мероприятий во внутренней области Центрального плато, закрыть все установки для обращения, хранения и захоронения РАО;</p> <p>Подготовить площадку для размещения отходов, прошедших обработку в WTR;</p> <p>Завершить операции по упаковке и транспортировке ТРУ РАО на полигоны вне территории ХЯК;</p>	

Продолжение табл. 1.20

	2014–2015 гг.	2016–2020 гг.	С 2021 г. и до завершения программы
Центральное плато	<p>Документировать все данные о мероприятиях, проводимых во внутренней и внешней областях, а также работах по очистке грунтовых вод.</p>	<p>Осуществить мероприятия по очистке ГВЗ; Извлечь ТРУ РАО и осуществить их транспортировку в WTPP; Создать и ввести в эксплуатацию установку по переработке крупногабаритных ТРО и ТРО, требующих дистанционного обращения; Транспортировать капсулы с Cs/Sr в сухое хранилище.</p>	<p>Завершить проведение активных мероприятий по очистке грунтовых вод; Обеспечить безопасное хранение ОЯТ до момента открытия пункта централизованного захоронения.</p>
Резервуарные парки	<p>Продолжить строительство завода по переработке РАО (WTP); Завершить работы по извлечению отходов из резервуарного парка С; Поддерживать и развивать инфраструктуру на территории резервуарных парков; Устранить последствия протечек из емкостей резервуарных парков.</p>	<p>Завершить строительство WTP и ввести его в эксплуатацию; Закрыть резервуарный парк С, доказать эффективность методов, применяемых для закрытия однослойных резервуаров-хранилищ; Обеспечить инфраструктуру и создать систему доставки отходов из резервуарных парков на WTP; Начать эксплуатацию интегрированного пункта захоронения и обеспечить безопасное хранение остеклованных ВАО; Увеличить производительность завода по обработке жидких отходов с учетом образования дополнительных объемов вторичных отходов WTP.</p>	<p>Вывести WTP на проектную мощность к 2022 году; Продолжать извлечение отходов из резервуаров хранилищ (оставшиеся 9 резервуарных парков помимо парка С); Закрыть все однослойные резервуары к 2043 году; Завершить извлечение отходов к 2047 году; Закрыть все двухслойные резервуары к 2052 году.</p>

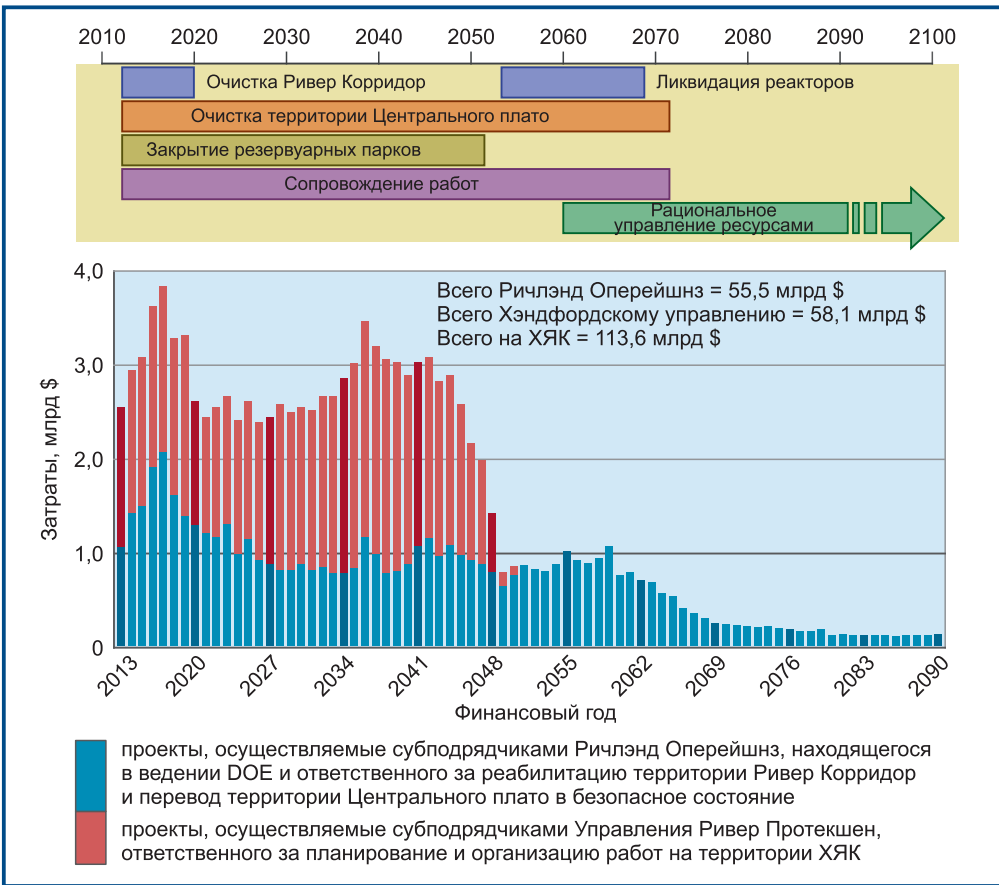


Рис. 1.45. Распределение финансовых затрат по годам

а сроки реализации программы были продлены с 2060 года до 2070 года. Согласно последним оценкам, суммарные затраты на реализацию программы составят 113,6 млрд долларов. Эти средства будут распределены между двумя управлениями Министерства энергетики: Ричлэнд Оперейшнз получит 55,5 млрд долларов, а оставшиеся 58,1 млрд долларов будут перечислены Хэндфордскому управлению Ривер Протекшен [49]. При этом суммарные затраты на проведение работ по восстановлению и рекультивации, осуществленные в период с 1989 по 2009 гг., оцениваются в 30 млрд долларов [50].

Наиболее затратными среди запланированных мероприятий являются:

- стабилизация и захоронение ЖРО резервуарных парков – 55,5 млрд долларов;
- проведение работ по выводу из эксплуатации и демонтажу установок и сооружений на территории ХЯК – 18,8 млрд долларов;
- стабилизация отходов в Зоне 200 и их захоронение – 9,8 млрд долларов;
- работы по восстановлению качества грунтовых вод и рекультивации почвы, в том числе глубинной вадозной зоны – 8,3 млрд долларов;
- сооружение завода по переработке отходов – 4,1 млрд долларов.

Управление Министерства энергетики Ричлэнд Оперешнз (DOE-RO) является основным подрядчиком по выполнению восстановительных работ и очистке территории, в том числе оно осуществляет демонтаж и рекультивацию территории аффинажного завода, проводит работы по экскавации загрязненного грунта и очистке грунтовых вод, а также осуществляет обращение с ТРО. Основными субподрядчиками DOE-RO на данный момент являются компании: Washington Closure Hanford, CH2M Hill Plateau Remediation Company и Mission Support Alliance (табл. 1.21).

Табл. 1.21. Основные субподрядчики программы по восстановлению качества окружающей среды и рекультивации территории Хэнфордского комплекса

	Субподрядчик	Сфера деятельности	Контракт (дата и сумма)
DOE-RO	Washington Closure Hanford (WCH)	Демонтаж строений на территории участка Ривер Корридор, рекультивация площадок, содержащих РАО, эксплуатация пунктов захоронения	2005 год 2,5 млрд долларов
	CH2M Hill Plateau Remediation Company (CHPRC)	Дезактивация ядерных установок и рекультивация площадок, восстановление качества грунтовых вод, захоронение отходов	2008 год (на 5 лет), 5,7 млрд долларов
	Mission Support Alliance (MSA)	Инфраструктура и обслуживание площадок	2008 год (на 5 лет), 3,3 млрд долларов
DOE-ORP	Washington River Protection Solutions (WRPS)	Мониторинг, обращение с РАО из резервуарных парков	2008 год (на 5 лет), 5,5 млрд долларов
	Bechtel National, Inc. (BNI)	Проектирование, сооружение и ввод в эксплуатацию завода по переработке и остекловыванию отходов	2001 год, 12,3 млрд долларов
	Advanced Technology and Laboratories International (ATL)	Проведение работ в аналитической лаборатории 222-S	–

Хэнфордское управление Ривер Протекшн (DOE-ORP) несет ответственность за планирование, организацию, управление и интеграцию проектов, осуществляемых в рамках программы по реабилитации Центрального плато, а также организует работу субподрядчиков [51].

1.1.4. Саванна-Ривер

Резервация Саванна-Ривер (СР) площадью 802 км² расположена на юго-западе штата Южная Каролина неподалеку от реки Саванна, в 40 км от города Огаста (штат Джорджия). В течение 35 лет с 1953 по 1988 год на пяти реакторах СР было наработано 36 тонн плутония (рис. 1.46), что составляет 1/3 всего объема этого материала, когда-либо произведенного в США.

Кроме того, радиохимические заводы СР служили основным источником получения трития для ядерного оружейного комплекса страны. В общей сложности на площадке расположено около 1000 различных установок, занимающих всего 10% от общей площади резервации [52].

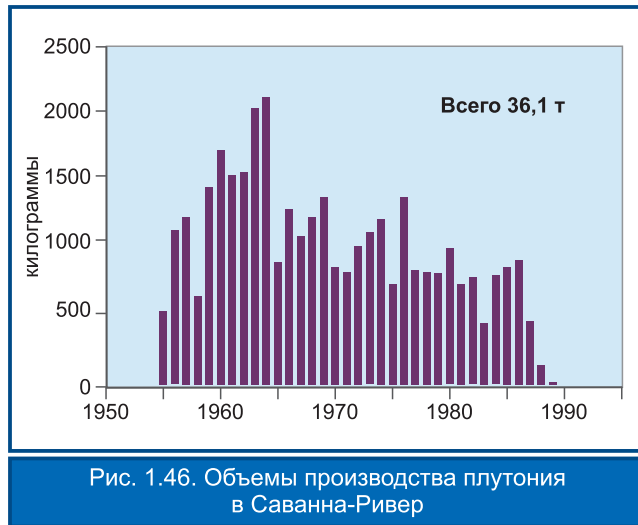


Рис. 1.46. Объемы производства плутония в Саванна-Ривер

История создания и ключевые объекты

В 1950 году компании ДюПон было поручено разработать проект промышленного комплекса по наработке специальных ядерных материалов, в первую очередь плутония и трития. Площадка для его сооружения была утверждена уже к концу года. Помимо стандартных требований, предъявляемых к месту размещения подобных объектов (удаленность от крупных населенных пунктов, доступность больших водных и энергетических ресурсов и т. п.), площадка должна была находиться на значительном удалении от Хэнфорда, что, по мнению правительства США, гарантировало бесперебойное производство достаточных объемов оружейных материалов в период холодной войны.

В августе 1952 года в эксплуатацию был введен завод по производству тяжелой воды, служившей как охлаждающей жидкостью, так и замедлителем для реакторов, а уже к концу 1953 года первый промышленный реактор R достиг критического состояния. К весне 1955 года на площадке функционировали все пять реакторов мощностью от 2400 до 3000 МВт и две линии сепарации [53].

На рис. 1.47 представлена общая схема производства специальных материалов для ЯОК США в период холодной войны, а также роль, отведенная установкам Саванна-Ривер в рамках этой миссии. В целом, комплекс по наработке ядерных материалов Саванна-Ривер состоял из пяти реакторов, двух радиохимических заводов, завода по производству и переработке тяжелой воды, а также нескольких установок по обращению с отходами. С реакторов облученные материалы поступали на один из двух радиохимических заводов, получивших название «каньоны» из-за своей продолговатой формы (длина сооружений превышает 300 м при ширине всего 37 м). Затем ядерные материалы транспортировались на другие площадки Министерства энергетики США для получения готового продукта [54].

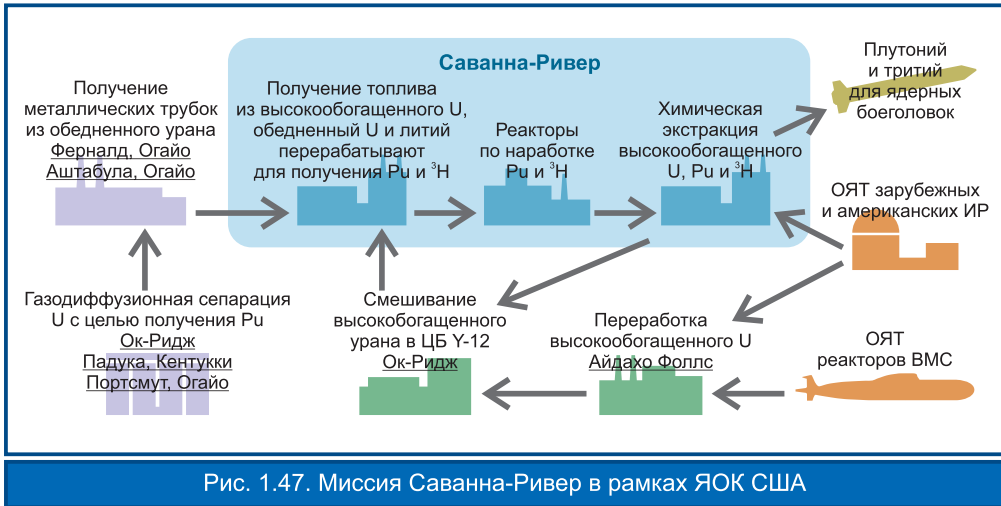


Рис. 1.47. Миссия Саванна-Ривер в рамках ЯОК США

После окончания холодной войны в связи с сокращением объемов производства оружейных материалов многие установки на территории комплекса закрыли, в том числе пять реакторов, а также объекты в зонах M, D и TNX, в то время как установки E, H, S и Z до сих пор используются в рамках текущей деятельности DOE по обращению с РАО [55].

На протяжении последних двух десятилетий основная миссия Саванна-Ривер заключается в проведении мероприятий по восстановлению качества окружающей среды и обращению с накопленными в результате прошлой деятельности отходами.

В табл. 1.22 приведены сроки пуска и текущее состояние основных производств Саванна-Ривер.

Табл. 1. 22. Сроки ввода в эксплуатацию и текущее состояние основных мощностей Саванна-Ривер

Объект	Этапы пуска	Текущее состояние
Завод по производству и переработке тяжелой воды – D	1952 г. – ввод в эксплуатацию; с 1981 по 1998 гг. – технологические операции по выделению различных загрязнителей из накопленных объемов тяжелой воды; 1998 г. – окончательное закрытие.	Часть установок дезактивирована и ликвидирована, продолжаются работы по реабилитации территории
Реактор R	Декабрь 1953 г. – ввод в эксплуатацию; 1963 г. – зафиксировано несколько протечек теплоносителя; 17 июня 1964 г. – остановлен.	2011 г. – завершение работ по консервации
Реактор P	1954 г. – ввод в эксплуатацию; 1988 г. – остановлен.	2011 г. – завершение работ по консервации
Реактор C	1955 г. – ввод в эксплуатацию; 1985 г. – остановлен.	В здании реактора размещено хранилище тяжелой воды

Объект	Этапы пуска	Текущее состояние
Реактор К	1954 г. – ввод в эксплуатацию; 1971 г. – переведен на автоматическое компьютерное управление; 1988 г. – остановлен.	В здании реактора размещено хранилище тяжелой воды и мокрое хранилище ОЯТ (с 2000 г.). В зоне К также ведутся операции по обращению с различными ядерными материалами, в первую очередь с плутонием, а также осуществляется их промежуточное хранение
Реактор L	1954 г. – ввод в эксплуатацию; 1968 г. – остановлен для проведения работ по модернизации; 1985 г. – вновь введен в эксплуатацию; 1988 г. – остановлен.	В здании реактора размещено хранилище тяжелой воды и мокрое хранилище ОЯТ. С 2003 г. бассейн L является единственной действующей в Саванна-Ривер установкой, принимающей ОЯТ.
Каньон F	1954 г. – ввод в эксплуатацию (химическая сепарация ^{239}Pu и ^{238}U); Начало 1990-х гг. – завод остановлен; 1995 г. – операции по химической сепарации и стабилизации плутоний-содержащих исторических материалов; 2006 г. – завершение работ по дезактивации зоны F.	С 2002 г. – обращение с ТРУ РАО (перупаковка отходов перед их транспортировкой на опытную установку по изоляции отходов в Нью-Мексико (WIPP))
Каньон H	1955 г. – ввод в эксплуатацию (химическая сепарация ^{237}Np и ^{238}U); Начало 1990 гг. – завод закрыт.	С 2003 года производит переработку запасов высокообогащенного оружейного урана и нептуния
Испытательный реактор с оборудованием на тяжелой воде	1962 г. – ввод в эксплуатацию; 1964 г. – остановлен.	Нет сведений

Вся территория резервации Саванна-Ривер в соответствии с характером выполняемых операций и размещенных установок поделена на несколько зон (рис. 1.48):

- М – зона размещения исторических установок по производству реакторных материалов, где также расположены три аналитические лаборатории и перерабатывающая установка Вендор, выведенная из эксплуатации в 1999 году и позволившая остекловать более 2,5 млн л смешанных радиационно и химически опасных отходов [55].
- С, К, L, P и R – бывшие реакторные площадки, где расположены здания остановленных реакторов, а также различные вспомогательные установки. В сентябре 2011 года завершились работы по консервации реакторов P и R, в ходе выполнения которых было снесено 15 вспомогательных установок, а сами реакторные здания поместили в «коконы» из цемента (рис. 1.49) [56].

Три другие реакторные площадки С, К и L пере-профилировали в хранилища тяжелой воды, а на территории зон К и L действуют мокрые хранилища ОЯТ. Кроме того, в зоне К расположены установки по обращению с различными ядерными материалами, в первую очередь с плутонием, и пункт промежуточного хранения. Сюда доставляли ядерные материалы с площадки Роки-Флэтс (Колорадо), Хэнфордского ядерного комплекса, Национальных лабораторий Лос-Аламоса и Ливермора. Хранилище ядерных материалов расположено непосредственно в бывшем здании реактора. В начале 1990-х гг. его конструкция была усилена, а стены укреплены дополнительным слоем бетонной кладки. При этом затраты на модернизацию установки оказались намного ниже, чем в случае сооружения нового хранилища. Металлический плутоний и оксид плутония предварительно стабилизируют и упаковывают в защитный контейнер. Транспортный контейнер представляет собой бочку из нержавеющей стали (диаметром 0,5 м и высотой 0,9 м), внутри которой размещен изоляционный материал Celotex, свинцовый экран, две защитные оболочки и сам контейнер, содержащий ядерные материалы (рис. 1.50). Общий вес такой упаковки составляет порядка 180 кг [57].

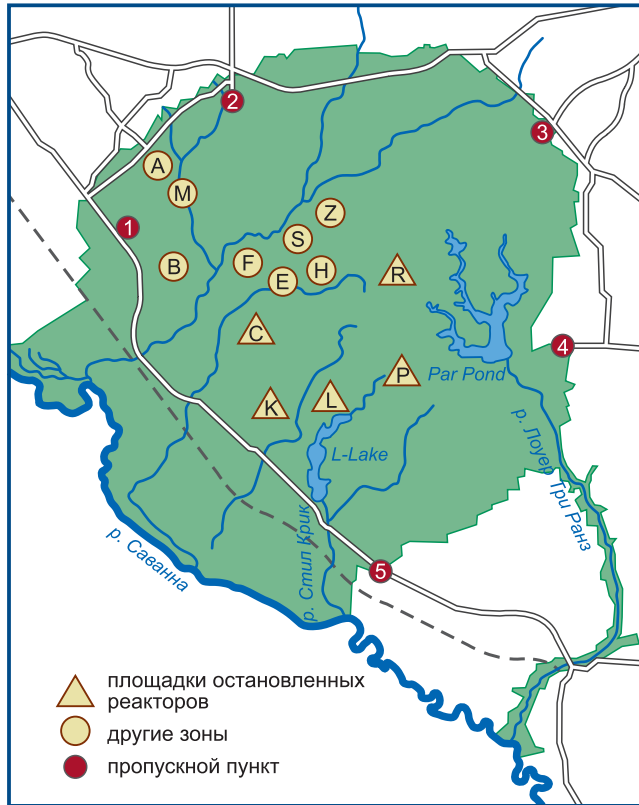


Рис. 1.48. Схема размещения производственных площадок Саванна-Ривер



Рис. 1.49. Здание реактора Р, помещенное в «коккон» из бетона

На территории всех пяти реакторных площадок имелись бассейны выдержки ОЯТ. В 1996 году бассейн площадки L был переоборудован и расширен

в целях создания пункта хранения ОЯТ с зарубежных и американских исследовательских реакторов.

В 1998 году в целях минимизации затрат было принято решение о том, что весь объем ОЯТ Саванна-Ривер будет храниться в этом бассейне, а с 2003 года – это единственное на территории СР хранилище, до сих пор принимающее ОЯТ. На сегодняшний день здесь размещено ОЯТ с общим содержанием тяжелых металлов свыше 30 тонн [58].

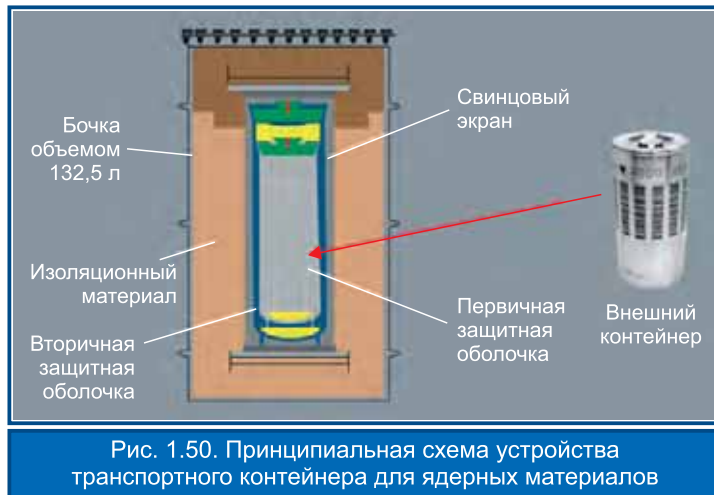


Рис. 1.50. Принципиальная схема устройства транспортного контейнера для ядерных материалов

- D – зона производства и переработки тяжелой воды. С 1953 по 1981 гг. здесь производилась тяжелая вода для промышленных реакторов, а с 1982 по 1998 гг. на установке осуществлялось выделение различных загрязнителей из накопленных объемов тяжелой воды. Сейчас хранение обработанной тяжелой воды осуществляется на площадках K и L [55].

- F и H – площадки, где располагаются два радиохимических завода (Каньоны F и H), а также вспомогательные установки по обращению с ЖРО и пункты хранения РАО. Во времена холодной войны в Каньонах F и H осуществлялась химическая обработка облученных материалов и сборок, выгружаемых из реакторов – на заводе F велась химическая сепарация ^{239}Pu и ^{238}U , а на заводе H – ^{237}Np и ^{238}U . После окончания холодной войны обе установки были остановлены.

В 1995 году завод F вновь заработал – его миссия состояла в стабилизации накопленного реестра ядерных материалов, содержащих плутоний. В 2002 году после завершения операций по стабилизации завод F стал одной из основных установок по обращению с трансурановыми отходами. Сегодня здесь осуществляется переупаковка таких отходов перед их транспортировкой на опытную установку по изоляции РАО в Нью-Мексико (WIPP).

Завод H также продолжил свою работу и на сегодняшний день является единственной действующей установкой по химической сепарации в США – с 2003 года здесь реализуется программа переработки запасов высокообогащенного оружейного урана и нептуния [59, 60].

Также в зоне F строится установка по производству МОКС-топлива. Именно она должна была стать ключевым компонентом американской программы по Управлению национальной ядерной безопасностью, одна из основных задач которой состоит в ликвидации избыточных запасов оружейного плутония США. Работы по сооружению комплекса стартовали еще в 2007 году и согласно первоначальным планам должны были завершиться в 2019 году. По состоянию на середину 2016 года готовность проекта оце-

нивалась в 70 %. При этом суммарные затраты на создание комплекса, способного переработать порядка 34 метрических тонн высокообогащенного плутония в смешанное оксидное топливо для энергетических АЭС, оценивались в порядка 7,7 млрд долларов. Согласно первоначальным планам, первую партию такого топлива планировалось получить уже к 2021 году [61]. Однако в течение последних двух лет работы на площадке были фактически заморожены, а финансирование проекта было практически полностью прекращено после того, как в 2014 году министр энергетики США Эрнест Монис впервые публично заявил о том, что правительство США рассматривает возможность захоронения плутония как альтернативу сжиганию в составе МОКС-топлива. Опубликованная в апреле 2016 года стратегия Национального управления по ядерной безопасности США фактически лоббирует этот проект, несмотря на то что российская и американская стороны пришли к обоюдному соглашению утилизировать плутоний в качестве топлива для ядерных реакторов.

Историческая практика обращения с РАО и загрязнение окружающей среды

За годы наработки ядерных материалов в Саванна-Ривер в окружающую среду поступили значительные количества радиоактивных веществ, характеризующихся различным периодом полураспада, мобильностью и степенью опасности. В табл. 1.23 представлена суммарная активность радиоактивных выбросов в воздух и водную среду в период с 1954 по 1988 годы [62].

Табл. 1.23. Суммарные выбросы радиоактивных веществ в период с 1954 по 1988 гг.

Радионуклид	Период полураспада	Газо-аэрозольные выбросы в атмосферу, ТБк	Сбросы ЖРО в реки, ТБк	Сбросы ЖРО в бассейны фильтрации, ТБк	Суммарный выброс, ТБк
³	12,3 лет	894 000	56 000	46 0000	996 0000
	1,8 часов	235 000			235 000
³	8 дней	93		98	202
³ Cs	30 лет	0,1	22	49	71
³	87,4 дня		54		65
	28,8 лет		3,8	11,1	14,9
³ P	14,2 дня		1,3	6	7,3
Co	5,2 дня	0,003	2,4	0,7	3,1
³	4,4·10 ⁹ лет	0,3	0,9	0,6	1,5
³ Pu	2,4·10 ⁴ лет	0,11		0,29	0,4
	1,6·10 ⁷ лет	0,2	0,01		0,2
³ Pu	87,7 лет	0,02	0,003	0,15	0,2

В связи с тем, что объекты Саванна-Ривер являлись основным поставщиком трития для ядерного оружейного комплекса США, именно это вещество по большей части обуславливало загрязнение территории резервации. Основным источником поступления трития в окружающую среду был завод по производству и переработке тяжелой воды.

В начале 1960-х гг. на каждый реактор приходилось около 225 т тяжелой воды с суммарной активностью трития более 500 000 ТБк, при этом в результате протечек и испарения 1/5 часть тяжелой воды ежегодно попадала в окружающую среду [63].

Выбросы урана были в основном связаны с производством ядерного топлива и мишеней.

При этом выбросы газообразного урана через вентиляционную систему реакторных производств, по сравнению с выбросами радиохимических линий, были совсем незначительными – в период с 1975 по 1989 гг. наибольшее значение суммарной активности годового выброса газообразного урана составило всего 3,7 МБк (т. е. в воздух поступило всего около 140 г этого вещества) [64]. Пиковые значения выброса урана наблюдались в 1969 году, когда в одну из рек, протекающих по территории резервации, было сброшено порядка 11,5 т этого загрязнителя, а суммарная активность сброса составила порядка 0,3 ТБк.

Основная часть газообразных выбросов радиоактивных веществ реакторов поступала в атмосферу посредством вентиляционных шахт, а загрязнение водной среды было обусловлено сбросами ЖРО в близлежащие реки, ручьи и поля фильтрации. Основным источником радиоактивного загрязнения поверхностных вод на территории реакторных площадок были бассейны выдержки ОЯТ объемом около 10 млн л, примыкающие к реакторным зданиям. В них помещали выгруженное из реакторов ОЯТ и облученные мишени сроком на 9 месяцев до распада короткоживущих радионуклидов. Для наблюдения за состоянием содержимого бассейны регулярно промывали, а промывочную воду сбрасывали в реки и ручьи без предварительной выдержки. Эта практика была прекращена лишь в 1978 году – с тех пор промывочную воду перед сбросом закачивали на поля фильтрации.

Основным загрязняющим веществом, образующимся в результате работы реакторов, был тритий. Выбросы этого элемента были практически полностью обусловлены протечками и испарениями замедлителя реакторных систем. Согласно сведениям о выбросах, датированным 1981 годом [65], главными источниками поступления трития были: вытяжные колонны реакторов высотой 60 м – 4 400 ТБк, сбросы из бассейнов выдержки в близлежащие реки – 200 ТБк и испарения с полей фильтрации – 200 ТБк. Суммарный атмосферный выброс трития в период с 1952 по 1992 гг. оценивается на уровне 182 000 ТБк.

Тем не менее, основной объем сбросов радиоактивных веществ на территории резервации все-таки приходился на радиохимические заводы, вытяжные колонны которых стали источником самых высоких в истории уровней атмосферного выброса альфа-излучающих радионуклидов, в основном плутония (^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu) и урана (рис. 1.51) [63].

Радиохимическое производство также стало источником значительных выбросов газообразного трития. Так, в 1971 году суммарная активность выбросов трития с заводов Саванна-Ривер составила 14 800 ТБк, с реакторных площадок – 7 700 ТБк и 330 ТБк пришлось на сбросы от установки по переработке тяжелой воды (94% – атмосферные выбросы; 6% – сбро-

сы в водную среду) [66]. Всего с 1954 по 1988 гг. суммарный сброс трития установками химической сепарации составил 637 000 ТБк [63]. Помимо трития радиохимические заводы служили источником загрязнения окружающей среды радиоактивным йодом. Объем сброса от этих установок почти в 300 раз превышал объемы поступления йода со всех пяти промышленных реакторов Саванна-Ривер. Суммарная активность выбросов ^{131}I составила около 2000 ТБк, ^{129}I – 190–230 ГБк.

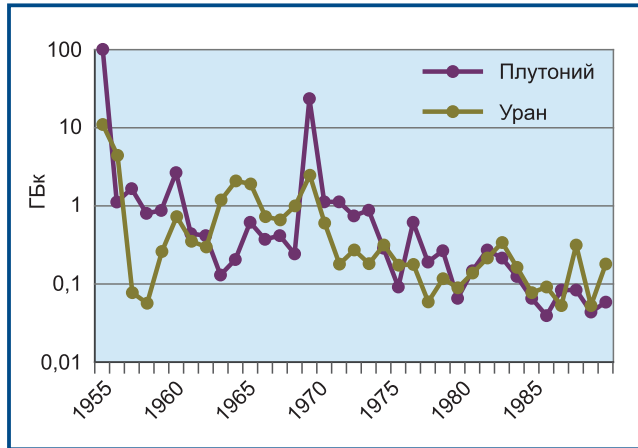


Рис. 1.51. Атмосферные выбросы урана и плутония с линий химической сепарации Саванна-Ривер

Еще одним источником загрязнения окружающей среды как радиоактивными, так и химически опасными веществами стали многочисленные установки по обращению с РАО и пункты захоронения.

Всего на территории Саванна-Ривер находилось 20 различных полигонов захоронения ТРО и полей фильтрации ЖРО. Результаты исследования, проведенного в 1983 году [67], показали, что скорость утечки трития из таких пунктов захоронения в грунтовые воды составляла порядка $0,7 \cdot 10^{15}$ Бк/год.

Всего за более чем 40 лет эксплуатации промышленных установок Саванна-Ривер на территории комплекса накоплено свыше $16 \cdot 10^4$ м³ жидких отходов суммарной активностью $1,5 \cdot 10^{19}$ Бк. Они размещены в 51 подземном резервуаре-хранилище, а суммарная активность всех ВАО на территории комплекса превышает $6,7 \cdot 10^{19}$ Бк (рис. 1.52) [55].

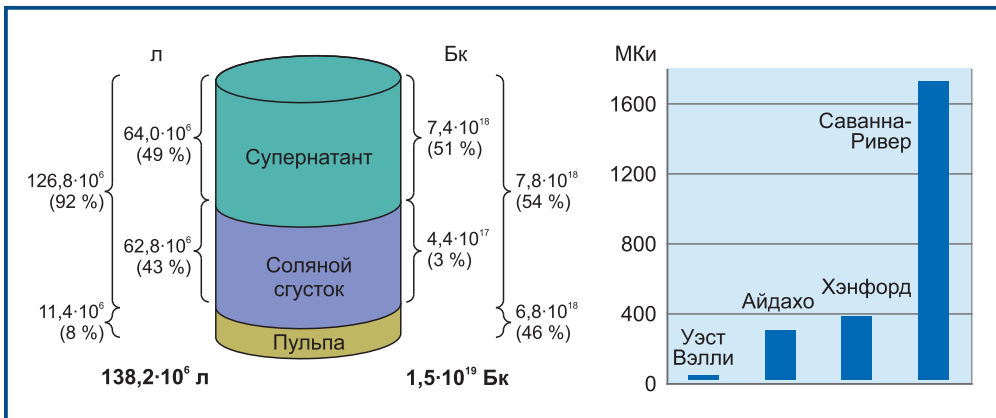


Рис. 1.52. Слева – реестр ЖРО Саванна-Ривер, справа – сравнение суммарной активности ВАО на других площадках ЯОК США

Мероприятия по восстановлению качества окружающей среды и выводу из эксплуатации установок Саванна-Ривер

Работы по восстановлению качества окружающей среды и рекультивации территории Саванна-Ривер были инициированы более двадцати лет тому назад. За эти годы на территории комплекса произведены масштабные работы по ликвидации неиспользуемых зданий и установок, очистке почвы и грунтовых вод, а также иммобилизации источников загрязнения. Согласно текущим планам, активные мероприятия по рекультивации и восстановлению территории планируется завершить лишь к 2065 году, а затраты на реализацию всего комплекса работ оцениваются в порядка 109 млрд долларов. Ниже представлены основные программы, включенные в дорожную карту работ по комплексу Саванна-Ривер.

Программа по переработке и захоронению исторических РАО

Основные задачи программы по переработке и захоронению исторических РАО в Саванна-Ривер:

- закрытие резервуарных парков;
- извлечение трансурановых радиоактивных отходов из полигонов и пунктов хранения СР, их характеристика, переупаковка и транспортировка в Нью-Мексико в целях окончательной изоляции РАО в WIPP;
- захоронение и перезахоронение на территории комплекса твердых НАО и САО, отвечающих критериям приемлемости, установленным для действующих на территории Саванна-Ривер пунктов окончательной изоляции.

Основная часть отходов СР размещена в резервуарных парках, состоящих из 51 подземной емкости-хранилища в зонах F и H, содержащих в общей сложности свыше $16 \cdot 10^4$ м³ ВАО, образовавшихся в основном в результате переработки ОЯТ и облученных мишеней. В целях обеспечения безопасности перед закачкой ЖРО в резервуары из углеродистой стали отходы предварительно ошелачивали. Постепенно в результате осаждения большая часть актинидов и продуктов деления переходила из щелочной жидкости в нерастворимый осадок на дне резервуаров – пульпу, а оставшийся сверху водорастворимый соляной раствор, содержащий радионуклиды, в том числе ¹³⁷Cs, направляли на выпарную установку.


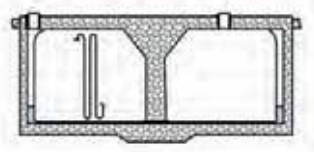


Сегодня основная задача работ по очистке территории резервуарных парков Саванна-Ривер заключается в удалении, переработке и окончательной изоляции пульпы, занимающей 10 % от объема резервуаров и содержащей половину радиоактивности, соляного сгустка, а также дезактивации и закрытии самих резервуаров [68].

Все резервуары-хранилища (РХ), использовавшиеся для размещения ЖРО с 1954 по 1986 гг., можно разделить на четыре типа (табл. 1.24, стр. 116).

Программа по закрытию резервуарных парков Саванна-Ривер стартовала в 1996 году. С тех пор количество действующих РХ сократилось до 43 (27 резервуаров в зоне H и 16 резервуаров в зоне F), содержащих в общей сложности 141 000 м³ ЖРО суммарной активностью около $10,6 \cdot 10^{13}$ МБк. В целях более эффективного использования полезного объема резервуарных хранилищ ЖРО подвергают выпариванию на установке, действующей с 1951 года. Так, за десятилетия эксплуатации в резервуарные хранилища было закачано около 570 000 м³ ЖРО, а в результате работы выпарной системы их объ-

ем был сокращен более чем в 3,5 раза. Нарушение целостности было зафиксировано у четырнадцати резервуаров, не оснащенных полноценной двухслойной оболочкой.

Табл. 1.24. Четыре типа емкостей подземных резервуарных хранилищ ЖРО в Саванна-Ривер (данные по состоянию на первую половину 2016 года)

<p>Tun I</p> 	<p>12 резервуаров, сооруженных в период с 1951 по 1953 гг., вместимость каждого – $2,8 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ (диаметр – 23 м, высота – 7,5 м), оснащены частичной вторичной защитной оболочкой с системой выявления протечек; 9 резервуаров содержат около $13 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ РАО; случаи протечки в межжольцевое пространство были зафиксированы в пяти резервуарах, содержащих РАО (ЖРО расположены ниже уровня обнаруженных протечек), три резервуара этого типа закрыты и зацементированы.</p>
<p>Tun II</p> 	<p>4 резервуара, сооруженные в период с 1955 по 1956 гг., вместимость каждого – $3,8 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ (диаметр – 26 м, высота – 8 м), оснащены частичной вторичной защитной оболочкой с системой выявления протечек; три резервуара содержат $3,8 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ ЖРО; случаи протечки в межжольцевое пространство были зафиксированы во всех резервуарах, один резервуар этого типа закрыт и зацементирован.</p>
<p>Tun III</p> 	<p>27 резервуаров, сооруженных в период с 1969 по 1981 гг., вместимость каждого – $5 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ (диаметр – 26 м, высота – 10 м), оснащены полноценной вторичной защитной оболочкой с системой выявления протечек; содержат $1 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ ЖРО; случаев протечки не зафиксировано.</p>
<p>Tun IV</p> 	<p>8 резервуаров, сооруженных в период с 1953 по 1963 гг., вместимость каждого – $5 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ (диаметр – 26 м, высота – 10,5 м), не оснащены вторичной защитной оболочкой; содержат около $15 \cdot 10^3 \text{ м}^3$ ЖРО; случаев протечек из резервуаров, содержащих ЖРО, не зафиксировано, четыре резервуара этого типа закрыты и зацементированы.</p>

Из них в ходе реализации программы по закрытию резервуарных парков:

- четыре резервуара закрыто и забетонировано (PX 5, 6, 19 и 20);
- два резервуара очищены от РАО, проводятся работы по оценке их состояния (PX 12 и 16);
- четыре PX содержат преимущественно ТРО и лишь незначительные количества надосадочной жидкости (PX 1, 9, 14 и 15);
- четыре PX содержат достаточно большие объемы надосадочной жидкости, однако на данный момент протечек не зафиксировано (PX 4, 10, 11 и 13).



На остальных 10 резервуарах, относящихся к типу I и IV, за всю историю эксплуатации фактов нарушения целостности выявлено не было, из них:

- два РХ закрыто и забетонировано (РХ 17 и 18);
- два РХ содержат преимущественно ТРО и лишь незначительные количества надосадочной жидкости (РХ 2 и 3);
- шесть РХ содержат достаточно большие объемы надосадочной жидкости (РХ 7, 8, 21–24).

Согласно текущим планам, все 24 резервуара-хранилища, имеющие однослойную или неполную двухслойную оболочку, должны быть закрыты до 2032 года, что на десять лет позже изначально намеченных сроков. Закрытие резервуара предполагает удаление всех содержащихся в нем ЖРО и заливку емкости несколькими слоями специального цементного раствора. Эта технология уже была опробована при закрытии нескольких резервуаров. При закрытии резервуары засыпаются несколькими слоями различных материалов: нижний слой цементного раствора позволяет удерживать в стабильной форме оставшиеся радионуклиды и токсичные соединения тяжелых металлов, следующий слой засыпки выполняется из материала низкой прочности, а верхний слой – из более плотного и прочного материала, защищающего от проникновения живых организмов внутрь установки (рис. 1.53) [69].

На рис. 1.54 представлена технологическая схема переработки отходов, извлекаемых из резервуаров-хранилищ, состоящая из нескольких этапов:

- удаление основного объема отходов осуществляется с использованием погружных насосов-смесителей. Причем такие насосы предназначены для многократного использования и оснащены специальной внешней оболочкой, облегчающей процесс дезактивации оборудования в целях обеспечения радиационной защиты персонала. Насос откачивает ЖРО в приемный резервуар, куда отходы поступают по системе старых трубопроводов, проложенных под землей. В случае отсутствия такой системы или ее поломки для передачи ЖРО на переработку по земле прокладывают новую

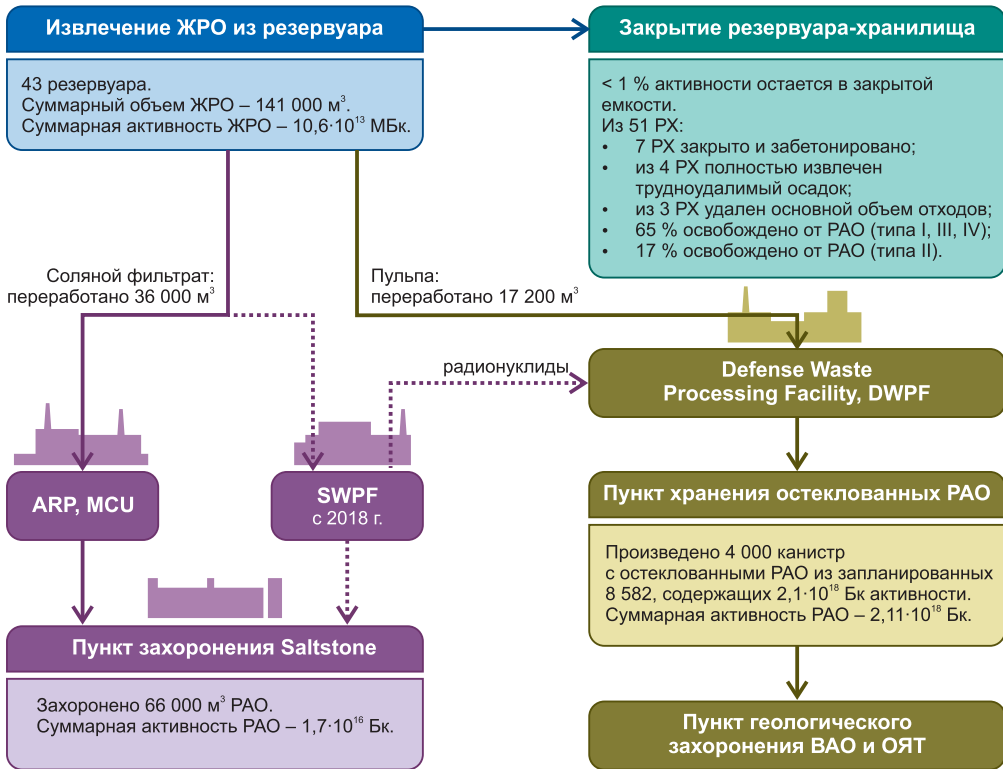


Рис. 1.54. Технологическая схема переработки отходов, извлекаемых из резервуаров-хранилищ Саванна-Ривер

систему гибких трубопроводов, при необходимости укрываемую специальным экраном для защиты персонала от облучения.

- переработка высокоактивной пульпы и ее заключение в матрицу из боросиликатного стекла осуществляется на установке, расположенной в зоне S (Defense Waste Processing Facility, DWPF). Она действует с 1996 года и к окончанию своего проектного срока службы в 2025 году должна произвести более 8 500 канистр с отверженными отходами. К настоящему времени на установке было произведено более 4 000 канистр с остеклованными РАО. В ожидании создания централизованного пункта захоронения канистры с отверженными отходами направляют на промежуточное хранение в специализированные сооружения, действующие на территории СР [70].

В дополнение к комплексу по обращению с соляными отходами на территории СР действует установка Салтстоун, производящая переработку и стабилизацию соляного фильтрата путем его смешивания с цементным раствором. Захоронение иммобилизованных таким образом отходов осуществляется непосредственно на промышленной площадке данной установки. Имеется два пункта захоронения: один для НАО вместимостью 30 500 м³ и другой для САО вместимостью 7 300 м³ (рис. 1.55). Согласно текущим оценкам оба пункта захоронения будут полностью заполнены не ранее 2050 года [71].



Рис. 1.55. Вид сверху на пункт захоронения НАО (справа) и САО (слева)

- что касается промежуточных этапов обработки соляных растворов до их транспортировки на установку Салтстоун, то данные операции выполняются на двух объектах – установке по удалению актинидов (АРР*) и модульной установке по экстракции загрязняющих веществ из щелочного раствора (МСУ**), вместе позволяющих удалить из отходов практически все радиоактивные изотопы. АРР производит экстракцию долгоживущих радионуклидов, таких как плутоний и стронций, за счет реакции соляного раствора с титанатом моносодия ($\text{NaTi}_2\text{O}_5\text{H}$), сорбирующим загрязнители, с последующим задержанием частиц этого вещества на фильтрах. Затем полученный шлам передается на остекловывание, а фильтрат поступает на следующую очистную установку МСУ, где под действием центробежной силы происходит разделение высокоактивного соляного раствора на два вида отходов: выделенный цезий направляют на остекловывание, а дезактивированный раствор – на цементирование [72].

В декабре 2018 года на территории резервации заработает новая более мощная установка по переработке соляных растворов с аналогичным принципом работы, которая позволит переработать большую часть ЖРО Саванна-Ривер (более $32 \cdot 10^7$ л) со скоростью около $23 \cdot 10^6$ л/год. Стоимость проекта составила порядка 2,3 млрд долларов.

Промежуточные итоги реализации программы по закрытию резервуарных парков Саванна Ривер представлены в табл. 1.25.

Табл. 1.25. Основные итоги работ по реабилитации территории резервуарных парков-хранилищ ЖРО Саванна Ривер (по состоянию на середину 2016 года)

Резервуарные парки ЖРО	закрыто и зацементировано 8 резервуаров; в 43 резервуарах находится $1,4 \cdot 10^6$ м ³ ЖРО суммарной активностью $9,36 \cdot 10^{12}$ МБк.
DWPF	произведено 4 000 канистр с остеклованными ВАО; с 1996 года установка позволила удалить около $2,17 \cdot 10^{12}$ МБк суммарной активности ЖРО; суммарный вес остеклованных РАО, отлитых на установке, составил около 6 000 тонн.
Saltstone	переработано $34 \cdot 10^3$ м ³ соляных отходов.

* Actinide Removal Process

** Modular Caustic Side Solvent Extraction



Рис. 1.56. Здание установки Салтстоун (а); контейнеры, готовые к размещению в траншеях пункта захоронения НАО (б)

Основная часть низкоактивных ЖРО приходится на поля фильтрации, использовавшиеся в прошлом для захоронения сточных вод, поступавших с радиохимических заводов F и H. Обработка таких РАО осуществляется на очистной установке в зоне H, позволяющей удалять тяжелые металлы, органические соединения и коррозионно-активные компоненты, а также цезий и некоторые другие радионуклиды. Максимальная скорость обезвреживания потока НАО составляет $1,6 \cdot 10^6$ л/день. После прохождения через установку обезвреженные сточные воды сбрасывают в реку Три Ранз.

Помимо ЖРО на территории резервации присутствуют полигоны размещения низкоактивных ТРО: загрязненные радионуклидами средства индивидуальной

защиты, инструменты и оборудование. Захоронение ТРО осуществляется в пункте захоронения, действующем с 2001 года в зоне E. Отходы с незначительным радиоактивным загрязнением упаковывают в контейнеры из алюминия и стали и помещают в траншеи. Для НАО, требующих более надежной изоляции, построен специализированный приповерхностный пункт захоронения модульного типа с бетонными сводами. При текущих темпах размещения отходов свободный объем пункта захоронения в зоне F будет полностью исчерпан не ранее 2024 года (рис. 1.56).

Все же не все НАО и САО отвечают критериям приемлемости, установленным для действующих на территории резервации пунктов захоронения, поэтому с июля 2001 года оператор СР осуществляет периодические поставки таких отходов на другие площадки в целях их переработки и окончательной изоляции.

За годы наработки оружейных материалов на территории СР было также произведено большое количество трансурановых РАО. Приблизительный реестр ТРУ РАО, произведенных в СР с начала 1970-х гг. по апрель 2009 года, насчитывает около $13\,750\text{ м}^3$ отходов (рис. 1.57).

Всего на момент начала работ по реабилитации в хранилищах СР находилось свыше 30 000 контейнеров ТРУ РАО. Работы по их извлечению начались в 1995

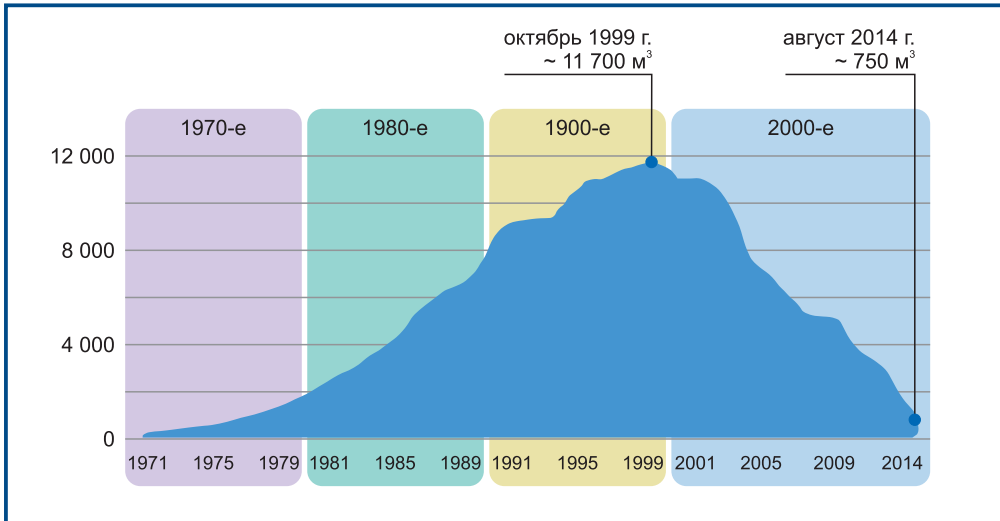


Рис. 1.57. Объемы ТРУ РАО, хранившиеся на территории Саванна-Ривер

году, а с 2001 году из Саванна-Ривер осуществляются регулярные поставки ТРУ РАО в Нью-Мексико, где с 1999 года функционирует опытная установка по изоляции трансурановых отходов. По состоянию на конец 2014 года в Нью-Мексико было совершено более 1 600 поставок ТРУ РАО из Саванна-Ривер, а для завершения программы оставалось выполнить лишь еще 120 поставок. При этом около 30 % отходов, изначально классифицировавшихся как ТРУ РАО, были отнесены к категории НАО и направлены в обычный пункт захоронения.

Наиболее трудоемким этапом работ по обращению с ТРУ СР стала подготовка отходов к транспортировке. В период с 1997 по 1999 год из полигонов СР было извлечено более 9000 бочек с ТРУ РАО. Отходы были захоронены здесь еще в конце 1970-х – начале 1980-х гг. в траншеях с бетонным полом, сверху засыпанных грунтом. При этом сами отходы зачастую не соответствовали критериям приемлемости WIPP, поэтому большую их часть пришлось переупаковать с извлечением запрещенных к захоронению на установке материалов [73] (рис. 1.58).



Рис. 1.58. Слева – бочки с ТРУ РАО до извлечения из траншеи, справа – после извлечения

Программа по очистке почвы и грунтовых вод

За более чем сорокалетнюю историю наработки оружейных материалов в Саванна-Ривер почва, поверхностные и грунтовые воды на территории резервации подверглись значительному загрязнению как радиационно токсичными, так и химически опасными веществами.

Всего на территории комплекса выделяют 14 основных областей загрязнения грунтовых вод (рис. 1.59), для которых требуется проведение детальных исследований характера и уровней загрязнения, а также реализация мероприятий по восстановлению и рекультивации.

Для СР принята стратегия поэтапной реализации восстановительных работ, а выбор применяемых технологий определяется размером области, видом присутствующих загрязнителей, их концентрациями, а также формой ареала загрязнения. При этом сам ареал загрязнения принято разделять на несколько зон (рис. 1.60) и для каждой зоны подбирать наиболее эффективные и целесообразные технологические решения по очистке:

«Зона источника» характеризуется наивысшей концентрацией загрязнителей, поэтому здесь требуется тщательная характеристика источника загрязнения и,



Рис. 1.59. Участки загрязнения грунтовых вод на территории Саванна-Ривер

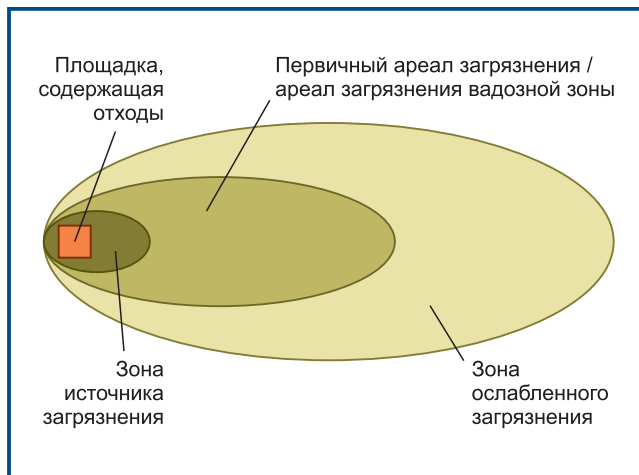


Рис. 1.60. Схема зонирования ареала загрязнения грунтовых вод

как правило, применение радикальных методов очистки, таких как экскавация грунта, нагрев грунта с целью удаления летучих загрязняющих компонентов, химическое окисление на месте, а также паровая экстракция почвы.

- Зона «первичного ареала загрязнения» также требует проведения работ по характеристике и внедрению систем откачки и очистки грунтовых вод. Для уменьшения содержания загрязняющих веществ в этой зоне зачастую применяют такие методы, как воздушное осушение, внедрение систем рециркуляции грунтовых вод, сооружение гидравлических барьеров, фитоорошение и закачка дезактивирующих растворов.

- Основной задачей проведения работ по характеристике «зоны ослабленного загрязнения» является построение модели массового переноса потока загрязняющих веществ. Поскольку уровни загрязнения в этой зоне невысоки, то здесь достаточно применения пассивных технологий с низким энергопотреблением, например, пассивной экстракции почвы паром и т. п.

Все системы реабилитации грунтовых вод, применяемые в Саванна-Ривер, можно условно разделить на две категории: активные и пассивные. Радикальные методы, осуществляемые с использованием технологии активной реабилитации, позволяют удалить или иммобилизовать загрязнители, а также понизить уровень их концентраций.

После удаления на первых стадиях реабилитации основной массы загрязнителей наиболее целесообразным шагом становится переход к использованию пассивных технологий повышенной эффективности, отличающихся низким энергопотреблением и незначительными уровнями выброса оксидов углерода, а затем и вовсе перейти к простым пассивным методам (рис. 1.61) [74].

К активным системам реабилитации относятся:

- системы откачки и очистки грунтовых вод;
- методы тепловой обработки грунта.

Системы откачки и обезвреживания грунтовых вод Саванна-Ривер аналогичны тем, что используются в Хэнфорде. Методы тепловой обработки позволяют разрушить или выпарить органические загрязняющие вещества. Под воздействием тепла химические соединения переходят в газообразное состояние, их мобильность повышается, и

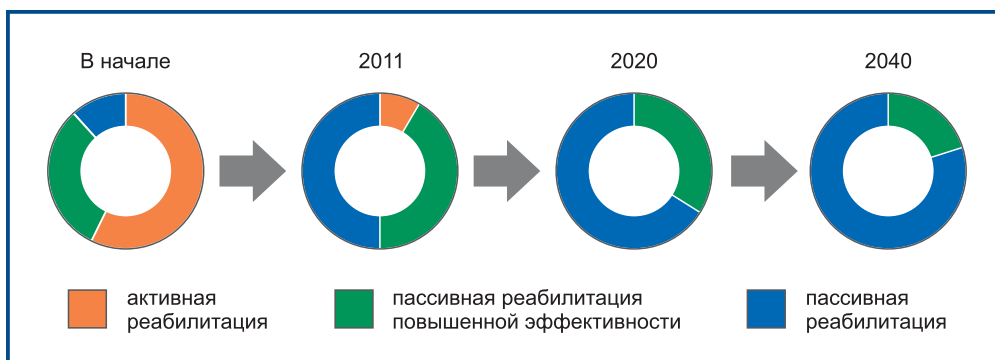


Рис. 1.61. Этапы реализации программы по реабилитации грунтовых вод и применяемые технологии

они с легкостью задерживаются в газоотводных скважинах. Наиболее эффективно применение теплового метода для удаления плотных или легких неводных жидких фаз. Основным преимуществом данного метода является отсутствие необходимости проведения экскавационных работ и транспортировки загрязненного грунта, что приводит к значительному снижению финансовых затрат. Тем не менее, затраты времени при обезвреживании на месте, как правило, куда значительнее, а результат очистки почвы может оказаться неравномерным из-за неоднородности характеристик грунта и водоносных горизонтов. Оценить эффективность проведенных мероприятий в этом случае также чрезвычайно сложно.

В Саванна-Ривер одновременно используется два метода теплового обезвреживания: подземная динамическая отгонка путем нагнетания пара в грунт, а также нагрев электрическим током. Нагрев током реализуется с помощью группы электродов, устанавливаемых в слое грунта вокруг центрального нейтрального электрода, создающих поток электрического тока, направленный от периферии к центру системы. Под действием тока почва нагревается до 100 °С и более. При этом из почвы начинает выделяться пар, подвижность загрязнителей увеличивается, и их легко уловить методом вакуумной экстракции. Отличительной чертой данной технологии является быстрота обезвреживания – всего 40 дней [74]. Метод обезвреживания почвы эклектическим током был использован при реабилитации грунтовых вод на реакторной площадке С в 2006 году и позволил удалить около 322 кг загрязняющих веществ [67].

Начиная с 2011 года, на территории СР активное применение нашли и пассивные системы повышенной эффективности, занимающие промежуточное положение между активными и пассивными. Их отличительной особенностью является то, что для их работы не требуется стороннего источника электроэнергии. Применяют два типа подобных технологий – VaroBall и MicroBlower. Система VaroBall (рис. 1.62) позволяет осуществлять откачку летучих загрязнителей, скапливающихся в газоотводных шах-

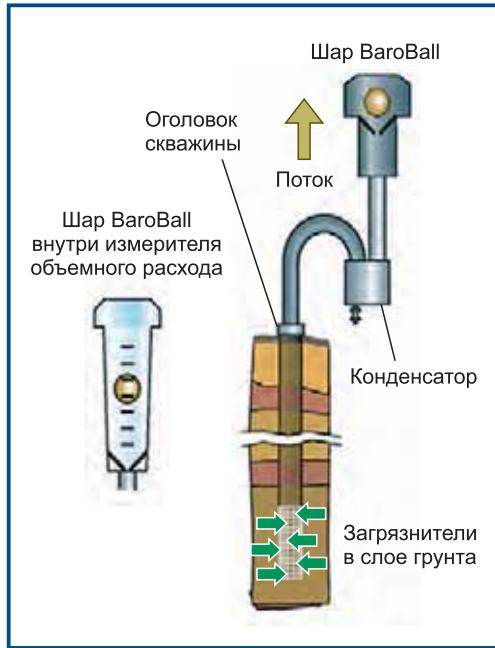


Рис. 1.62. Система VaroBall



Рис. 1.63. Система MicroBlower

тах после проведения паровой экстракции почвы. Система работает за счет перепадов атмосферного давления – если атмосферное давление выше давления внутри скважины, то регулирующий клапан, выполненный в форме шарика, опускается, и выпускной патрубок закрывается; если давление внутри скважины выше атмосферного, то патрубок открывается и летучие соединения поступают в воздух. Вторая система MicroBlower работает за счет портативной солнечной батареи (установка потребляет всего 20–40 Вт энергии) и для удаления скопившихся летучих соединений в отдельных отводных скважинах системы создается вакуум (рис. 1.63). За 10 месяцев эксплуатации в Саванна-Ривер данная установка помогла удалить около 7 м³ летучих органических соединений.

Фитореабилитацию также следует отнести к категории полупассивных технологий. Для ее реализации загрязненную тритием воду собирают в специальных резервуарах и за счет серий контролируемых сбросов направляют в систему водоемов с запрудами, вода из которых используется для орошения сосновых лесов. Корни деревьев поглощают загрязненную тритием воду и выделяют пары с очень низким содержанием трития, способные безопасно раствориться в атмосфере.

Использование систем закачки специальных реагентов также относится к полупассивным методам реабилитации в том случае, если такая практика применяется нерегулярно лишь с целью изменения геохимических условий и активизации естественных процессов биodeградации. Так, в Саванна-Ривер эпизодическая закачка растительного масла и хлорида серебра* была проведена в водоносные горизонты в целях активизации жизнедеятельности микроорганизмов, потребляющих летучие органические компоненты и ¹²⁹I. Результаты последних исследований свидетельствуют о высокой эффективности данного метода – содержание ¹²⁹I в пробах воды упало на 30–50 %.

Пассивные системы реабилитации в Саванна-Ривер применяются для зон «ослабленного загрязнения» и на границе ареала загрязнения. В их основе лежат естественные физические процессы и процессы естественной биохимической деградации (биodeградация, естественный распад, дисперсия) [74].

Согласно оценкам экспертов применение в Саванна-Ривер стратегии очистки почвы и грунтовых вод, сочетающей в себе использование активных, пассивных и полупассивных мер, позволило снизить расходы на проведение этих мероприятий в более чем десять раз. Сегодня на реализацию всего комплекса мер по реабилитации почвы и грунтовых вод расходуется всего около 1 млн долларов в год.

Деактивация и вывод из эксплуатации установок Саванна-Ривер

Программа дезактивации и вывода из эксплуатации предусматривает не только ликвидацию всех неиспользуемых установок и сооружений, но рекультивацию территорий промышленных площадок и реабилитацию грунтовых вод и почвы. Таким образом, она тесно привязана к программе, рассмотренной выше. Всего на момент начала реализации программы было выявлено свыше 900 установок и сооружений, подлежащих ликвидации. По состоянию на конец 2008 года ликвидировано 248 из них. Согласно текущим планам, программа по дезактивации и выводу из эксплуатации будет полностью завершена к 2031 году [51, 68].

* размер частиц серебра не превышает одной четвертой части микрона

Финансовое обеспечение работ и основные подрядчики

Согласно оценкам затрат на реализацию программ по восстановлению и рекультивации различных площадок ЯОК США, подготовленным Министерством энергетики, планируемая стоимость осуществления работ по реабилитации территории Саванна-Ривер составляет около 53 млрд долларов. Таким образом, по уровню затрат комплекс Саванна-Ривер находится на втором месте среди всех площадок ЯОК США (рис. 1.64) [76]. При этом утвержденный годовой бюджет на 2016 год для СР составил 1,4 млрд долларов. В целом наиболее затратными статьями расходов для резервации должны стать вывод из эксплуатации и закрытие резервуарных парков ЖРО – на закрытие 22 резервуаров-хранилищ должно уйти не менее 5,6 млрд долларов [76], а также сооружение завода по изготовлению МОКС-топлива – 7,7 млрд долларов [77, 78, 79].

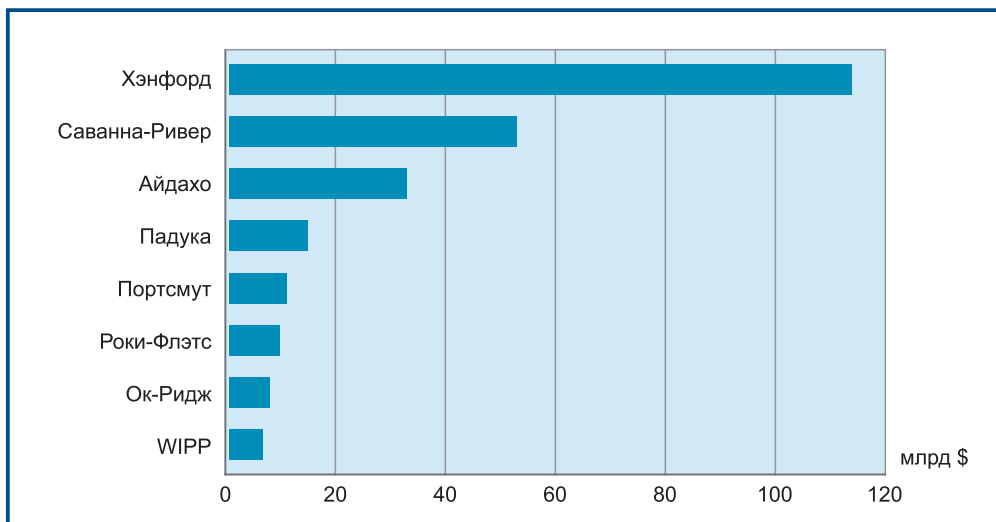


Рис. 1.64. Сравнение затрат на реализацию программ по восстановлению и рекультивации основных площадок ЯОК США

В проведении восстановительных работ на территории резервации Саванна-Ривер принимают участие шесть основных подрядчиков [51]:

- Savannah River Nuclear Solutions – обращение с отходами, проведение работ по дезактивации и выводу из эксплуатации установок;
- Savannah River Remediation LLC – обращение с ЖРО Саванна-Ривер;
- WSI SRS Team – обеспечение физической безопасности на территории комплекса Саванна-Ривер;
- Shaw AREVA MOX Services – сооружение комплекса по производству МОКС-топлива;
- Parsons – сооружение установки по переработке соляных отходов;
- University of Georgia – управление экологической лабораторией Саванна-Ривер.

1.1.5. Лос-Аламос

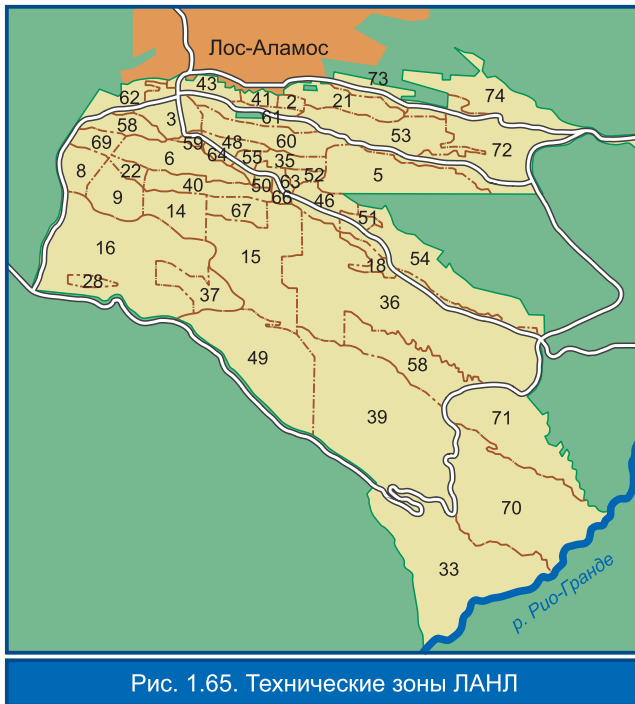


Рис. 1.65. Технические зоны ЛАНЛ

Лос-Аламосская Национальная лаборатория (ЛАНЛ) – одна из шестнадцати национальных лабораторий Министерства энергетики США, расположенная на севере штата Нью-Мексико в 100 км от города Альбукерке и в 40 км от города Санта-Фе (рис.1.65).

Территория ЛАНЛ общей площадью 111 км² разделена на несколько технических зон, где располагаются различные установки, используемые для проведения экспериментальных исследований, захоронения отходов и т. п. В целях обеспечения безопасности проводимых работ все площадки ЛАНЛ расположены на

значительном удалении друг от друга, из-за чего активно используется менее 25% от общей площади лаборатории.

История создания и ключевые объекты

Лос-Аламос стал одной из первых трех площадок ЯОК США, утвержденных военным ведомством в 1942 году. На комплекс была возложена миссия по проведению НИОКР и строительству установок для разработки, окончательной обработки ядерных оружейных материалов, сборки компонентов атомной бомбы и проведению ядерных испытаний. К реализации проекта под кодовым названием Проект Y (Project Y) военные приступили в ноябре 1942 года. Пять районов штата Нью-Мексико были исследованы с целью определения наилучшего места для размещения комплекса установок [80]. Площадка Лос-Аламос выиграла по всем параметрам:

- большая часть территории (190 км² из 220 км², определенных планом) уже находилась в собственности государства, что упрощало процедуру отчуждения земель;
- размеры площадки позволяли разместить требующиеся установки на достаточном удалении друг от друга;
- ближайший город находился в 26 км от площадки;
- расположение объекта на плоскогорье оказалось выгодным с точки зрения организации контрольно-пропускной системы на объекте;
- территория была почти полностью занята пастбищами, а площадь лесистых участков была незначительна, что облегчало проведение операций по ее расчистке.

Однако основной причиной, по которой предпочтение было отдано именно этой площадке, стала возможность использования уже имеющихся на территории сооружений для размещения запланированных установок. Для этих целей были использованы постройки частной школы Ранч в городе Лос-Аламос.

Вся территория комплекса была поделена на несколько технических зон. К 1945 году на территории Основной технической зоны (ТА-1) площадью 10 га было сооружено порядка 100 строений, содержащих установки как для проведения испытаний, так и для промышленной наработки ядерных материалов. Некоторые виды работ, например испытания, были признаны слишком опасными для выполнения в зоне ТА-1 и перемещены в другие зоны [80].

В табл. 1.26 представлены основные технические зоны комплекса, наиболее активно использовавшиеся в период 1942–1946-х гг. [81].

Табл. 1.26. Технические зоны Лос-Аламоса до начала холодной войны

№ зоны	Название и описание		Ядерные материалы
ТА-1	Основная Техническая зона (1943–1965 гг.), к 1975 г. – территория полностью рекультивирована.		Обогащенный и обедненный U, ^{238,239} Pu, ²⁴¹ Am, ²¹⁰ Po, ¹⁴⁰ Ba, ¹⁴⁰
ТА-2	Площадка Омега: 1943–1946 гг. – эксперименты по определению критической массы ядерного реактора.		²³⁵ U, ²³⁹ Pu, ¹³¹ I, ⁸⁸ Rb, ¹³⁷ Cs, ¹³¹ Xe, ¹²⁵ I, ⁴¹ Ag, ³ H
ТА-4	Площадка Альфа: 1943–1956 гг. – испытательный полигон взрывчатых веществ большой разрушительной силы; сейчас на площадке находится пункт захоронения С.		Обедненный U
ТА-5	Площадка Бета: 1945 г. – проведение испытательных взрывов.		Обедненный U
ТА-8	Площадка Энкор Уест: 1943–1945 гг. – испытательный полигон взрывчатых веществ большой разрушительной силы; 1945–1950 гг. – производство взрывчатых веществ.		²³⁸ Pu, ²³⁹ Pu, ²³⁵ U, обедненный уран, ⁶⁰ Co, ¹⁹² Ir, ¹³⁷
ТА-10	Байо Кэньон: 1944–1961 гг. – испытательные взрывы лантана, 1944–1950 гг. – эксплуатация лаборатории по изучению свойств лантана; в 1963 г. площадка рекультивирована.		⁹⁰ Sr, обедненный и природный U, ¹⁴⁰
ТА-12	Площадка L: 1945–1946 гг.	проведение испытательных взрывов	обедненный и природный U
ТА-14	Площадка Q: 1944 г. – по н. в.		
ТА-18	Лаборатория Паджарито: 1946 г. – по н. в. – эксперименты по определению критической массы ядерного реактора.		²³⁹ Pu, ²⁴⁰ Pu, ²³⁵ U, ²³³ U, ¹³¹ I, полоний
ТА-21	Пункты захоронения опасных химических и радиоактивных отходов		²³⁹ Pu, ²³⁸ Pu, ²⁴⁰ Pu, ²⁴¹ Pu, ²⁴¹ Am, ²³⁵ U, ²³⁸ U, ²¹⁰ Po, ²²⁷ Ac, ³

К концу 1943 года на площадке Омега (ТА-2) был построен первый маломощный реактор типа «водяной котел» LOPO (LOPO – low power) с нулевой выходной мощностью; в качестве топлива использовавший водный раствор обогащенного уранилсульфата (уран со степенью обогащения 14%), на получение которого в те времена уходил весь объем производимого в США урана. Реактор достиг критического состояния в мае 1944 года, и тогда же была определена критическая масса урана-235, составившая

535 г. После этого реактор LOPO был демонтирован и на его месте был сооружен новый того же типа мощностью 5,5 кВт (реактор NYPO), в качестве топлива использовавший уранилнитрат.

NYPO был введен в эксплуатацию в декабре 1944 года, и именно с его помощью был произведен целый ряд основных нейтронных измерений, необходимых для проектирования первых атомных бомб. К марту 1951 года реактор был модернизирован, что позволило ему выйти на мощность 35 кВт, поток нейтронов был увеличен до $10^2 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, а степень обогащения раствора уранилнитрата повышена с 14 % ^{235}U до 88,7 % ^{235}U . Эта версия реактора получила название SUPO. Он был окончательно остановлен в 1974 году после обнаружения протечки, в результате которой значительные количества радиоактивного цезия поступили в окружающую среду [82].

В Лос-Аламосе также был создан и эксплуатировался первый в мире реактор на быстрых нейтронах Клементин, работавший на плутониевом топливе. В конце 1946 года реактор достиг критического состояния, а на проектную мощность 25 кВт вышел лишь в марте 1949 года. Все необходимые измерения (энергетический спектр нейтронов, эффекты реактивности, сечение захвата) на реакторе были проведены еще до достижения реактором проектной мощности. Затем после эксплуатации в течение одного года в марте 1950 года реактор был остановлен из-за обнаружения неисправности одного из топливных стержней. Стержень был извлечен, и в сентябре того же года реактор был вновь запущен. Однако вскоре выяснилось, что повреждение топливного стержня привело к утечке плутония в ртутный теплоноситель. Было принято решение об окончательном останове реактора и его выводе из эксплуатации.

Так, стало очевидно, что использовать ртуть в качестве теплоносителя в быстрых реакторах нецелесообразно как из соображений безопасности, так и из-за ее неудовлетворительных теплофизических свойств. После вывода реактора Клементин из эксплуатации элементы его конструкции были захоронены в зоне С, а место захоронения ртутного теплоносителя до сих пор точно не установлено [82].

Изначально считалось, что единственной целью учреждения лаборатории в Лос-Аламосе является разработка технологий для создания первой в мире атомной бомбы. Поэтому изначально планировалось ликвидировать комплекс сразу после завершения этого проекта. Однако после того как в 1949 году СССР провел испытания своей первой атомной бомбы, планы США изменились, и на базе военного объекта, действовавшего под кодовым названием Проект Y, появилась Лос-Аламосская научная лаборатория, задачей которой стало проведение научно-исследовательской и экспериментальной работы, направленной на совершенствование технологий по созданию ядерного оружия.

Основная деятельность в Лос-Аламосе шла на исследовательском ускорителе Ван-де-Грааф, в центре химических и металлургических исследований, и в нескольких хранилищах ядерных материалов. В конце 1950-х годов появились сразу несколько пунктов захоронения:

- полигон G для размещения радиоактивных отходов;
- зона J, где захоранивалось выведенное из эксплуатации оборудование, незначительно загрязненное компонентами взрывчатых веществ;
- зона L использовалась для окончательной изоляции химически токсичных отходов (1964–1975 гг.),

- зона Н для размещения незагрязненных секретных оружейных материалов.

С середины 1950-х по конец 1960-х годов было построено еще несколько исследовательских реакторов. Позже к ним добавились: установка по переработке плутония, ускоритель частиц, полигон инженерных испытаний оружия и материаловедческая лаборатория.

Сегодня Лос-Аламосская национальная лаборатория является одной из двух лабораторий в США, занимающихся совершенствованием технологий по созданию ядерного оружия. Также лаборатория проводит и научные исследования, не связанные с оборонной деятельностью, например, в области энергетики, экологии и биологии.

Исторические практики обращения с РАО и загрязнение окружающей среды

За годы эксплуатации на территории комплекса Лос-Аламос было произведено огромное количество как радиоактивных, так и опасных химических отходов. Согласно текущим оценкам в пунктах захоронения лаборатории были размещены тысячи кубических метров жидких и твердых радиоактивных отходов. На начальном этапе никаких специальных мер по обеспечению безопасности при обращении с РАО не предпринималось – ТРО перед размещением в приповерхностных могильниках траншейного типа упаковывали в картонные коробки, запечатанные при помощи изоляционной ленты, а до 1951 года все жидкие радиоактивные и химически токсичные отходы сбрасывались в окружающую среду без какой-либо предварительной обработки [83].

На территории лаборатории расположено 26 полигонов захоронения траншейного типа, принимавших как радиоактивные, так и нерадиоактивные твердые отходы. Около 12 000 м³ ТРО загрязнены плутонием. Результаты проведенных недавно исследований показывают, что на территории ЛАНЛ утечка радиоактивных веществ в грунтовые воды происходила практически на всех полигонах захоронения исторических РАО. Проведение работ по рекультивации осложняется еще и тем, что не существует точных данных об объемах и типах отходов, захороненных на этих полигонах до 1970 года. Наибольшие объемы захоронения приходятся на три полигона: С (1,8·10¹⁵ Бк), G (5,1·10¹⁶ Бк) и Н (1,4·10¹³ Бк).

Большая часть ЖРО в прошлом была сброшена в три каньона, расположенные на территории лаборатории – Пуэбло, Лос-Аламос и Мортандэд. Наибольшие объемы выбросов ЖРО приходятся на речку Саус Форк, протекающую по каньону Пуэбло. В период с 1943 по 1951 гг. в эту реку через трубопровод, соединявший все установки и лаборатории технической зоны ТА-1, где производились манипуляции с плутонием, ежедневно сбрасывались значительные объемы неразбавленных и неочищенных ЖРО, содержащих высокие концентрации плутония, цезия, стронция, урана, америция и трития. Такой сброс без предварительной обработки продолжался вплоть до 1951 года пока в зоне ТА-45 не был введен в эксплуатацию завод по очистке ЖРО, а начиная с 1964 года после сооружения еще одной очистной установки в зоне ТА-50, все ЖРО стали подвергаться обязательной предварительной очистке перед сбросом [83].

Оценить суммарную активность сбросов в каньоны чрезвычайно сложно, так как документальных свидетельств практически не сохранилось. Согласно данным, опубликованным ЛАНЛ, в период с 1943 по 1951 гг. средняя концентрация плутония, ежедневно сбрасываемого с потоками ЖРО, оценивалась на уровне 37 Бк/л. При этом суммарный сброс плутония с 1943 по 1950 гг. оценивается на уровне 1,11·10⁸ Бк. В последующие годы и до полного прекращения сбросов предварительно необработанных ЖРО в 1964

году в окружающую среду поступило еще $8,6 \cdot 10^7$ Бк плутония, $1,2 \cdot 10^2$ Бк трития и $2 \cdot 10^9$ Бк альфа-излучающих радионуклидов [83].

Помимо регулярных сбросов ЖРО было произведено и несколько аварийных сбросов (в основном в каньон Мортандэд). Очевидно, что аварийные сбросы имели место в течение всего времени существования лаборатории, однако официальные данные представлены только по сбросам, осуществленным после 1952 года. Наиболее серьезными признаны три ситуации [83]:

- 1952 год – аварийный сброс 7,5–11 тыс л. «горячей воды» из бассейнов завода по переработке ЖРО (зафиксирована мощность дозы 0,5 мР/ч).
- 1956 год – сброс $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк ^{90}Sr из хранилища.
- 1956 год – утечка 130 000 л ЖРО из трубопровода в каньон Мортандэд.

Американские специалисты, занимающиеся оценкой исторических выбросов радиоактивных веществ в Лос-Аламосе, разработали специальную систему индексов, позволяющую установить, какой именно радионуклид в наибольшей степени обуславливал загрязнение окружающей среды в тот или иной период времени. Для ЖРО при расчете индекса приоритетности для разных радионуклидов* вычислялся объем жидкости, необходимой для растворения ежегодно сбрасываемой активности до получения значений предельно допустимых концентраций радионуклидов, представленных в документе 10CFR20 («Нормы защиты от радиационного излучения»**). Так, были получены индексы приоритетности для сбросов, произведенных в период с 1945 по 1996 гг. (табл. 1.27) [81].

Табл. 1.27. Категории радионуклидов в сбросах ЖРО, обладающих наибольшим индексом приоритетности

Годы	Категория радионуклидов	Индекс приоритетности (л)	
1945–1952	Плутоний	$5 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10$
1953–1954	^{90}Sr	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^8$
1955–1957	Суммарная альфа-активность	$8 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^9$
1958	Плутоний	$5 \cdot 10^9$	$5 \cdot 10^9$
1959	Суммарная бета-активность	$6 \cdot 10^8$	$6 \cdot 10^8$
1960–1963	Суммарная альфа-активность	$6 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^{10}$
1964	Суммарная бета-активность	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^8$
1965–1968	Суммарная альфа-активность	$2 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^8$
1969	Плутоний	$4 \cdot 10^8$	$4 \cdot 10^8$
1970–1973	Суммарная альфа-активность	$4 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^8$
1977–1980	^{238}Pu	$9 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^8$
1981–1989	^{239}Pu	$1 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^9$
1990–1992	^{90}Sr	$3 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^8$
1993	^{239}Pu	$5 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^7$
1994–1996	^{238}Pu	$1 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^8$

* в исследовании такие индексы вычислялись для Pu, Sr, ^3H , суммарного объема альфа- и бета-излучателей.

** «Standards for protection against radiation»

Из данных табл. 1.27 видно, что в течение 27 лет (из 49 лет в период с 1945 по 1996 гг.) наиболее приоритетными считаются выбросы плутония. При этом выбросы трития с ЖРО вообще не фигурируют в списке, несмотря на то, что в Лос-Аламосе действовало сразу несколько установок, производящих тритий.

Что касается газо-аэрозольных выбросов, то и для них был составлен отдельный перечень категорий радионуклидов. В этом случае индекс приоритетности радионуклида рассчитывался как объем воздуха, необходимый для разбавления ежегодно сбрасываемой активности до значений предельных концентраций, представленных в документе 10CFR20 (табл. 1.28) [81].

Табл. 1.28. Категории радионуклидов в газо-аэрозольных выбросах, обладающих наибольшим индексом приоритетности

Годы	Категория радионуклидов	Индекс приоритетности (л)	
1944–1947	Радиоактивный лантан	$6 \cdot 10$	$1 \cdot 10^{13}$
1948–1966	Плутоний	$7 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{18}$
1967–1969	Уран	$1 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^7$
1970–1974	Плутоний	$2 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{15}$
1975	Уран	$7 \cdot 10^{13}$	$7 \cdot 10^{13}$
1976–1977	Тритий	$3 \cdot 10^{13}$	$4 \cdot 10^{14}$
1978–1989	Смешанные продукты активации	$6 \cdot 10^{14}$	$4 \cdot 10^{15}$
1990	Тритий	$1 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{14}$
1991	Уран	$1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{15}$
1992–1996	Смешанные продукты активации	$6 \cdot 10^{13}$	$7 \cdot 10^{14}$

Табл. 1.29. Годовые выбросы плутония из вентиляционных систем здания D на территории Лос-Аламоса

Год	Масса ежегодного сброса (г)	Активность ежегодного сброса (Бк)
1948	17,91	$4,9 \times 10$
1949	86,60	$2,4 \times 10^2$
1950	61,74	$1,7 \times 10^2$
1951	10,43	$2,8 \times 10$
1952	16,71	$4,5 \times 10$
1953	8,41	$2,3 \times 10$
1954	5,01	$1,4 \times 10$
1955	19,82	$5,4 \times 10$
1956	1,23	$3,3 \times 10^{10}$
1957	1,19	$3,2 \times 10^{10}$
1958	1,32	$3,6 \times 10^{10}$
1959	2,97	$8,1 \times 10$
1960	0,60	$2,2 \times 10^{10}$

Из результатов табл. 1.28 видно, что в период с 1948 г. по 1960-е годы наибольший вклад в газо-аэрозольные выбросы радиоактивных веществ внес плутоний. Согласно официальным данным, суммарная активность выбросов плутония с 1943 по 1972 гг. превысила $6,3 \cdot 10^2$ Бк, причем по большей части выбросы плутония производились через вентиляционные системы установок, размещенных в здании D (табл. 1.29), использовавшихся для проведения химических и металлургических испытаний с применением урана и плутония.

Следует отметить, что результаты исследовательских работ по реконструкции картины газо-аэрозольных выбросов с трех крупнейших площадок ЯОК США, где также производились манипуляции с плутонием: Хэнфорд, Роки Флэтс и Саванна Ривер показывают, что за годы эксплуатации всех трех объектов суммарная активность выброса плутония составила всего $1,4 \cdot 10^2$ Бк. Отчасти такие высокие значения выброса плутония в Лос-Аламосе объясняются отсутствием сухих фильтров очистки отходящих газов, которые впервые появились на установках лаборатории лишь в 1959 году [83].

Присутствие в списке радиоактивного лантана, являвшегося приоритетным загрязнителем в период 1944–1947 гг., объясняется проведением операций по химической экстракции при испытании имплозивных процессов. В период с сентября 1944 по июль 1950 года в зоне TA-10 были произведены испытательные взрывы с использованием 150 источников ^{140}La активностью от $1,5 \cdot 10^2$ Бк до $1,1 \cdot 10^{14}$ Бк.

Кроме того, в ходе оценки газо-аэрозольных выбросов радиоактивных веществ были реконструированы значения суммарной активности трития. Наибольшая активность сброса его была зафиксирована на площадках TA-3 и TA-41 в 1968 году – $3,84 \cdot 10^{14}$ Бк и $5,84 \cdot 10^{14}$ Бк, а также на площадках TA-15 и TA-35 в 1970 году – $4,07 \cdot 10^{14}$ Бк и $9,25 \cdot 10^{14}$ Бк [83].

Мероприятия по восстановлению качества окружающей среды и выводу из эксплуатации установок Лос-Аламоса

В ходе исследований по выявлению загрязненных участков, проведенных в 80-е годы на территории ЛАНЛ, было определено порядка 2 100 площадок, для которых потенциально требовалось проведение восстановительных мероприятий. За последние два десятилетия из эксплуатации был выведен целый ряд установок, а в 2005 году между Управлением по защите окружающей среды штата Нью-Мексико и ЛАНЛ было заключено соглашение, по которому в 2015 году в Лос-Аламосе должны были завершиться все мероприятия по очистке и рекультивации территории. Результаты проведенных к настоящему моменту исследований показывают, что 900 площадок из 2100 изначально выявленных не требуют проведения каких-либо восстановительных мероприятий. Наиболее загрязненными участками признаны площадки полигонов захоронения (зоны TA-21 и TA-54*). Начиная с 1957 года, эти полигоны приняли на захоронение около $1,48 \cdot 10^{11}$ МБк РАО. Кроме того, здесь на временном хранении в ожидании транспортировки в WIPP находится около $10\,600\text{ м}^3$ трансурановых отходов [84].

Загрязнение территории ЛАНЛ по большей части обусловлено плутонием, тритием, тяжелыми металлами, барием и ураном, выброшенными в окружающую среду

* пункт захоронения площадью более 24 га до сих пор используется для захоронения НАО, а также хранения и переработки трансурановых отходов

в ходе проведения взрывных испытаний, а также органическими растворителями. Рельеф местности (плато, прорезанное глубокими ущельями) и сухой климат способствуют задержанию загрязняющих веществ на поверхности и препятствуют их проникновению вглубь грунта. Все же некоторые летучие органические соединения большей подвижности и тритий были обнаружены в вадозной зоне на глубине нескольких десятков метров от поверхности земли. Кроме того, в местном водоносном горизонте, верхняя граница которого расположена на уровне 183–366 м ниже верхней отметки плато, обнаруживаются повышенные концентрации хрома.



Рис. 1.66. Потенциально загрязненные участки ЛАНЛ

Учитывая характер произведенных в прошлом сбросов РАО, а также особенности переноса загрязняющих веществ, обусловленные естественным рельефом местности, основные зоны загрязнения ЛАНЛ представлены каньонами (рис. 1.66). В прошлом большая часть ЖРО сбрасывалась в три таких каньона – Лос-Аламос, Пуэбло и Мортандэд. Причем сброс, как правило, осуществлялся вдоль их края, поэтому именно склоны каньонов оказались наиболее загрязненными, что значительно осложняет как проведение исследований, так и выполнение работ по очистке и рекультивации территории. Из-за рельефа местности ЛАНЛ можно по праву считать одной из наиболее сложных площадок Министерства энергетики США с точки зрения осуществления мероприятий по очистке загрязненных территорий. Все дело в том, что данная местность на глубинах до 600 м от поверхности земли сложена целым рядом разнообразных геологических формаций в основном вулканического происхождения, обладающих совершенно разными гидрологическими характеристиками. Кроме того, такие структуры прерывисты и испещрены трещинами. Все это в значительной степени осложняет как проведение буровых работ, так и моделирование и анализ. Так, на одних участках в водоносных горизонтах может обнаруживаться присутствие высоких концентраций загрязняющих веществ при том, что в непосредственной близости концентрации этих же веществ могут быть нулевыми.

К настоящему моменту завершена реализация проекта по очистке склонов одного из каньонов, использовавшегося в период с конца 1940-х по 1970-е годы для сброса НАО и содержащего тяжелые металлы и малолетучие органические соединения золы, произведенной установкой для сжигания отходов. Все работы приходилось выполнять



Рис. 1.67. Особенности проведения работ по очистке территории ЛАНЛ в условиях гористого рельефа

на поверхностях, расположенных под уклоном около 60 градусов. В результате с помощью специально сконструированной системы, состоявшей из подвесной площадки и единственного в своем роде подвешенного экскаватора «Паук», было удалено более 1 500 м³ загрязненных пород и золы. Для удаления еще около 700 м³ отходов были использованы вакуумные установки (рис. 1.67).

Еще одна сложность, с которой пришлось столкнуться при выполнении работ по очистке загрязненных территорий в ЛАНЛ, заключается в том, что большая часть исторических перерабатывающих установок и лабораторий находится на площадках, достаточно активно задействованных в рамках выполнения текущей миссии комплекса. В 1960-е годы в ЛАНЛ уже проводились некоторые работы по очистке, однако по большей части подобные мероприятия заключались лишь в вывозе части радиоактивных материалов с установок, а работы по рекультивации и дезактивации так и не были выполнены в полном объеме, поэтому сегодня не все участки технических зон ЛАНЛ удовлетворяют требованиям современных норм безопасности. Одной из таких проблемных зон является техническая зона ТА-21, на территории которой расположен самый крупный и старый полигон захоронения исторических РАО – полигон В площадью 2,4 га, а через улицу от него находятся действующие промышленные установки ЛАНЛ [84]. Ниже более подробно описаны наиболее масштабные работы по очистке и рекультивации территории двух технических зон – ТА-21 и ТА-54.

Техническая зона ТА-21

В зоне ТА-21 располагалось сразу несколько главных исторических установок ЛАНЛ – это химическая лаборатория по изучению процессов аффинажа плутония, функционировавшая в период с 1945 по 1978 гг., и опытная установка по производству трития. Кроме того, здесь находятся пять полигонов захоронения исторических РАО, в том числе и полигон В. На полигон В, состоящий из нескольких необлицованных траншей, в 1945–1948 гг. свозили РАО с близлежащих лабораторий, о реестре которых к настоящему моменту сохранились лишь отрывочные данные. Результаты исследовательской работы по реконструкции исторических сведений показали, что около 90 % захороненных здесь РАО – это загрязненная бумага, ветошь, индивидуальные средства защиты, стекло, а также малогабаритная аппаратура из металла, упакованная в картонные коробки. Кроме того, согласно опросам очевидцев (бывших работников ЛАНЛ) сюда вывози-

лись материалы, загрязненные продуктами деления в ходе первого испытания атомной бомбы «Тринити». В 1948 году вследствие химической реакции на полигоне вспыхнул пожар, после чего его закрыли, территорию засыпали незагрязненным строительным мусором, а затем заасфальтировали. В ходе исследований, проведенных в 1998 году, в почве по периметру площадки на незаасфальтированной ее части было зафиксировано присутствие повышенных концентраций радионуклидов и металлов. Из семи пробуренных контрольных скважин в трех были обнаружены повышенные концентрации трития, ^{239}Pu , U и свинца, а характеристики местности обуславливали высокую вероятность проникновения загрязняющих веществ в грунтовые воды [83].

В рамках реабилитации и очистки зоны TA-21 была предусмотрена реализация трех основных проектов [85, 86, 87]:

- дезактивация и снос 24 зданий и сооружений;
- установка 16 скважин для мониторинга состояния грунтовых вод;
- извлечение отходов из полигона В.

В 2010 году в соответствии с положениями закона «О восстановлении и реинвестировании американской экономики» на реализацию этих проектов ЛАНЛ получила дополнительное финансирование в размере 211 млн долларов. Первый проект из перечисленных выше был полностью реализован уже к началу 2011 года. Общая площадь снесенных зданий составила 18 500 м².

К октябрю 2010 года были завершены работы по сооружению 16 мониторинговых скважин для наблюдения за концентрациями загрязняющих веществ в региональном водоносном горизонте. Средняя глубина заложения скважин составила около 300 м (самая глубокая скважина – около 440 м), что обусловило чрезвычайно высокие затраты на выполнение бурильных работ – затраты на сооружение каждой скважины оцениваются более чем в 2 млн долларов. Кроме того, в рамках проекта были проведены работы по закупорке и ликвидации шести старых скважин, использовавшихся еще с 1950 гг.

Реализация третьего проекта была завершена в сентябре 2011 года. В целях обеспечения безопасности производимых работ над полигоном В была установлена громадная металлическая конструкция, напоминающая авиационный ангар (рис.1.68).



Рис. 1.68. Ангар, сооруженный вокруг полигона В

Внутри этого сооружения был предусмотрен целый ряд средств для обеспечения безопасности при проведении работ, включая системы пожаротушения и пылеподавления, а также высокоэффективную систему фильтрационной очистки воздуха. Для наблюдения за ходом работ использовалась закрытая система промышленного телевидения. В общей сложности из полигона В было извлечено свыше 34 000 м³ ТРО и загрязненного грунта. Зоны выемки грунта были засыпаны чистой землей, а сама площадка переведена в безопасное состояние.

Техническая зона TA-54



Рис. 1.69. Вид сверху на полигон G (TA-54)

Полигон G для захоронения ТРУ РАО (рис. 1.69), расположенный в зоне TA-54, является одним из наиболее опасных объектов на территории Лос-Аламоса. ТРУ РАО стали поступать в этот пункт захоронения еще в начале 1970-х годов, когда Комиссия по атомной энергетике США утвердила требование к отдельному временному хранению транс-урановых и обычных радиоактивных отходов.

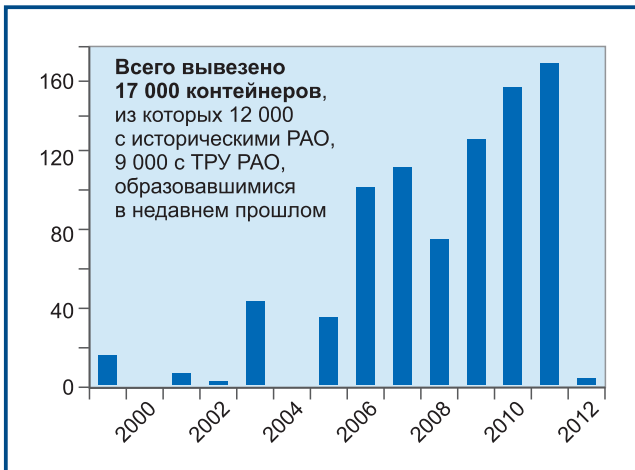


Рис. 1.70. Количество поставок ТРУ РАО в WIPP

К моменту открытия Опытной установки по изоляции трансураниевых РАО (WIPP) на территории полигона хранилось около 9 600 м³ ТРУ РАО. Транспортировка отходов в новый пункт захоронения ведется с момента его открытия, однако объемы поставок на протяжении первых семи лет были незначительными (рис. 1.70). Кроме того, полигон G все еще продолжает принимать на хранение вновь образующиеся в Лос-Аламосе ТРУ РАО. Так,

по состоянию на октябрь 2011 года суммарный объем ТРУ РАО, размещенных в данном пункте хранения, составил 6 935 м³ с суммарной активностью юри-эквивалента ²³⁹Pu (PE-Ci) 6,9·10¹⁵ Бк. Приблизительно одна треть от этого объема 2 399 м³ суммарной активностью PE-Ci (4,1·10² Бк) хранится в 200 шахтах и 35 прямоугольных траншеях, засыпанных землей, а еще 3 706 м³ горючих и диспергируемых ТРУ РАО размещено в бочках на поверхности [88, 89].

Темпы транспортировки ТРУ РАО в WIPP ускорились лишь во второй половине 2011 года после пожара, случившегося в этой местности в июне того же года. Тогда обрыв линии электропередач стал причиной лесного пожара, охватившего территорию общей площадью более 600 км², в том числе и некоторые участки технической зоны G. Несмотря на то, что непосредственной угрозы для пункта захоронения при пожаре не возникло, власти штата Нью-Мексико и DOE в срочном порядке подписали совместное рамочное соглашение об ускоренном вывозе с площадки и захоронении в WIPP 3 706 м³ ТРУ РАО, хранившихся на поверхности, а также других трансураниевых отходов, размещенных в приповерхностных могильниках.

Площадку планировалось полностью очистить от ТРУ РАО уже к 30 июня 2014 года. Свои коррективы в этот план внесли два инцидента, произошедшие в WIPP в 2014 году, из-за которых работа комплекса была временно приостановлена. Первый инцидент, связанный с возгоранием грузового транспортного средства, не привел к каким-либо радиологическим последствиям, а второй, сопровождавшийся выбросом радиоактивных веществ ниже установленного нормативного предела, был вызван экзотермической химической реакцией в одном из контейнеров с отходами, приведшей к крупному пожару.

Свою работу комплекс сможет возобновить не раньше конца 2016 года. Около 60 бочек с горючими диспергированными ТРУ РАО (383 м³) по-прежнему хранятся на территории полигона. Окончательное решение о том, какая именно технология закрытия будет реализована в отношении полигона G после удаления всех отходов, пока еще не принято. Наиболее перспективной специалисты считают концепцию многослойной засыпки полигона площадью 20,6 га несколькими слоями бетонитовой глины и дробленной горной породы толщиной 2,5 м. Всего на территории ЛАНЛ в различных установках и на полигонах размещено около 153 000 м³ РАО, опасных химических и смешанных отходов.

В 2016 году оператор площадки заключил новый контракт по реализации комплекса мероприятий по очистке территории ЛАНЛ стоимостью 1,7 млрд долларов (срок действия текущего контракта завершается в 2017 году). Сейчас идет согласование подробного плана работ на следующие 10 лет, но многие эксперты сходятся во мнении, что затраты на завершение программы по очистке территории ЛАНЛ могут составить более 4 млрд долларов [90].

Финансовое обеспечение работ

С момента начала проведения активных восстановительных мероприятий на территории ЛАНЛ в 2005 году среднегодовой размер финансового обеспечения, выделяемого на осуществление работ в данной области, варьировался от 115 до 225 млн долларов [85].

Согласно текущим планам объем годового финансирования, предусмотренного по 2018 год включительно, должен составить порядка 188,6 млн долларов (рис. 1.71). Эти средства планируется потратить на реализацию следующих мероприятий:

- исследования ареала загрязнения грунта на территории ЛАНЛ и мониторинг состояния грунтовых и поверхностных вод, реализация программ, направленных на минимизацию поверхностной эрозии (117,2 млн долларов);
- реабилитация территории 16 пунктов захоронения ТРО, выбор метода окончательного закрытия полигонов и проведение всех необходимых работ по окончательному закрытию исторических полигонов захоронения радиоактивных и химически

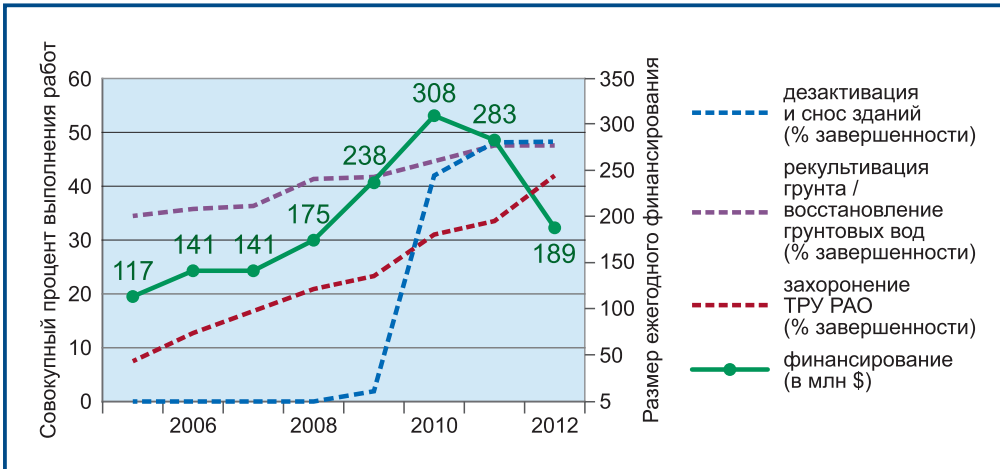


Рис. 1.71. Объем ежегодного финансового обеспечения восстановительных мероприятий в ЛАНЛ

опасных отходов (65 млн долларов);

- работы по выводу из эксплуатации установок и сносу зданий и сооружений (3 млн долларов).

Основным подрядчиком по выполнению работ на площадке является Los Alamos National Security (LANS), совместный проект компаний Bechtel и Babcock & Wilcox Technical Services, Калифорнийского университета и корпорации URS.

1.1.6. Ферналд



Рис. 1.72. Площадка Ферналд

Площадка Ферналд, также известная как Центр по производству ядерных сырьевых материалов (Feed Materials Production Center или FMPC), расположена в 30 км от города Цинцинати, штат Огайо (рис. 1.72).

История создания и ключевые объекты

В 1951 году Министерство энергетики США приобрело участок площадью 4,2 км² под строительство нескольких ядерных установок по переработке и производству продукции из высокочистого металлического урана – в частности, мишеней для ядерных реакторов Хэнфорда и Саванна Ривер, использовавшихся для наработки оружейного плутония [91].

Строительные работы на площадке стартовали в 1951 году и были полностью завершены в 1954 году. В итоге комплекс состоял из десяти установок по производству высокочистого урана, двадцати корпусов, где размещались административные офисы и лаборатории, а также нескольких зон для хранения РАО.

С 1952 по 1989 год в Ферналде было произведено около $2 \cdot 10^5$ тонн металлического урана. Наибольший объем годового производства пришелся на 1960 год – более 10 000 тонн металлического урана за год. Согласно оценкам, за все время эксплуатации установки Ферналда произвели порядка $6,8 \cdot 10^5$ тонн РАО [92].

Исторические практики обращения с РАО и загрязнение окружающей среды

Спецификой РАО в Ферналде являлась высокая концентрация урана, тория и радия, обусловленная высокой концентрацией урана в богатой перерабатываемой урановой руде, поставляемой из Бельгийского Конго.

Отходы с содержанием радия и тория хранились в трех бункерах, причем в первых двух активности радионуклидов примерно одинаковы, а в третьем несколько ниже.

Накопленные активности основных долгоживущих радионуклидов от хвостов производства урана приведены в табл. 1.30 [93, 94].

Табл. 1.30. Накопленные активности радионуклидов в бункерах Ферналда

Радионуклиды	Активность, Бк	
	1, 2 бункеры	3 бункер
²¹⁰ Рb	$6,6 \cdot 10^{13}$	$1,48 \cdot 10$
²²⁶	$1,36 \cdot 10^{14}$	$9,6 \cdot 10^{-2}$
²³⁰	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{13}$
	$7,4 \cdot 10^{13}$	$7,4 \cdot 10^{13}$

Следует отметить, что удельные концентрации указанных радионуклидов в отходах выше в 130 раз в первом бункере, в 72 раза во втором и в 6 раз в третьем по сравнению с аналогичной, рассчитанной при концентрации урана в руде 0,2 %, что требует особого обращения с такими РАО.

За годы работы завода почва, подземные и поверхностные воды на площадке подверглись значительному загрязнению радиоактивными элементами (уран, радий, технеций и торий), а также неорганическими (мышьяк, бериллий, кадмий, никель, свинец) и органическими веществами.

В 1980-е годы повышенные уровни загрязнения подземных вод были обнаружены при отборе проб из скважин и колодцев, расположенных неподалеку от площадки, откуда местные жители брали питьевую воду, а произошедшая в 1984–1985 годах серия инцидентов на производстве лишь способствовала привлечению внимания общественности к проблеме радиоактивного загрязнения в Ферналде и вызвала широкий резонанс в СМИ. С каждым годом все чаще и чаще звучали призывы к закрытию производства и проведению работ по реабилитации [95].

В 1986 году штат Огайо подал иск против Министерства энергетики о нарушении ряда положений нормативно-правовых актов, повлекших за собой нанесение ущерба окружающей среде. В том же году между DOE и Агентством по охране окружающей среды США было заключено Соглашение, инициировавшее проведение исследований по оценке ущерба, нанесенного окружающей среде в результате работы завода.

Мероприятия по реабилитации территории Ферналда

Геополитические изменения, ознаменовавшие окончание холодной войны, привели к закрытию ряда заводов по производству урана в США, в том числе и в Ферналде, после чего под эгидой Министерства энергетики США и Агентства по защите окружающей среды была инициирована программа по реабилитации и восстановлению качества окружающей среды. Для привлечения заинтересованных сторон к участию в процессе принятия решений по данной программе Министерство энергетики сформировало специальную рабочую группу, состоявшую из представителей местных органов власти и профсоюзов, местных жителей, работников завода Ферналд. Рабочая группа предоставила свои рекомендации о целесообразных по мнению ее членов уровнях очистки территории, стратегиях захоронения отходов, а также конечной категории землепользования [96].

С целью проведения исследований и ТЭО в 1988 году Министерство энергетики подготовило рабочий план, разбив всю территорию предприятия на 39 участков. По результатам данного исследования в 1989 году ЕРА включил Ферналд в перечень приоритетных площадок для проведения работ по реабилитации, финансируемых за счет программы Superfund (Федеральная государственная программа по очистке территорий, подвергшихся загрязнению химическими и иными опасными веществами).

Следует отметить, что Ферналд является одной из трех крупных площадок DOE, где к настоящему времени уже полностью завершены все работы по очистке территории, результатом выполнения которых стала возможность создания национального заповедника на территории бывшего ядерного комплекса. Более подробная информация о проведенных работах и их организации представлена в разделе § 1.4.

1.1.7. Роки-Флэтс

В течение почти 40 лет завод Роки-Флэтс, расположенный в 25 км к северо-западу от города Денвер (штат Колорадо), оставался одним из самых секретных и охраняемых военных объектов США.

История создания и ключевые объекты

Строительство завода по производству компонентов ядерного оружия, детонаторов для ядерных боеголовок на основе плутония и высокообогащенного урана началось в 1951 году, а всего через год несколько установок уже было введено в эксплуатацию. К 1957 году на территории площадки было размещено 27 установок, где производились различные манипуляции с радиоактивными веществами.

Затраты на проведение строительных работ составили порядка 65 млн долларов. Всего на площади 1,1 км² было размещено более 800 зданий и сооружений, окруженных буферной зоной площадью 24,3 км².

С 1952 по 1989 год в Роки-Флэтс было изготовлено более 7000 триггеров. Помимо плутониевых детонаторов в Роки-Флэтс также выполнялись работы по демонтажу отработавших сердечников – плутоний и высокообогащенный уран извлекали с целью их повторного использования в производстве компонентов ядерного оружия [92, 95, 96].



Рис. 1.73. Роки-Флэтс (а – вид на Скалистые горы, б – комплекс Роки-Флэтс, на заднем плане город Денвер, расположенный всего в 25 км)

Исторические практики обращения с РАО и загрязнение окружающей среды

Производственные операции на установках Роки-Флэтс, в том числе работы по обращению с РАО, неминуемо привели к значительному загрязнению почвы, воздуха, грунтовых и поверхностных вод, а также донных отложений опасными химическими и радиоактивными веществами.

Сбросы и выбросы РАО

Наибольший вклад в загрязнение данной территории внесла не производственная деятельность на площадке, а целая серия пожаров на ядерных установках комплекса.

Первый крупный пожар произошел 11 сентября 1957 года в перчаточном боксе здания 771, где изготавливались плутониевые триггеры. Изначально здание позиционировалось конструкторами как обладающее повышенной огнестойкостью. По прибытии пожарные, пытаясь сбить пламя, включили вентиляторы, однако это лишь усугубило ситуацию – огонь с удвоенной силой продолжил распространяться и охватывал все новые партии плутония. Попытка тушения пожара распылением двуокиси углерода также оказалась неудачной. Затем произошло воспламенение бумажных фильтров вентиляционной системы, предназначенной для улавливания частиц плутония, в результате чего над 45-метровой отводной трубой здания на высоте 25–50 м повисло облако черного дыма [92, 97–99].

Несмотря на распыление двуокиси углерода, пожар продолжал бушевать. Единственным выходом в сложившейся ситуации могло стать тушение водой, хотя это и привело бы к порче сложного оборудования стоимостью сотни тысяч долларов. Кроме того, интенсивное тепловыделение могло привести к образованию пара и взрыву, при котором еще большие концентрации плутония могли бы попасть в окружающую среду. Однако другого выхода не было. Тушение водой оказалось эффективным, и пожар был потушен спустя 13 часов с момента возникновения [97, 98].

На тот момент в Роки-Флэтс не было оборудования, способного оценить количество радиоактивных веществ, выброшенных в атмосферу в результате пожара. Такое оборудование было доставлено на площадку лишь спустя неделю. Первые же замеры показали превышение допустимого уровня излучения в 16 000 раз. Согласно оценкам в пожаре сгорело от 14 до 20 кг радиоактивного материала. Кроме того, было установлено, что фильтры вентиляционной системы в здании 771 не менялись с момента ввода установки в эксплуатацию (т. е. в течение 4 лет), что также способствовало поступлению дополнительных количеств плутония в атмосферу. Согласно более поздним оценкам, в результате пожара 1957 года в атмосферный воздух было выброшено около $4,1 \cdot 10^{-13}$ Бк суммарной активности плутония, частицы которого вместе с дымом от пожара были отнесены на большое расстояние и достигли спальных районов Денвера. Повышенные концентрации этого радионуклида обнаруживались в радиусе 50 км от завода [97, 98].

На следующий день после пожара сообщения об аварии в Роки-Флэтс оказались на первых полосах денверских газет. Однако администрация завода заверила местных жителей в том, что выброса опасных концентраций радиоактивных веществ в результате пожара не произошло. Вскоре шумиха в прессе утихла, и жители города забыли о случившемся. Несмотря на то, что постройки, расположенные вблизи здания 771, оказались загрязненными, производственные операции на площадке были возобновлены уже спустя несколько дней после пожара [98].

Всего за годы работы завода с 1954 по 1971 год в Роки-Флэтс произошло свыше 600 пожаров, из них 384 на установках, где выполнялись манипуляции с плутонием.

Самым серьезным стал пожар, возникший в 14:00 11 мая 1969 года на установке по переработке плутония (здание 776/777) [92]. Как и в первом случае, пожар вспыхнул в перчаточном отделении в результате спонтанного воспламенения ветоши, после того

как рабочие по недосмотру оставили в камере плитку плутония. Несмотря на рекомендации, озвученные экспертами после расследования причин пожара 1957 года, системы автоматического пожаротушения в зданиях, где выполнялись манипуляции с плутонием, так и не были установлены. Благодаря усилиям спасательной бригады к 18:40 пожар удалось локализовать, а к 20:00 – полностью потушить. Всё же последствия аварии оказались не столь серьезными как в 1957 году. Отчасти это можно объяснить заменой бумажных фильтров вентиляционных систем на НЕРА-фильтры, изготовленные из негорючего материала – фибергласа. Однако если бы пожарные не смогли предотвратить обрушения кровли, то последствия этого пожара оказались бы куда серьезней. Ведь на тот момент в зоне хранения здания 776/777 находилось около 1 400 кг плутония, а в общей сложности в здании было размещено около 3 400 кг плутония. В результате аварии 1969 года в атмосферу было выброшено всего около $(4,8-23) \cdot 10^9$ Бк плутония, но пожар привел к значительному загрязнению самого здания. Произвести его дезактивацию до уровней загрязнения плутонием, обнаруживаемых до пожара, было невозможно, поэтому после нескольких неудачных попыток некоторые помещения были опечатаны (поверхности внутри здания были покрыты краской, зафиксировавшей остаточное загрязнение). Спустя год выполнение производственных операций в здании 776/777 продолжилось. В частности, здесь велись работы по демонтажу триггеров и сердечников, возвращенных в Роки-Флэтс, восстановлению плутония, обращению с отходами, а также проводились различные лабораторные исследования.

Пожар 1969 года снова привлек внимание общественности и жителей Денвера к Роки-Флэтс. Однако и на этот раз официальные власти заявили, что значительного выброса радиоактивных веществ, способного оказать негативное воздействие на здоровье населения, не произошло. Между тем ущерб от пожара был оценен на уровне 45 млн долларов. К этой сумме также следует добавить еще 22 млн долларов – стоимость утраченного в результате пожара плутония [92].

После пожара 1969 года независимая группа ученых провела специальное исследование по установлению концентраций радиоактивных веществ за пределами санитарно-защитной зоны предприятия, результаты которых показали, что уровни радиации здесь в 400–1500 раз превышали значения естественного радиационного фона. После публикации результатов этого исследования Комиссия по атомной энергетике США провела собственное расследование, результаты которого подтвердили присутствие повышенных концентраций плутония в радиусе 50 км от предприятия. Властям пришлось признать тот факт, что проблема радиоактивного загрязнения территорий вне санитарно-защитной зоны предприятия все-таки существует, хотя впоследствии оказалось, что большая часть радиоактивных веществ поступила в окружающую среду вовсе не в результате пожара 1969 года. Было установлено, что основным источником загрязнения стала авария 1957 года, а также продолжавшаяся в течение 11 лет утечка радиоактивных материалов в почву и грунтовые воды с полигона 903.

ЖРО и ядерные материалы в пунктах хранения

На полигоне 903 с 1958 по 1969 год на открытом воздухе хранилось более 3 500 бочек с жидкими НАО, состоявшими из отработанной машинной смазки и хлорсодержащих растворителей, загрязненных плутонием. Негерметичность бочек приводила к утечке ЖРО (рис. 1.74). Утечка радиоактивных веществ из бочек, хранившихся на этом полигоне, началась еще в 1958 году, а по некоторым оценкам возможно даже еще в 1955 году. В состав РАО входили разнообразные опасные вещества, в том числе берил-



Рис. 1.74. Протекающие бочки с НАО на полигоне 903

лий, растворители и уран, а также масла, содержащие ^{239}Pu и ^{240}Pu . Утечка была обнаружена лишь в 1959 году. Тогда пытались предотвратить дальнейшую деградацию, в бочки была введена антикоррозионная присадка.

Несколько тысяч литров загрязненных плутонием и ураном смазочных материалов просочилось в почву с полигона 903.

В грунтовых водах Роки-Флэтс обнаруживались повышенные концентрации бериллия и трития. Среди наиболее распространенных веществ, обуславливающих загрязнение территории, были выявлены ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Am , U, тетрахлорметан, тетрахлорэтен, трихлорэтан, нитраты и хром [100, 101] (рис.1.75).

Помимо загрязнения почвы утечка приводила к ветровому уносу радио-

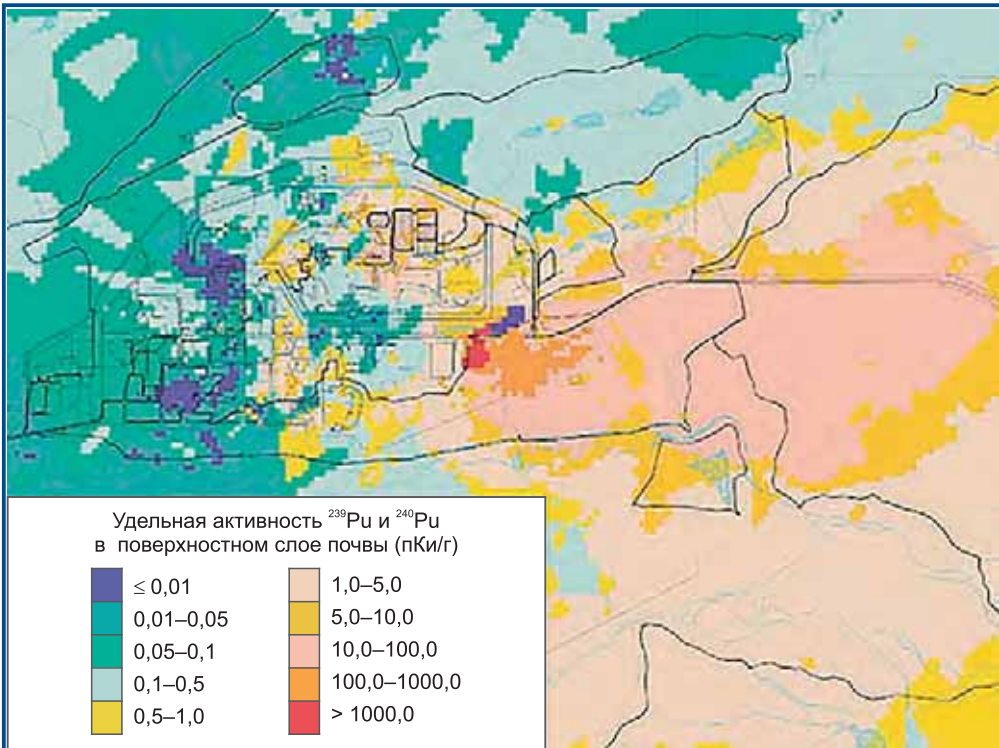


Рис. 1.75. Уровни загрязнения ^{239}Pu и ^{240}Pu на территории производственной площадки и в санитарно-защитной зоне Роки-Флэтс

активных веществ, в результате которого загрязненными оказались и прилегающие к полигону территории. Впервые об утечке администрации завода стало известно в 1959 году, общественность узнала об этом лишь спустя десять лет.

Еще одним источником загрязнения окружающей среды плутонием стала уникальная установка по сжиганию загрязненных плутонием отходов, не имеющая аналогов в мире [99] и введенная в эксплуатацию еще в 1958 году.

Мероприятия по реабилитации территории Роки-Флэтс

В 1992 году завод Роки-Флэтс был окончательно закрыт [99]. Производственная площадка и санитарно-защитная зона предприятия были включены в перечень приоритетных площадок ЕРА для проведения работ по реабилитации, финансируемых за счет программы Superfund. С этого момента основная задача Министерства энергетики состояла в разработке и реализации программы по очистке загрязненной территории и приведении площадки в безопасное состояние.

Подробная информация о проведении работ по очистке площадки комплекса Роки-Флэтс и создании на его территории национального заповедника представлена в [102–105] и в разделе 1.4.3 § 1.4.

1.1.8. Маунт Сайт



Рис. 1.76. Вид площадки комплекса Маунд Сайт

Маунд Сайт – одна из бывших площадок ядерного оружейного комплекса США, расположенная в Майамизбурге, в 16 км к югу от города Дейтон, штат Огайо. После окончания Второй мировой войны завод Маунд стал одним из первых и самых известных центров по разработке ядерно-оружейных технологий.

История создания и загрязнения окружающей среды

Строительные работы на площадке начались в 1946 году, а с 1948 года в Маунд Сайт проводились комплексные ядерные исследования: здесь велась разработка и производство компонентов ядерного оружия, а также реализовывались проекты в рамках различных военных и энергетических программ Министерства энергетики США (табл. 1.31).

Табл. 1.31. Основные направления работ, реализовывавшихся в Маунд Сайт

Годы	Виды деятельности
1946	Начало строительных работ на площадке (0,7 км ²)
1948–1950	Изучение химических и металлургических свойств ²¹⁰ Po и областей его применения, в частности, при изготовлении нейтронных и альфа-источников
1950–1963	Исследования химических свойств и областей применения урана, протактиния-231 и плутония-239 в рамках национальной программы по разработке технологий для гражданских энергетических реакторов
1954	Сепарация стабильных изотопов
Середина 1950-х	Разработка производственного процесса по восстановлению тория. Завод принял на переработку 1 650 тонн шлама, содержащего торий. Проект был закрыт еще до начала полномасштабного тестирования производственного процесса. Однако в виду повышенной коррозионной агрессивности шлам пришлось многократно переупаковывать и перемещать по территории площадки, что привело к загрязнению нескольких участков торием.
	НИОКР по ²³⁸ Pu
1960–1970	²³⁸ Pu перерабатывается для получения тепловых источников, используемых в радиоизотопных теплогенераторах
1979	Прекращение всех манипуляций с неинкапсулированным ²³⁸ Pu

Одним из основных направлений деятельности Маунд Сайт стало содействие реализации американской ядерной программы – производство неядерных тритий-содержащих компонентов ядерного оружия (их сборка осуществлялась уже на других площадках ядерного оружейного комплекса США), а также триггеров на основе смеси полония и бериллия, использовавшихся при изготовлении первых ядерных боеголовок. Кроме того, в Маунд Сайт также производилась сепарация и очистка стабильных изотопов благородных газов, проводились исследования в области использования солнечной энергии и ископаемого топлива, ядерных гарантий, обращения с отходами, испытания тепловых источников (плутоний) и термоядерного горючего [106].

Одним из наиболее трудоемких проектов по реабилитации территории Маунд Сайт стала очистка канала Майами-Эри (OU4), в донных отложениях которого были обнаружены повышенные концентрации ²³⁸U. Причиной загрязнения Майами-Эри стала авария на линии по обработке плутония, произошедшая в 1969 году. В результате проливного дождя загрязняющие вещества, выброшенные из установки, были смыты в канал по склону холма.

В 1984 году была инициирована программа по восстановлению окружающей среды в Маунд Сайт. Первоочередной задачей стал сбор и анализ данных о состоянии окружающей среды, что позволило оценить уровни загрязнения, определить потенциальные пути облуче-

ния человека и компонентов окружающей среды и разработать концептуальную модель площадки. Комплексная химическая и радионуклидная характеристика позволила установить, что в результате производственной деятельности загрязнению подверглись почва, грунтовые и поверхностные воды, а также здания и сооружения (табл. 1.32).

Табл. 1.32. Загрязняющие вещества на площадке Маунд Сайт

Компонент ОС, подвергшийся загрязнению	Причины загрязнения	Обнаруживаемые загрязняющие вещества
Загрязненная почва	Радиоактивные отходы передавались на переработку и хранение посредством системы подземных трубопроводов	Плутоний, торий, тетра-хлорэтан, трихлорэтан, 1, 2-трансдихлорэтан
Грунтовые воды	Водоносный горизонт Бэрид Вэлли, являющийся единственным источником питьевой воды для жителей г. Майамизбург, был загрязнен в результате утечки летучих органических соединений	Тетрахлорэтан, трихлорэтан, 1, 2-трансдихлорэтан

В почве были обнаружены такие загрязняющие вещества как нефтяные углеводороды, полиядерные ароматические углеводороды и хлорированные растворители (например, трихлорэтан), а также ^{238}Pu , ^{230}Th , ^{60}Co , ^{137}Cs , ^3H , ^{227}Ac , ^{241}Am , ^{207}Bi и ^{210}Bi в концентрациях выше значений естественного радиационного фона. Кроме того, на некоторых участках присутствовал металлический обедненный уран.

Химическое загрязнение грунтовых вод было в основном обусловлено хлорированными растворителями и продуктами их распада, например, поливинилхлоридом. Также в воде присутствовали металлы (хром, никель и кадмий) в концентрациях выше предельных значений, установленных в соответствии с нормами качества питьевой воды. Между тем концентрации трития в грунтовых водах лишь незначительно превышали предельно допустимые концентрации, хотя в поверхностных водных объектах его концентрации были значительно выше. Также в поверхностных водах был обнаружен ^{238}Pu .

В ходе проведения работ в Маунд Сайт было отобрано порядка 200 000 проб почвы, воды и воздуха, которые позволили установить многочисленные химически и радиоактивно загрязненные участки.

Большинство зданий и сооружений на площадке подверглось химическому загрязнению, и лишь некоторые – радиоактивному. Нерадиологическую опасность этих зданий и сооружений обуславливали входящие в их состав конструкционные элементы из свинца и асбеста, а также использование краски на основе свинца.

Таким образом, уровни загрязнения Маунд Сайт не были столь уж значительными по сравнению с другими площадками ЯОК США. Однако предприятие находилось в непосредственной близости от водоносного горизонта, являющегося единственным источником питьевой воды в этом регионе, что стало основной причиной его включения в 1989 году в перечень приоритетных площадок Агентства по защите окружающей среды для проведения работ по реабилитации. В том же году с окончанием холодной войны Министерство энергетики приняло решение о перестройке производственных мощностей, что привело к закрытию завода в 1993 году.

§ 1.2. Природоохранное законодательство США

К середине 60-х годов в мире сформировалось понимание, что без соответствующих мер по защите окружающей среды от всё возрастающего антропогенного воздействия существующему состоянию биосферы могут угрожать катастрофические последствия. Причинами этого могут служить неконтролируемые выбросы химических загрязняющих веществ, отходы различных производств, хозяйственно-бытовые отходы, радионуклидное загрязнение и т. д. Возникла потребность нормативного регулирования в области защиты окружающей среды, выразившаяся в разных странах мира, в том числе и в США, в совершенствовании законодательства, обеспечивающего экологическую безопасность.

1.2.1. Закон о национальной политике в области охраны окружающей среды и функции ЕРА

В США современная система нормативного регулирования в области защиты окружающей среды начала складываться в середине 1960-х гг. В 1965 году в силу вступил Закон о захоронении твердых отходов (Solid Waste Disposal Act), содержащий требования относительно обеспечения безопасности окружающей среды при осуществлении захоронения хозяйственно-бытовых и промышленных отходов [107]. За ним последовало принятие Закона о национальной политике в области охраны окружающей среды (National Environmental Policy Act, NEPA) 1969 года, определившего зоны ответственности государственных органов в области охраны окружающей среды, тем самым запустив целый ряд ведомственных преобразований в системе государственного управления экологической безопасностью и инициировав системную модернизацию экологической политики США.

К числу таких кардинальных преобразований, прежде всего, следует отнести учреждение в 1969 году Совета по качеству природной среды при Администрации Президента США, на который была возложена ответственность за координацию деятельности по проведению национальной экологической политики, осуществляемой министерствами и федеральными ведомствами США. Председатель Совета назначается Президентом страны и является его главным советником по экологической политике. В функции Совета также входит подготовка ежегодного доклада Президенту, содержащего наиболее полную и исчерпывающую информацию о деятельности всех федеральных служб по исполнению положений законодательных актов и постановлений Правительства в области рационального природопользования и охраны окружающей среды.

Еще одним значимым событием, связанным с принятием Закона о национальной политике в области охраны окружающей среды, стало появление принципиально новой для мировой практики концепции – концепции «оценки воздействия на окружающую среду». Так, впервые в истории на законодательном уровне были закреплены требования к оценке воздействия планируемой деятельности на окружающую среду и организации природоохранительной деятельности, что оказало огромное влияние на развитие правового регулирования охраны природы во многих странах мира.

Что касается ведомственных преобразований, то закон 1969 года также предусматривал создание нового регулирующего органа – в соответствии с его положениями в 1970 году было учреждено Агентство по защите окружающей среды (Environmental

Protection Agency, EPA), объединившее разрозненные до того времени управленческие структуры и функции, в той или иной мере имеющие отношение к экологическому управлению, что открыло федеральному правительству возможности для проведения согласованной политики и координации деятельности по очистке загрязненных территорий и восстановлению качества окружающей среды.

В настоящее время в штаб-квартире EPA в Вашингтоне и 10 его региональных отделениях работает более 18 тыс. сотрудников. Деятельность агентства включает пять основных направлений:

- Осуществление регулирующих и контролирующих функций, в том числе EPA при необходимости выступает инициатором и разработчиком поправок к законодательным актам в области охраны окружающей среды. Предложения EPA сначала поступают в Администрацию Президента, откуда их направляют для дальнейшего обсуждения в Конгресс США. В случае принятий поправок Конгрессом, EPA контролирует их исполнение, используя соответствующие правовые рычаги.

- Предоставление финансовой поддержки через систему грантов на реализацию национальных и региональных экологических программ и проектов. На эти цели расходуется от 40 до 50 % бюджета EPA.

- Благодаря сети лабораторий, охватывающей всю территорию США, EPA собирает данные об экологической обстановке в различных регионах страны и на их основе определяет превентивные и оперативные меры по решению выявленных экологических проблем.

- В рамках программ партнерства по предотвращению выбросов в окружающую среду и сохранению природных ресурсов (всего более 40 крупных программ) EPA сотрудничает с несколькими тысячами промышленных предприятий, организациями, правительствами штатов и муниципальными властями. В частности, такое сотрудничество направлено на решение проблем, связанных с рациональным использованием водных ресурсов и энергии, сведением к минимуму выбросов парниковых газов, повторным использованием твердых отходов и т. п.

- EPA разрабатывает и внедряет образовательные программы для рядовых граждан, задача которых заключается в формировании у населения основ экологической культуры и рационального природопользования.

В контексте обращения с радиоактивными отходами и реабилитации радиоактивно загрязненных территорий, EPA устанавливает общие экологические нормы, обеспечивающие защиту окружающей среды от воздействия опасных токсичных и радиоактивных веществ. Также EPA занимается разработкой законодательных требований в отношении деятельности по реабилитации действующих и недействующих урановых рудников и хвостохранилищ, норм обеспечения безопасности окружающей среды на предприятиях ЯТЦ, норм радиационной защиты окружающей среды при обращении с ОЯТ, ВАО и ТРУ РАО, а также их захоронении. В рамках Закона о чистом воздухе EPA были установлены пределы по выбросам радионуклидов в воздух с площадок DOE.

EPA осуществляет следующие регулирующие функции в отношении деятельности по обращению с радиоактивными отходами [107]:

- разрабатывает общие руководящие требования по радиационной защите;

- устанавливает предельные значения выбросов радионуклидов в воздух;
- устанавливает нормы качества питьевой воды в рамках Закона о безопасности питьевой воды, в том числе нормы содержания радиоактивных веществ в коммунальных системах водоснабжения;
- согласовывает и координирует деятельность с агентствами по защите окружающей среды в штатах США в целях защиты окружающей среды, здоровья населения и персонала от воздействия радиоактивных материалов природного происхождения, поднятых на поверхность земли или концентрированных в ходе их обработки и переработки;
- координирует деятельность с DOE, NRC и властями штатов в отношении безхозных ИИИ, переработанных материалов; также EPA осуществляет контроль над экспортом и импортом радиоактивно загрязненного металлолома в целях предотвращения его нелегального ввоза на территорию США.

Управление EPA по твердым отходам и аварийному реагированию (Office of Solid Waste and Emergency Response) обеспечивает реализацию национальной политики США в области аварийного реагирования и обращения с отходами, предоставляя свои руководящие указания и рекомендации организациям и местным органам власти. Управление разрабатывает руководящие принципы в отношении поверхностного захоронения опасных отходов и в подземных резервуарных хранилищах.

Специалисты Управления оказывают техническую поддержку государственным органам власти в целях обеспечения безопасности при обращении с отходами. В частности, данное Управление руководит реализацией целого ряда масштабных государственных экологических программ, например, программой Браунфилдс, в рамках которой властям на уровне штата или округа оказывается поддержка по организации работ, направленных на репрофилирование и повторное использование потенциально загрязненных площадок. Еще одним ярким примером такой деятельности является проведение реабилитационных работ в рамках программы Суперфонда, призванной решить проблему загрязнения брошенных и действующих площадок, содержащих опасные отходы или загрязненных вследствие утечки или выброса опасных веществ. Еще одним направлением деятельности управления является содействие внедрению инновационных технологий по очистке загрязненной почвы и грунтовых вод.

1.2.2. Закон о восстановлении и сохранении ресурсов

Вслед за Законом о национальной политике в области охраны окружающей среды 1969 года Конгрессом был принят целый ряд основополагающих законов [107]:

- Закон о чистом воздухе (1970 год), утвердивший национальные стандарты качества атмосферного воздуха и определивший предельные концентрации для семи основных загрязняющих веществ, содержащихся в выбросах стационарных и нестационарных установок: взвешенные твердые частицы, оксиды серы, оксид углерода, оксиды азота, оксиды озона, углеводороды и свинец.
- Закон о защите моря, исследованиях и заповедниках (1972 год), известный также как Закон о захоронении отходов в океане, наложивший запрет на сброс в океан материалов, способных повлечь за собой «неоправданное ухудшение состояния окружающей среды или обуславливающих угрозу для здоровья человека и морской биоты»;

- в 1977 году в Закон о контроле над загрязнением вод от 1948 года (с поправками от 1965 и 1972 гг.) были внесены изменения, а сам он был переименован в Закон о чистой воде, а в 1974 году был принят еще один закон – Закон о безопасности питьевой воды. Эти законы позволили скоординировать работу множества правительственных и неправительственных организаций США на трех уровнях власти – на федеральном и региональном, а также на уровне штатов.

Наконец, в 1976 году Конгресс США принял Закон о сохранении и восстановлении ресурсов (Resource Conservation and Recovery Act, RCRA), утвердивший комплексную основу для разработки национальной системы по обращению с опасными отходами, строящейся на принципах рационального использования природных ресурсов. В RCRA, принятом как поправка к Закону о захоронении твердых отходов от 1965 года, содержались положения, касающиеся вопросов обращения с твердыми отходами – как с опасными, так и неопасными, на действующих предприятиях. При этом под опасными отходами понимались твердые отходы, «представляющие существенную реальную или потенциальную опасность для здоровья человека и окружающей среды» [108].

Вообще установление федерального контроля над опасными отходами ознаменовало принципиально новый подход к распределению зон ответственности между федеральными и местными властями. До принятия закона вопросами обращения с твердыми отходами занимались исключительно власти штатов, которые, в свою очередь, делегировали полномочия по обращению с ними муниципальным или окружным властям. Для создания общенациональной системы обращения с отходами RCRA предусматривал реализацию целого ряда программ, направленных на [108]:

- определение того, какие именно отходы следует считать опасными;
- утверждение уведомительной процедуры для производителей отходов;
- дополнение уже существующих требований к транспортировке отходов (например, требование к наличию определенных транспортных документов у перевозчика, оператора установки по переработке отходов и пункта их конечного назначения);
- разработку технических требований в отношении установок для обработки, хранения и захоронения отходов;
- утверждение программы мониторинга грунтовых вод;
- создание условий для реализации программы корректирующих мероприятий на установках по обращению с твердыми отходами, где уже произошел выброс загрязняющих веществ, существует его реальная угроза или он неизбежен.

В результате ЕРА составило полный перечень материалов, которые следует относить к категории опасных отходов, содержащих вещества, способные оказывать доказанное токсическое, канцерогенное, мутагенное либо тератогенное воздействие на человека и другие живые организмы. В соответствии с поправками к закону от 1980 года, к опасным отходам следует относить [109]:

- вторичные отходы, полученные в результате переработки отходов, изначально отнесенных к категории опасных;
- твердые отходы, изначально не являющиеся опасными, но смешанные с опасными отходами;

- материалы, обладающие отдельными отличительными характеристиками, которые присущи опасным отходам (воспламеняемость, коррозионная агрессивность, радиоактивность и токсичность).

По сути, в рамках особой федеральной программы, предусмотренной RCRA, EPA были предоставлены полномочия по контролю над опасными отходами на всех этапах жизненного цикла, включая этапы их образования, транспортировки, обработки, хранения и окончательного захоронения.

Во исполнение данных требований EPA:

- проводит так называемые Инспекции по оценке соответствия, в ходе которых сотрудники EPA оценивают степень выполнения требований федерального законодательства при осуществлении деятельности по обращению с опасными отходами, а также положений отдельных норм, стандартов и утвержденных методик безопасного ведения работ;
- при выявлении нарушений в области обращения с опасными отходами в сотрудничестве с государственными ведомствами и Министерством юстиции EPA обеспечивает принудительное исполнение законодательных требований;
- оказывает поддержку ведомственным учреждениям (на уровне штата или округа) в разработке и управлении программами по обращению с отходами.

В целом положения RCRA регулируют все вопросы, касающиеся обращения с опасными отходами.

Во-первых, в законе прописаны критерии, используемые для отнесения твердых отходов к категории опасных, а также содержатся требования, применяемые к категориям лиц, осуществляющим обращение с такими отходами: операторам установок по обработке отходов, а также установок по их хранению и захоронению (сокращенно TSDF).

Во-вторых, закон утверждает технические нормы проектирования и безопасной эксплуатации таких установок, разработанные в целях минимизации выбросов опасных веществ в окружающую среду. И наконец, законодательные требования к операторам установок (TSDF) служат основой для составления и выдачи разрешений на эксплуатацию каждой такой установки.

Кроме того, RCRA заложил основы для обращения с неопасными твердыми отходами, а поправки к закону от 1986 года также дали полномочия EPA по решению экологических проблем, связанных с подземным резервуарным хранением нефти и других опасных веществ.

Еще две важные поправки, принятые к закону, касались запрета на захоронение переработанных отходов и осуществления работ по очистке загрязненных территорий. Так, к 1984 году на поверхностных полигонах ежегодно захоранивалось порядка 25 млн тонн опасных отходов [110]. В так называемых Поправках по опасным и твердым отходам, принятых в целях обеспечения защиты грунтовых вод и почвы в 1984 году, были установлены требования к предварительной обработке отходов перед их захоронением на поверхности земли.

Таким образом, все опасные отходы подлежали предварительной химической или физической обработке в целях снижения токсичности и мобильности содержащихся в них веществ.

В рамках Программы по ограничению поверхностного захоронения отходов (Land Disposal Restrictions Programme, LDR), реализовывавшейся в 1986–1998 гг., были установлены нормы обработки отходов, описывающие соответствующие методики и целевые показатели обработки для всех типов опасных отходов. Работа над этими стандартами продолжается и по сей день – они дополняются по мере совершенствования технологий и методик обработки отходов, а также появления новых видов опасных отходов.

Таким образом, программа LDR стимулирует предприятия и организации осуществлять деятельность, направленную на сведение к минимуму объемов образования опасных отходов. Причем благодаря этой программе уже за первые десять лет удалось добиться значительного прогресса в этой области. Так, в 1980 году около 50 000 предприятий и организаций производили в результате своей деятельности опасные отходы, и порядка 30 000 организаций предоставляло услуги по обработке, хранению и захоронению таких отходов. В 1999 году количество предприятий, являющихся источниками образования опасных отходов, сократилось до 20 000, а организаций, занимающихся их обработкой, хранением и захоронением, снизилось до 2 000. Существенно сократился и объем отходов, направляемых на полигоны поверхностного захоронения, – с 3 000 000 тонн до 1 200 000 тонн [110].

Вторая часть поправок 1984 года касалась программ по очистке загрязненных территорий – так называемой программы Корректирующих действий (Corrective Action Program). В 1980 году около 60 000 предприятий и организаций уведомили EPA об осуществлении деятельности по обработке, хранению и захоронению опасных отходов [110]. При этом на многих из них применялись устаревшие методики и технологии, ставшие причиной загрязнения не только промышленных площадок, но и прилегающих к ним территорий. Были выявлены десятки тысяч объектов, требующих проведения работ по очистке территорий и восстановлению качества окружающей среды. К таким объектам относятся действующие и закрытые химические, нефтеперерабатывающие, свинцово-плавильные, сталелитейные заводы, полигоны захоронения твердых отходов и т. п., загрязнение производственных площадок которых преимущественно обусловлено такими веществами как мышьяк, бензол, кадмий, свинец, ртуть, соли хлорной кислоты, полихлорированные бифенилы, полициклические ароматические углеводороды, тетрахлорэтилен и трихлорэтилен [111].

Общая площадь загрязненных объектов, располагающихся в 50 штатах США и на четырех территориях, подконтрольных США, составляет более 7 млн га. При этом согласно результатам исследований 2000 года, около 35 млн человек (т. е. 12% населения США) проживает в радиусе 1,5 км от территорий, подлежащих реабилитации в рамках программы Корректирующих действий.

Таким образом, данная программа выступает залогом обязательного проведения работ по очистке таких площадок, а EPA совместно с регулирующими органами штатов работает с операторами установок и местными жителями в целях разработки оптимальных проектов по реализации соответствующих мероприятий на основании данных о характере загрязнения и особенностях геологического строения той или иной площадки, а также планов по ее дальнейшему использованию. На сегодняшний день в Программе предусмотрено проведение работ на более чем 4 000 загрязненных площадках [110].

В 1984 году во исполнение поправок, внесенных в RCRA, была инициирована еще одна масштабная программа по очистке территорий – программа по очистке площа-

док подземных резервуарных хранилищ бензина, нефти и других опасных химических веществ, используемых в промышленных, бытовых или иных хозяйственных целях. Программа направлена на предупреждение утечек из таких хранилищ, их своевременное обнаружение и устранение, а также очистку уже загрязненных в результате протечек почвы и грунтовых вод.

За последние два десятилетия ЕРА совместно с другими профильными организациями провели работы:

- по закрытию около 1,5 млн емкостей, подверженных процессам коррозии, из которых нефтепродукты поступали в грунтовые воды;
- по очистке более 300 000 участков, загрязненных нефтепродуктами;
- по сокращению количества обнаруживаемых утечек с 66 000 в 1990 году до 7 000 в 2008 году.

Что касается финансового обеспечения работ, предусмотренных данной программой, то для этих целей в 1986 году был учрежден специальный трастовый фонд, средства из которого направляют на:

- осуществление уполномоченной организацией надзора за деятельностью по устранению последствий утечки нефтепродуктов;
- принуждение к деятельности по устранению последствий утечки ответственных лиц, сопротивляющихся исполнению положений законодательства;
- покрытие затрат на проведение работ по очистке на площадках, владелец которых неизвестен, либо не желает или не может выполнить требования законодательства, а также на площадках, где требуется оперативное проведение работ;
- проведение инспекций и осуществление иных мероприятий, направленных на предотвращение утечек.

Трастовый фонд формируется за счет налоговых сборов с продаж моторного топлива в размере 0,03 доллара/л (0,1 доллара/галлон). Всего на осуществление мероприятий в рамках программы Корректирующих действий ежегодно выделяется порядка 100 млн долларов.

1.2.3. Закон о контроле над токсичными веществами

В 1976 году практически одновременно с Законом о сохранении и восстановлении ресурсов вступил в силу еще один основополагающий закон в области охраны окружающей среды – Закон о контроле над токсичными веществами (Toxic Substances Control Act, TSCA). Изначально он был принят Конгрессом в целях предоставления ЕРА полномочий по предварительной проверке данных о влиянии новых химических соединений на здоровье человека и окружающую среду до начала их производства в промышленном масштабе. Так, в соответствии с положениями закона, ЕРА было поручено [108]:

- разработать систему требований по «уведомлению ЕРА до начала промышленного производства» и исследованиям новых химических веществ. Таким образом, производитель, планирующий выпуск каких-либо химических веществ, обязан предоставить ЕРА результаты их экспертизы. Если этих данных недостаточно для того, чтобы разрешить промышленное производство такого вещества, ЕРА потребует от производителя провести дополнительную экспертизу. Если будет установлено, что производство данного продукта может представлять угрозу для окружающей среды

или здоровья человека, или что его влияние недостаточно изучено, производителя обяжут провести оценку потенциального риска. Если результаты всех экспертиз не убедят ЕРА в химической безопасности данного вещества, то на его производство, продажу или применение будут наложены ограничение или же его производство вообще будет запрещено. При этом требования TSCA не распространяются на химические вещества, использование которых необходимо чисто в научно-исследовательских целях, а также в том случае, если в отношении рассматриваемого вещества действуют иные федеральные законы, например, федеральный закон о пищевых продуктах, лекарственных средствах и косметике (Federal Food, Drug, and Cosmetic Act), федеральный закон об инсектицидах, фунгицидах и родентицидах (Federal Insecticide, Fungicide, and Rodenticide Act) и т. п.;

- установить, какие именно риски для здоровья человека и окружающей среды обуславливают новые химические вещества;
- реализовать сходную программу по исследованию уже существующих химических веществ;
- разработать план действий в отношении работ по обезвреживанию и ликвидации конструкций, выполненных из полихлорированного дифенила.

Таким образом, в противоположность тому, что подразумевает название закона, TSCA не разделяет химические вещества на категории токсичных и нетоксичных веществ – он лишь запрещает производство или импорт химических веществ, которые не приведены в реестре TSCA. Перечень, содержащийся в законе, включает около 63 тыс. химических веществ [112], которые когда-либо были изучены, из которых лишь 5 000 прошли тщательную проверку. Химические вещества, перечисленные в реестре TSCA, именуют «существующими химическими веществами» (англ.: existing chemicals). Химические вещества, не представленные в реестре TSCA, называют «новыми химическими веществами» (англ.: new chemicals).

1.2.4. Закон о Суперфонде

Закон о действиях в отношении окружающей среды, компенсации и ответственности (Comprehensive Environmental Response, Compensation and Liability Act, CERCLA) или кратко Закон о Суперфонде, принятый Конгрессом США в 1980 году, стал одним из самых известных в мире законодательных актов в области охраны окружающей среды. Его принципиальное отличие от RCRA состояло в том, что положения Закона о сохранении и восстановлении ресурсов не регулировали вопросы, связанные с очисткой территорий, уже загрязненных на момент его вступления в силу.

Таким образом, закон о Суперфонде был призван решить проблемы загрязнения окружающей среды, возникшие в ходе «прошлой» деятельности и прежде всего связанные с оставленными и неиспользуемыми промышленными площадками и заброшенными полигонами захоронения опасных отходов, являющимися источниками загрязнения почвы и грунтовых вод. Положения Закона о Суперфонде распространяются на самые разнообразные объекты – от неконтролируемых полигонов захоронения отходов и установок по обращению с отходами до промышленных площадок заводов, шахт и участков с загрязнением грунтовых вод неустановленного происхождения. Также следует отметить, что под действие данного закона подпадает не только «прошлая», но и «будущая» хозяйственно-экономическая деятельность.

CERCLA предполагает использование двухстороннего подхода, гарантирующего обязательное проведение работ по очистке загрязненных территорий. Прежде всего, была сформирована эффективная система, определяющая финансовую ответственность за осуществление работ. Согласно положениям закона четыре категории лиц могут потенциально нести финансовую ответственность за проведение работ по очистке [113]:

- текущие владельцы или операторы установки;
- бывшие владельцы или операторы установки на момент захоронения опасных отходов;
- производители отходов и лица, занимавшиеся организацией работ по захоронению или транспортировке опасных отходов;
- лица, производившие транспортировку опасных отходов и выбравшие соответствующую площадку для их захоронения.

Согласно положениям закона ответственность, применяемая к ответчикам, является [108, 113]:

- строгой – ответчик обязан возместить ущерб независимо от того, является ли он непосредственным виновником загрязнения или нет, т. е. в данном случае не имеет значения, действовал ли он добросовестно с соблюдением всех требований или же халатно;
- солидарной – ущерб является неделимым, а вклад ответчика в загрязнение не пропорционален его ответственности, а это значит, что каждая сторона отвечает за весь нанесенный ущерб. Таким образом, закон дает возможность обязать любую потенциально ответственную сторону возместить все 100 % затрат на проведение очистных работ, даже если эта сторона являлась собственником или поставщиком лишь 1 % от общего объема отходов, размещенных на полигоне;
- имеющей обратную силу – ответчик несет ответственность за действия, произведенные в прошлом за много лет до вступления закона в силу. Таким образом, действия лиц в прошлом могли не противоречить положениям законодательных норм того времени, но тем не менее в настоящее время эти лица могут быть признаны ответственными за причинение ущерба окружающей среде.

При этом потенциально ответственная сторона может избежать финансовой ответственности за очистку загрязненных территорий только в одном случае: при наличии убедительных доказательств того, что загрязнение было вызвано стихийным бедствием или военными действиями или же произошло по вине третьего лица, с которым у ответчика не было ни прямых, ни косвенных договорных отношений.

Установление принципа солидарной ответственности, согласно которому как бывшие, так текущие собственники площадки, непричастные к ее загрязнению, могли быть признаны финансово ответственными за загрязнение, значительным образом изменило практику заключения сделок с недвижимостью [108]. С тех пор тщательные процедуры проверки экологической истории площадок стали неотъемлемой частью сделок по приобретению земельных участков и объектов недвижимости. Подобная экологическая экспертиза (англ. *environmental due diligence assessment*) позволяет установить скрытые финансовые риски при покупке того или иного объекта, а покупателю получить достоверное представление о ценности потенциальной покупки. Благодаря

экспертизе может быть установлено не обременен ли приобретаемый объект имущества финансовыми обязательствами по возмещению причиненного в прошлом экологического ущерба, размеры возможных выплат и других материальных и финансовых затрат, связанных с выполнением требований природоохранного законодательства США.

Выделяют две формы подобных экспертиз. Экологическая экспертиза первого уровня заключается в сборе имеющейся архивной документации по площадке (аэро-фотоснимки, документы из базы данных EPA и других государственных ведомств и т. п.), которая бы позволила установить, производились ли на рассматриваемой площадке опасные материалы или осуществлялось ли их хранение, что могло стать причиной загрязнения. Если на этом этапе будут обнаружены какие-либо подозрительные или сомнительные данные, то приступают к экспертизе второго уровня, предполагающей отбор проб грунта и воды. Причем места для отбора проб определяют на основании результатов экспертизы первого уровня.

Вторым элементом двухстороннего подхода, принятого в рамках CERCLA и гарантирующего обязательность проведения работ по очистке загрязненных территорий, стало учреждение специального трастового фонда, получившего название Суперфонд. Из этого фонда было решено финансировать работы по исследованию и очистке тех площадок, виновник загрязнения которых так и не был установлен. Изначально в законе была заложена программа продолжительностью пять лет и стоимостью 1,6 млрд долларов с годовым бюджетом в размере 320 млн долларов.

До 1995 года большая часть средств (80%) поступала в Фонд за счет налоговых сборов с предприятий нефтяной и химической промышленности, остальную часть составляли бюджетные ассигнования. Логика была проста – средства на реализацию новой программы следует собирать с тех компаний, которые вероятнее всего являются источником образования опасных токсичных веществ, обуславливающих опасность для здоровья человека и окружающей среды.

Схема выполнения работ по очистке такова: государство может само принять решение о проведении работ по очистке площадки, где выявлена утечка загрязняющих веществ либо угроза такой утечки, «представляющей неминуемую и существенную опасность для здоровья человека и благосостояния нации». В этом случае проведение всех мероприятий финансируется из средств Суперфонда. Причем в дальнейшем потраченные средства могут быть взысканы с найденных ответчиков. Во втором случае государство принуждает ответчиков самостоятельно провести все необходимые работы. Делается это на основании указов, издаваемых EPA [114, 115].

Следует отметить, что для ускорения темпов реализации деятельности по реабилитации загрязненных территорий в рамках программы Суперфонда EPA всячески стремилось расширить участие потенциально ответственных сторон в финансировании таких работ и поощряло практику ведения переговоров, стараясь не доводить дело до судебного разбирательства. Потенциально ответственные стороны достаточно быстро осознали тот факт, что участие в таких переговорах для них выгодно. Ведь в соответствии с принципом солидарной ответственности их шансы на выигрыш в суде были крайне невелики, а в случае отказа от проведения очистных работ им также грозили жесткие штрафные санкции. Так, если в 1988 году на долю потенциально ответственных сторон приходилось всего 38% очистных работ, то в начале 90-х гг. эта цифра возросла до 63%, а к 2000 г. – до 70%.

В 1986 году Конгресс принял поправки к Закону о Суперфонде – Закон о продлении срока действия и внесении поправок в программу Суперфонда (Superfund Amendments and Reauthorization Act (SARA)). Поправки вводили следующие основные требования [108]:

- требования закона отныне распространялись не только на установки частного сектора, но и на объекты, находящиеся в ведении федеральных властей (в том числе эксплуатируемые Министерством обороны и Министерством энергетики США);

- при исследовании той или иной площадки, а также выполнении работ по ее очистке необходимо обеспечить взаимное соблюдение всех имеющих отношение к данной деятельности нормативных актов, стандартов и требований (Applicable, Relevant, and Appropriate Regulations, ARAR). Дословно ARAR переводится как «действующие и применимые в данной области нормативные требования». При этом под «действующими» понимаются «любые федеральные требования, имеющие непосредственную юридическую силу или содержащиеся в одобренной на федеральном уровне программе по очистке загрязненных территорий»; под «применимыми в данной области» понимаются нормы проведения очистных работ и организации контроля, а также соответствующие ограничения, прописанные в законодательных актах по защите окружающей среды на федеральном уровне и уровне штатов, а также в законах, регулирующих порядок выбора площадок для размещения установок. Примерами требований ARAR являются предельные концентрации загрязняющих веществ в воде, определенные Федеральным законом о безопасности питьевой воды, или нормы, устанавливаемые законами штатов. Также следует отметить, что решение о том, какие именно ARAR следует рассматривать в отношении того или иного объекта, принимает ответственный сотрудник EPA;

- организации, осуществляющие деятельность с использованием определенных в соответствии с требованиями законодательства количеств химических веществ, обязаны ежегодно отчитываться перед EPA о производимых ими выбросах загрязняющих веществ в воздух, почву и воду;

- организации должны уведомлять органы, занимающиеся планированием действий в чрезвычайных ситуациях, о наличии и местах нахождения химических веществ на эксплуатируемых ими площадках;

- размер трастового фонда был увеличен до 8,5 млрд долларов.

CERCLA закрепил три ключевые составляющие процедуры очистки загрязненных территорий в рамках программы Суперфонда:

- систему ранжирования опасности (Hazard Ranking System, HRS) для определения относительного уровня опасности площадки для здоровья человека и окружающей среды;

- национальный список приоритетных объектов (National Priorities List, NPL), куда заносятся площадки, на которых очистные работы могут быть проведены в рамках программы Суперфонда;

- национальный план действий (National Contingency Plan, NCP), представляющий собой процедуру оценки уровня загрязнения, анализа возможных технических решений и выполнения работ по очистке площадки.

Система ранжирования опасности

HRS представляет собой рабочий инструмент, используемый EPA для сравнения различных площадок по уровню опасности для здоровья человека и окружающей среды, обуславливаемой фактической или вероятной утечкой загрязняющих веществ [116]. Таким образом, HRS является основным механизмом, благодаря которому EPA принимает решение о включении той или иной площадки в национальный список приоритетных объектов (NPL). Следует отметить, что после включения площадки в NPL проводятся более детальные исследования, которые помогают более точно охарактеризовать уровень опасности и установить возможность проведения работ по очистке территории в рамках программы Суперфонда.

По сути HRS является скрининговой системой, позволяющей присвоить баллы, соответствующие уровню опасности, площадке после проведения анализа на основе как уже имеющейся информации, так и результатов маломасштабных исследований. Иными словами в ходе такого анализа используется информация, собрать которую можно относительно легко и быстро, сэкономив на этом средства Суперфонда, которые могут быть направлены на проведение работ по очистке загрязненных территорий.

Присвоение баллов по системе ранжирования опасности производится на основании результатов анализа четырех путей распространения загрязняющих веществ: миграция с грунтовыми водами, излучение от почвы, миграция с поверхностными водами и в воздушной среде.

При определении потенциала миграции с грунтовыми водами анализируется вероятность переноса загрязняющих веществ сквозь слой грунта и загрязнения водоносных горизонтов и водозаборных скважин, питаемых этими горизонтами.

При оценке потенциала миграции с поверхностными водами рассматривается вероятность попадания загрязняющих веществ в поверхностные воды и изучается их воздействие на здоровье человека и окружающую среду. Риски для человека в данном случае обусловлены попаданием загрязняющих веществ в организм человека с питьевой водой или по пищевой цепочке (загрязняющие вещества накапливаются в живущих в воде организмах, потребляемых человеком в пищу).

Излучение от почвы обуславливает риски для человека и биоты, населяющей наземную среду, при прямом физическом контакте с опасными отходами или загрязненной почвой. В этом случае объектами воздействия будут являться лица, непосредственно проживающие в пределах загрязненной площадки либо проживающие на прилегающих территориях и имеющие доступ на данную площадку, а также чувствительные к такому воздействию экологические среды.

При анализе миграции загрязняющих веществ в воздухе оценивается вероятность выброса опасных компонентов в атмосферу, а также число людей и чувствительных сред, потенциально подверженных воздействию выбросов загрязняющих веществ, в том числе в виде газа или взвесей частиц.

Начисление баллов для каждого пути распространения выполняется на основании анализа отдельных факторов, обуславливающих формирование опасных условий на площадке. Выделяют три категории таких факторов:

- вероятность выброса/облучения (т. е. вероятность того, что на площадке произошел или вероятно произойдет выброс опасных веществ в окружающую среду или

что рассматриваемые объекты воздействия будут непосредственно контактировать с загрязняющими веществами);

- характеристики отходов (токсичность, мобильность и количество опасных веществ, выброшенных в окружающую среду);
- объекты воздействия (люди или экологически чувствительные среды, которые подверглись или вероятно подвергнутся воздействию выброшенных загрязняющих веществ).

На основании анализа этих групп факторов площадке может быть присвоен определенный балл – от 0 до 100. Причем одна площадка может получить баллы сразу с учетом нескольких путей распространения загрязняющих веществ. Если площадка получает 28,5 или более баллов, то она считается пригодной для включения в национальный список приоритетных объектов. Следует отметить, что полученные баллы не отражают точный уровень опасности, обуславливаемой площадкой, а являются своего рода индикатором для выявления наиболее приоритетных площадок с точки зрения необходимости проведения дальнейших исследований и очистных работ.

Национальный список приоритетных объектов

NPL – это перечень объектов, находящихся на территории США, по которым имеется информация о фактических или потенциальных утечках опасных и токсичных веществ, т. е. считается, что такие площадки в наибольшей степени требуют проведения работ по очистке и восстановлению качества окружающей среды. Согласно требованиям законодательства перечень «наиболее приоритетных объектов» подлежит пересмотру, по меньшей мере, один раз в год. В первую очередь NPL позволяет EPA отобрать те площадки, по которым необходимо проведение более детальных исследований в целях определения характера и уровня опасности для здоровья человека и окружающей среды, обуславливаемого выбросами загрязняющих веществ, и необходимости проведения тех или иных работ по очистке. При этом не на каждой площадке, включенной в NPL, будут гарантированно проведены работы по ее очистке от загрязнения.

Помимо системы ранжирования опасности существует еще два механизма для включения площадок в NPL:

- власти штата или подконтрольных США территорий могут принять решение о выборе одной площадки для включения в NPL вне зависимости от баллов, начисленных по системе ранжирования опасности;
- площадка может быть включена в NPL, если удовлетворяет всем требованиям, перечисленным ниже:
 - Агентство по регистрации токсичных веществ и заболеваний (Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR) Министерства здравоохранения США выдает письменную рекомендацию об отселении людей с территории данной площадки;
 - по мнению EPA площадка представляет значительную угрозу для здоровья человека;
 - по мнению EPA с точки зрения эффективности и стоимости очистных работ их целесообразней провести в рамках программы долгосрочных действий, реализация которой возможна только на объектах NPL (в отличие от программы краткосрочных мероприятий).

Вообще согласно положениям CERCLA, возможны два варианта проведения работ по очистке загрязненных территорий.

Первый вид мероприятий предполагает реализацию всех работ в короткий срок (Short-Term Removal). В этом случае EPA принимает решение о принятии оперативных мер по предотвращению или устранению утечки опасных веществ. К таким мерам относятся: удаление опасных веществ с площадки, предотвращение их дальнейшего распространения в окружающей среде, мониторинг территории, оценка последствий произошедших или вероятных утечек, мероприятия, направленные на сведение к минимуму размера ущерба для населения, национального благосостояния и окружающей среды и т. п. Такие работы по очистке проводятся в режиме аварийного реагирования.

Основные ограничения – длительность работ не должна превышать одного года, а затраты на их реализацию не должны превышать 2 млн долларов. Примерами краткосрочных мер является экскавация загрязненного грунта, возведение охранного ограждения или укрепление насыпи или плотины. Кроме того, в ходе осуществления таких мероприятий может производиться транспортировка бесхозных бочек с загрязняющими веществами в специально отведенные для этого пункты захоронения. Такие действия могут проводиться как в отношении объектов включенных, так и не включенных в перечень NPL.

Второй вид работ – мероприятия по очистке, рассчитанные на долгую перспективу (Long-Term Remedial Action), позволяющие существенным образом и окончательно уменьшить уровень опасности, обуславливаемый выбросом или угрозой выброса загрязняющих веществ. Данные меры носят всеобъемлющий характер, поэтому на выполнение таких работ могут уходить годы, а их стоимость в среднем может достигать до 30 млн долларов за площадку. Следует особо отметить, что мероприятия, рассчитанные на длительную перспективу, могут проводиться исключительно на площадках, включенных в NPL. Пример работ второго вида – использование системы откачки и очистки загрязненных грунтовых вод.

Национальный план действий

Национальный план действий (полное название Национальный план действий в отношении загрязнения нефтепродуктами и опасными веществами) или NCP – это план мер федерального правительства в ответ на загрязнение окружающей среды, вызванное проливами нефтепродуктов и выбросами опасных веществ, в том числе и радиоактивных. NCP составляет основу Национальной системы аварийного реагирования, регулирующей взаимодействие различных федеральных ведомств и агентств по оказанию помощи местным властям и властям штатов в целях обеспечения безопасности населения и окружающей среды в случае чрезвычайных ситуаций, связанных с выбросом опасных веществ [117].

В NCP описана процедура проведения работ по очистке площадок с выявленной или потенциальной утечкой загрязняющих веществ, состоящая из 9 основных этапов (рис. 1.77-1, стр. 162).

Процесс оценки площадки может быть инициирован в случае обнаружения фактической или потенциальной утечки загрязняющих веществ на площадке или с помощью специальной уведомительной процедуры EPA. Причем любое лицо, потенциально находящееся в зоне воздействия выброса загрязняющих веществ, может выступить

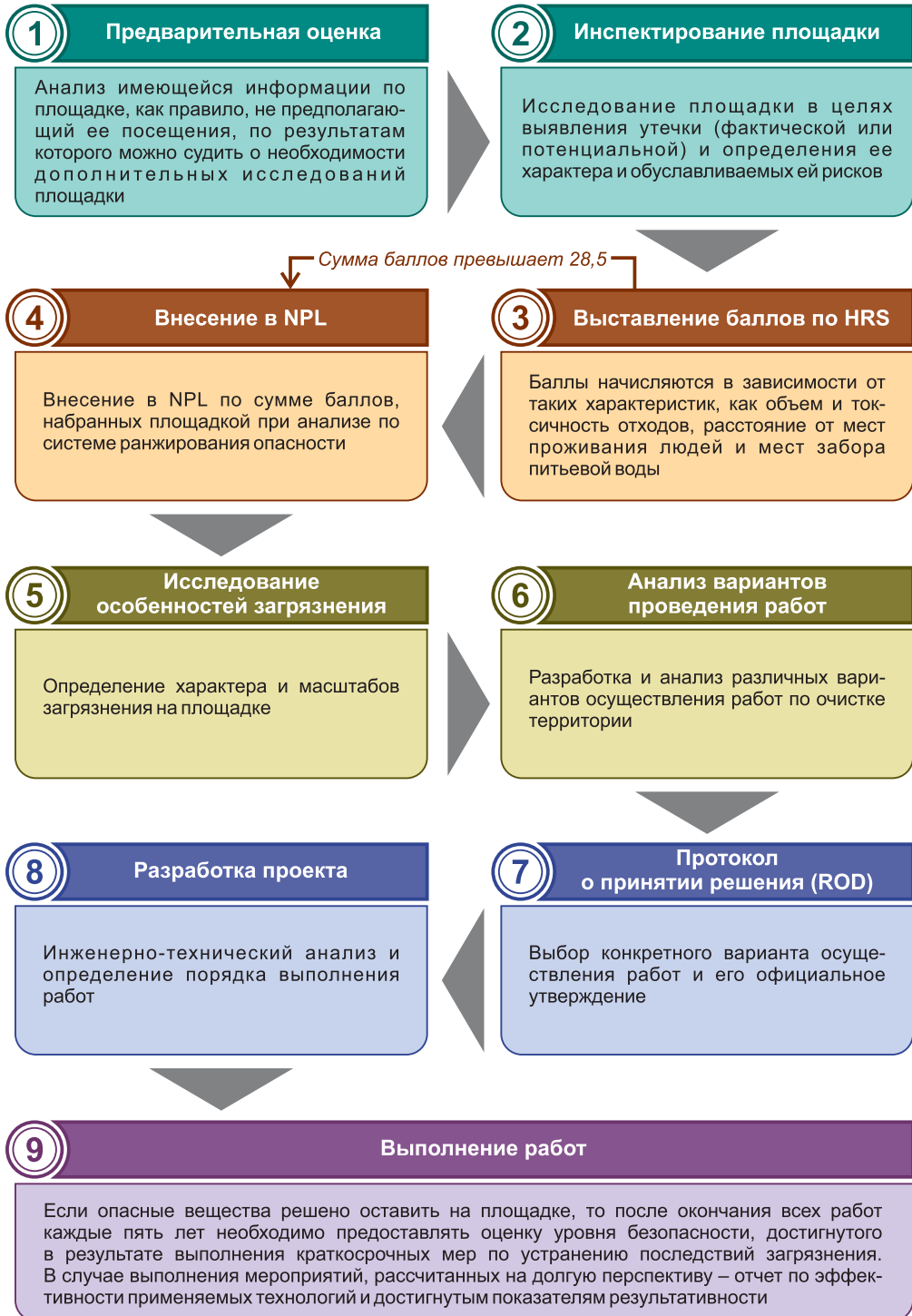


Рис. 1.77-1. Последовательность этапов принятия решений согласно NCP

инициатором такой проверки. Далее EPA вносит площадку в Информационную систему CERCLA, представляющую собой перечень площадок, потенциально содержащих опасные отходы. После чего EPA приступает к оценке уровня риска, обуславливаемого рассматриваемой площадкой для здоровья человека и окружающей среды, реализуя так называемую процедуру оценки площадки.

Первый этап этой процедуры – предварительная оценка (Preliminary Assessment, PA). По результатам предварительной оценки площадка может быть определена либо как не представляющая угрозы для здоровья человека и окружающей среды или представляющая незначительную угрозу, либо как требующая проведения дополнительных исследований. Предварительная оценка занимает относительно мало времени, не требует особых денежных вложений и для целей такого анализа могут понадобиться лишь доступные данные о площадке и окружающих ее территориях.

Как правило, на этом этапе отбора проб не производится, вместо этого эксперты собирают следующие сведения [117]:

- архивные данные об образовании отходов и практике их захоронения;
- о химических веществах, потенциально связанных с осуществляемой на площадке деятельностью;
- о потенциальных источниках поступления опасных веществ в окружающую среду;
- о важнейших путях миграции опасных веществ и затрагиваемых их воздействием средах/объектах;
- о потенциальных объектах воздействия;
- об основных местах отбора проб в целях проведения любых дальнейших исследований площадки.

Если на этом этапе будет обнаружено, что площадка может представлять потенциальную угрозу для здоровья человека и окружающей среды, то переходят ко второму этапу оценки – инспектированию (Site Inspection, SI).

В ходе этапа инспектирования EPA проводит отбор проб почвы, осадочных отложений, поверхностных и подземных вод с целью установления факта выброса загрязняющих веществ с территории площадки, а также выявления потенциальных реципиентов воздействия. Таким образом, в ходе этих мероприятий специалисты EPA могут проверить достоверность гипотез, выдвинутых на предыдущем этапе.

Если будет установлено, что площадка обуславливает опасность для здоровья человека и окружающей среды, то переходят к ее оценке по системе HRS. Результаты такой оценки будут служить основанием для потенциального включения площадки в национальный перечень приоритетных объектов.

Сам этап инспектирования можно разделить на две стадии. Первая стадия – скрининг или целенаправленное инспектирование (Focused Site Inspection), заключающееся в оценке достоверности выдвинутых на предыдущем этапе гипотез. Если полученной на этой стадии информации недостаточно для выполнения дальнейшей оценки площадки по системе HRS, переходят ко второй стадии инспектирования – «развернутое» исследование (Expanded Site Inspection), в ходе которого осуществляется [117]:

- исследование допущений, не в полной мере проанализированных на предыдущей стадии;
- взятие проб, позволяющих установить факт наличия тех или иных опасных веществ на площадке;
- взятие проб, позволяющих установить фоновые концентрации загрязняющих веществ в окружающей среде;
- сбор любой информации, необходимой для оценки площадки по системе HRS.

Далее переходят к процедуре оценки площадки по системе HRS, описанной выше. Как уже было отмечено, по системе HRS площадке может быть присвоен балл от 0 до 100. Если площадка получает 28,5 или более баллов, то она считается пригодной для включения в национальный список приоритетных объектов (NPL).

После проведения всех этапов исследований EPA принимает решение о том, требуется ли в отношении рассматриваемой площадки проведение дальнейших работ либо что ее больше не следует рассматривать в рамках программы очистки Суперфонда. В последнем случае, статус площадки в Информационной системе CERCLA изменяется на – «проведения дальнейших действий не требуется» (No Further Action at this Time).

В тоже время на любом этапе оценки площадки EPA может принять решение о проведении оперативных работ по устранению источников опасности. Причем такие работы могут быть инициированы еще до момента окончания процедуры оценки площадки и начала осуществления мероприятий по очистке, рассчитанных на долгосрочную перспективу (после включения площадки в NPL), а их финансирование может вестись непосредственно из бюджета EPA, либо за счет средств потенциально ответственных за причиненный ущерб сторон.

После включения площадки в NPL приступают к третьему этапу – этапу дополнительных исследований, реализуемых в рамках программы Суперфонда по очистке загрязненных территорий.

Этот этап включает две стадии. Исследования, проводимые в рамках первой стадии, призваны выявить необходимость осуществления тех или иных мер по очистке загрязненных территории и восстановлению качества окружающей среды. Они включают отбор проб и полевые исследования, позволяющие установить характер и уровни риска, обуславливаемые выбросом загрязняющих веществ, для здоровья лиц, проживающих или работающих вблизи площадки, и чувствительных к их воздействию сред. Так, выбранные методы очистки должны обеспечивать соблюдение требований концепции приемлемого риска. В рамках такой оценки EPA анализирует риски заболевания раком и возникновения других неблагоприятных последствий для здоровья человека на протяжении жизни для различных сценариев. Каждый сценарий рассматривает определенные вероятные события, например, использование воды из пробуренной возле жилища скважины в питьевых целях или прикосновение руки к загрязненной почве. Согласно требованиям законодательства, уровень приемлемого риска для человека, постоянно находящегося под воздействием рассматриваемых факторов загрязнения, может колебаться в диапазоне от 1:1 000 000 до 1: 10 000. Если уровень риска ниже, то вмешательства не требуется, а если выше – требуется принятие оперативных мер.

На второй стадии проводится анализ возможностей для практической реализации тех или иных мер по очистке загрязненных территорий.

По окончании третьего этапа утверждается так называемый Протокол о принятии решения (Record of Decision, ROD), содержащий подробное описание мероприятий, выбранных для осуществления на рассматриваемой площадке. Далее приступают к разработке инженерно-технического проекта реализации данных мероприятий. В конечном итоге после выполнения всех запланированных работ EPA может предоставить площадке статус «завершенной». Такой статус площадка может получить по результатам мониторинга, позволяющего оценить эффективность примененных технологий и достигнутые показатели качества окружающей среды. Получение статуса «завершенной площадки» означает, что принятия дальнейших мер по защите здоровья человека и окружающей среды на рассматриваемой территории больше не требуется. В этом случае площадка подлежит удалению из NPL по истечении определенного срока, отведенного для предоставления соответствующих замечаний заинтересованными сторонами.

Отдельно следует рассмотреть подход, разработанный EPA, согласно которому осуществляется выбор окончательного варианта реализации очистных работ на площадке. Данный подход предусматривает сопоставление различных технологий и методик реализации работ по девяти критериям, разделенным на три группы (рис.1.77-2) [118].



Рис. 1.77-2. Схема сравнения различных вариантов реализации мероприятий по очистке загрязненных территорий на основании девяти критериев EPA

Первая группа критериев – «пороговые критерии» (Threshold Criteria) позволяют установить обеспечивают ли рассматриваемые меры защиту человека и окружающей среды и удовлетворяют ли требованиям законодательства на национальном уровне и уровне штатов.

С помощью следующих пяти критериев, так называемых «критериев нахождения баланса», можно сопоставить между собой различные жизнеспособные варианты на основании наиболее значимых факторов.

На последнем этапе к участию в процессе принятия решений активно привлекается общественность и другие заинтересованные стороны, представляющие интересы различных государственных агентств.

При этом разработанный проект плана мероприятий оценивается на основании двух критериев, определяющих его приемлемость для государства и общественности, – «критериев преобразования». Свое название они получили в связи с тем, что на последнем этапе в проект программы мероприятий могут быть внесены некоторые изменения в целях повышения его общественной приемлемости. В итоге после внесения в проект всех изменений формируется протокол о принятии решения (ROD), в котором детально описывается выбранная стратегия по проведению восстановительных мероприятий [118].

Статистика по исполнению положений закона о Суперфонде

Ниже приведены некоторые сведения, касающиеся статистики выполнения работ в рамках программы Суперфонда. Изначально на момент вступления CERCLA в силу EPA было поручено выявить, по крайней мере, 400 площадок для занесения в национальный список приоритетных объектов. К сентябрю 1983 года 406 площадок было включено EPA в NPL, в том числе печально известные загрязненные территории Лав-Канал, Таимз Бич и Тар Крик. Размер трастового фонда (1,6 млрд долларов) был вполне достаточным для реализации запланированных работ. Тем не менее, к 1990 году число площадок, включенных в NPL перевалило за 1 200, а затраты на проведение работ по очистке некоторых из них могли составить сотни миллионов долларов. Кроме того, к этому времени EPA осознало невозможность своевременной реализации мероприятий по множеству площадок, занесенных в NPL еще в 1983 году. Работы по очистке территорий стопорились, что лишь способствовало росту недовольства местного населения. На сегодняшний день можно констатировать, что по многим из этих площадок работы до сих пор не завершены [119].

На рис. 1.78 показан ежегодный прирост количества площадок в национальном списке приоритетных объектов с момента запуска программы Суперфонда. Почти 80% всех площадок было внесено в этот перечень в течение первых десяти лет, т. е. с 1980 по 1990 гг. В течение последующих 15 лет EPA включал в NPL в среднем около 22 площадок в год. После 1983 года в NPL было занесено в общей сложности 1 308 площадок [120].

По данным 2005 года, на долю так называемых федеральных объектов, т. е. площадок, находящихся в собственности и эксплуатируемых различными федеральными агентствами, такими как Министерство энергетики, Министерство обороны и Министерство внутренних дел, приходилось всего около 10% от общего числа площадок (172 площадки). При этом затраты на очистку таких объектов покрываются за счет средств соответствующих агентств, а не из средств Суперфонда.

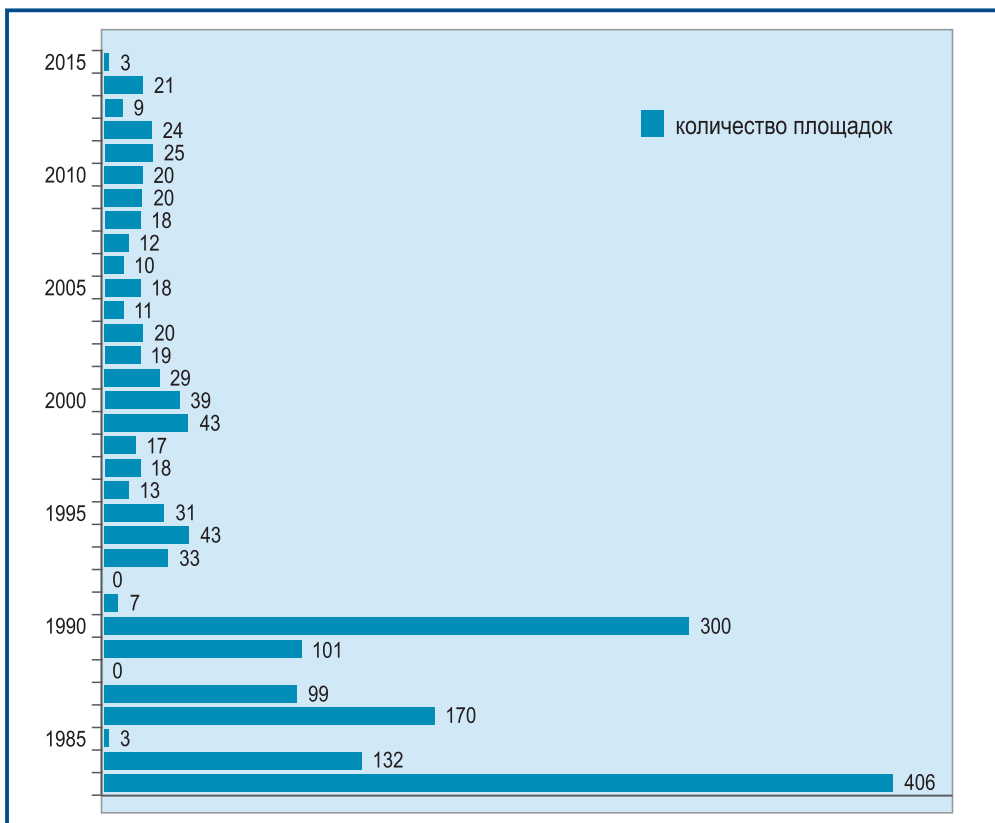


Рис. 1.78. Статистика ежегодного прироста количества площадок в NPL

Как видно из табл. 1.33, на сегодняшний день в национальном списке приоритетных объектов находится 1 337 площадок, а 392 площадки были удалены из NPL с формулировкой «отсутствие необходимости проведения дальнейших мероприятий по защите здоровья человека и окружающей среды».

Табл. 1. 33. Объекты NPL по состоянию на 4 августа 2015 г. [121]

Объекты	Не в федеральной собственности	В федеральной собственности	ВСЕГО
Предлагаемые к внесению	50	3	53
Внесенные	1 180	157	1 337
Удаленные	375	17	392

Принятые в 1986 году поправки к CERCLA увеличили в пять раз размер ежегодных отчислений в Суперфонд. С тех пор помимо налога, взимаемого с предприятий нефтяной и химической отрасли, трастовый фонд также регулярно пополнялся за счет «корпоративного подоходного налога на окружающую среду» [122]. Кроме того, в фонд

поступали бюджетные ассигнования из Национального нецелевого фонда,* а также средства, собранные с ответственных сторон, в виде различных штрафов, взысканий и сборов. Причем год от года доля участия каждого из четырех источников в формировании трастового фонда менялась (рис.1.79).



Рис. 1.79. Соотношение источников пополнения Суперфонда

Так, с 1981 по 1995 гг. 68 % фонда составляли средства, полученные благодаря сбору налогов, 17 % – средства нецелевого фонда, 9 % – процентный доход, 6 % – штрафы, взыскания и сборы. В 1995 году в соответствии с положениями поправок к CERCLA срок сбора налогов истек.

Изменилось и процентное соотношение источников пополнения фонда. С 1996 по 2007 гг. на долю собранных налогов приходилось лишь 6 % от общего размера фонда, ассигнования из нецелевого фонда достигли 59 %, процентный доход – 16 %, а средства, взыскиваемые в виде штрафов и сборов, составили 19 % от размера фонда.

С 1980 по 2007 год на проведение исследований площадок и работ по очистке загрязненных территорий в рамках программы Суперфонда было выделено в общей сложности около 29,9 млрд долларов. Причем, основываясь на статистических данных, в среднем ЕРА финансировало лишь 30 % работ по очистке площадок, остальные 70 % были оплачены ответственными сторонами. Тем не менее, точных данных о суммах, направленных на очистку площадок, включенных в NPL, нет. Это связано с тем, что ответственные стороны, погасившие львиную долю затрат на проведение всех работ по очистке территорий, такую информацию, как правило, не желают разглашать.

С 1987 года размер средств ежегодно выделяемых из Суперфонда на проведение очистных работ неуклонно рос, а размер фонда достиг своего максимума в 1997 году (4,7 млрд долларов) (рис.1.80).

* Государственный фонд США, цели использования средств которого изначально не определены. Данные средства, к примеру, могут пойти на реализацию оборонных программ, погашение государственных задолженностей, покрытие текущих расходов федеральных агентств, выдачу грандов властям штатов и округов и т. п.

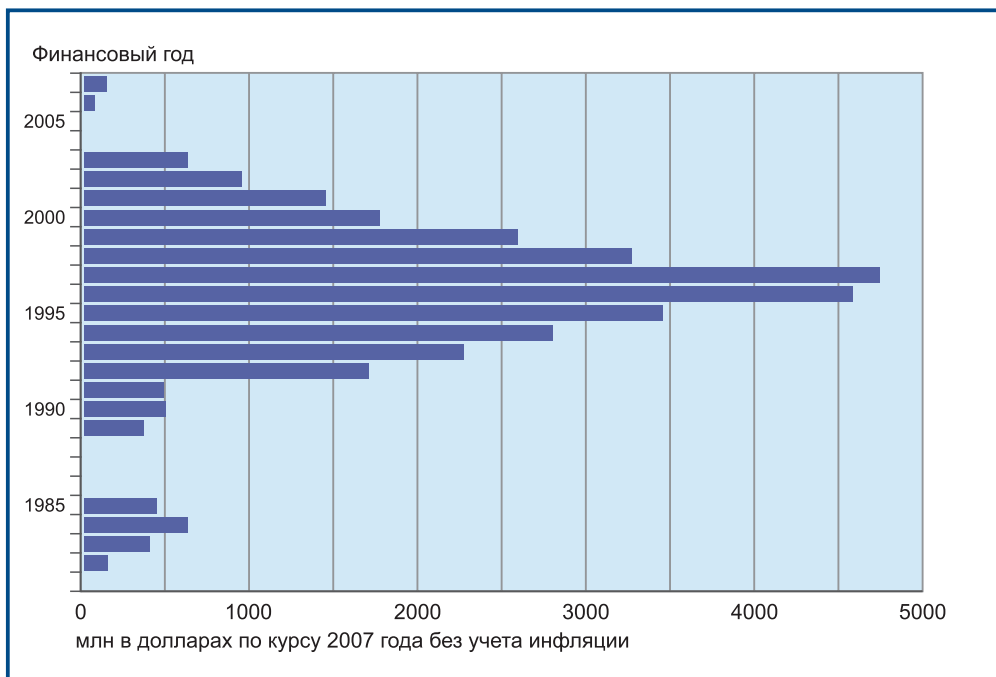


Рис. 1.80. Баланс трастового фонда Суперфонда на начало каждого финансового года

К началу 2007 года на балансе фонда находилось всего 173 млн долларов. В последние годы размер ежегодных ассигнований EPA в рамках программ Суперфонда оставался на уровне 1,3 млрд долларов в год (без учета инфляции). А это значит, что относительный размер ассигнований уменьшился. Так, 1,2 млрд долларов по курсу 2005 года равны всего 820 млн долларов по курсу 1987 года. Эти цифры отражают произошедшее за эти годы 40 % падение потребительской способности в США.

На данный момент ситуация такова, что, несмотря на отсутствие денег в Суперфонде EPA, продолжает вносить все новые площадки в NPL.

При этом количество площадок, работы по очистке которых уже завершены, не так уж велико: на некоторых площадках причиной задержек стало недофинансирование, для других площадок изначально выбранный набор мер по устранению последствий загрязнения уже неактуален и требует пересмотра и доработки. В ряде случаев ответственные стороны по целому ряду причин выполняют работы медленнее, чем планировалось изначально. Кроме того, на завершение работ по очистке крупных сложных площадок могут уйти целые десятилетия.

Что касается статистики по срокам проведения работ, то только этап предварительной оценки в среднем может занимать от 18 месяцев в случае простого почвенного загрязнения и 36 месяцев в случае сложного почвенного загрязнения, до 6 лет при установлении факта загрязнения грунтовых вод. По данным EPA, с момента установления факта загрязнения и до развертывания полномасштабной программы действий по его устранению на объектах NPL в среднем проходит около 15 лет.

§ 1.3. Программа Министерства энергетики США по решению проблем ядерного наследия

Программа по ликвидации ядерного наследия, осуществляемая в США, признана самой масштабной и дорогостоящей в мировой практике. По оценкам Министерства энергетики США на реализацию всего комплекса мер по выводу из эксплуатации ядерных установок и очистке загрязненных территорий будет потрачено порядка 370 млрд долларов, при том что к настоящему времени фактические затраты уже превышают 200 млрд долларов. Сумма будущих обязательств примерно сопоставима с вложениями правительства США в программу исследований и разработок по созданию ядерного оружия, реализованную в период с 1945 по 1995 гг., которые составили около 300 млрд долларов (в эквиваленте 1995 года) [4]. Следует отметить, что за тот же период всего лишь несколько сотен миллионов долларов было направлено на реализацию научных проектов по исследованию безопасности различных технологий захоронения радиоактивных отходов.

Ситуация начала постепенно меняться лишь с конца 1970-х гг., когда Конгресс США принял целый ряд законов природоохранной направленности, согласно положениям которых регулирующие органы на федеральном уровне и на уровне отдельных штатов получили полномочия по надзору за деятельностью, способной оказать воздействие на окружающую среду. Осознание накопленных проблем, связанных с загрязнением окружающей среды и невозможностью полного соблюдения требований безопасности на ряде установок, заставили DOE в период 1980-х – начала 1990-х гг. временно приостановить деятельность на некоторых площадках до устранения выявленных нарушений. Однако в связи с распадом СССР и окончанием холодной войны некоторые из этих объектов ядерного оружейного комплекса США оказались закрыты навсегда. Причем для этих площадок Министерством энергетики заблаговременно не было разработано программ долгосрочных мероприятий по обращению с радиоактивными отходами и очистке загрязненных территорий. Результаты проведенных в дальнейшем исследований показали, что радиоактивному или химическому загрязнению в той или иной степени подверглись практически все без исключения площадки. Загрязненными оказались не только строительные конструкции, но и почва, грунтовые и поверхностные воды как в пределах производственных площадок, так и в их окрестностях.

1.3.1. Меры министерства энергетики по реабилитации территорий ядерного комплекса

Сегодня DOE в среднем тратит около 6 млрд долларов в год на финансирование проектов, осуществляемых в рамках программы по ликвидации ядерного наследия – это в четыре раза больше, чем затраты EPA на проведение работ по очистке включенных в NPL (Национальный перечень приоритетных объектов) площадок. Программа DOE охватывает более 100 площадок, включая 10 наиболее крупных, расположенных в 11 разных штатах (рис. 1.81). Промежуточные итоги реализации программы приведены в табл. 1.34 и 1.35.

К настоящему времени в перечне DOE-EM числятся 94 «закрытые»* площадки. При этом «закрытой» площадка считается в том случае, если после завершения всех работ выполнены пять условий [123]:

* англ. compleated site

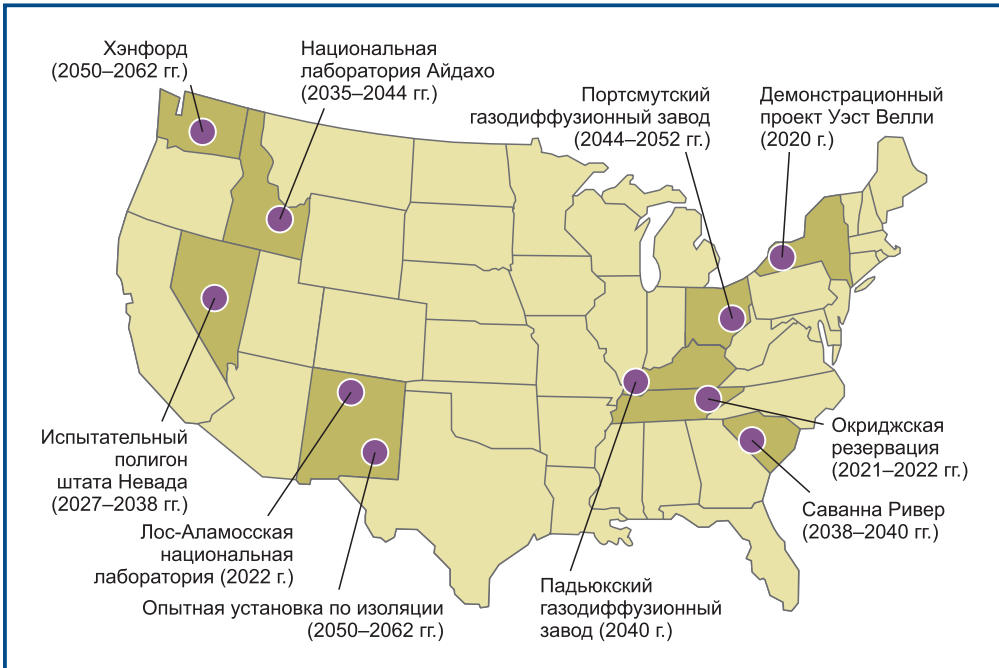


Рис. 1.81. Крупнейшие площадки Министерства энергетики США, включенные в программу по ликвидации ядерного наследия (в скобках годы планируемого окончания работ и закрытия площадок)

- на площадке завершены все работы по дезактивации и выводу из эксплуатации всех установок, включенные в программу DOE-EM по данной площадке, за исключением надзорных мероприятий и мониторинга;
- выполнены работы по устранению последствий выбросов и сбросов загрязняющих веществ, и условия на площадке соответствуют заранее установленным требованиям и нормам;
- все источники загрязнения грунтовых вод локализованы либо осуществляется долгосрочная программа по очистке грунтовых вод и мониторингу их состояния;
- ядерные материалы и ОЯТ находятся в стабильном состоянии и/или были помещены на безопасное долгосрочное хранение;
- отходы «ядерного наследия» (за исключением ВАО) были окончательно изолированы с соблюдением всех требований безопасности.

Табл. 1.34. Текущие результаты реализации мероприятий, включенных в программу по ликвидации ядерного наследия Министерства энергетики США

	По состоянию на 1989 год	2015 г.	
Количество штатов	35		31,4
Количество площадок		16	14,5
Площадь, га	810 000	145 000	17,9

Табл. 1.35. Оценка объемов основных элементов ядерного наследия США (от 1997 г.), м³

Всего	36 000 000
Хвостохранилища	32 000 000
НАО	3 300 000
ВАО	380 000
ТРУ РАО	220 000
Смешанные и другие отходы	215 000
Загрязненная почва	75 000 000
Загрязненные грунтовые воды	1 800 000 000
Загрязненные здания и сооружения	10 000

Как видно из табл. 1.34 и 1.35, DOE удалось достигнуть существенного прогресса в реализации поставленных задач. Тем не менее, Министерству еще предстоит большая работа: реализацию программы планируется полностью завершить лишь к концу 2060-х годов. Согласно оценкам экспертов на выполнение оставшихся экологических обязательств Министерство энергетики потратит порядка 209 млрд долларов (рис. 1.82) [124].

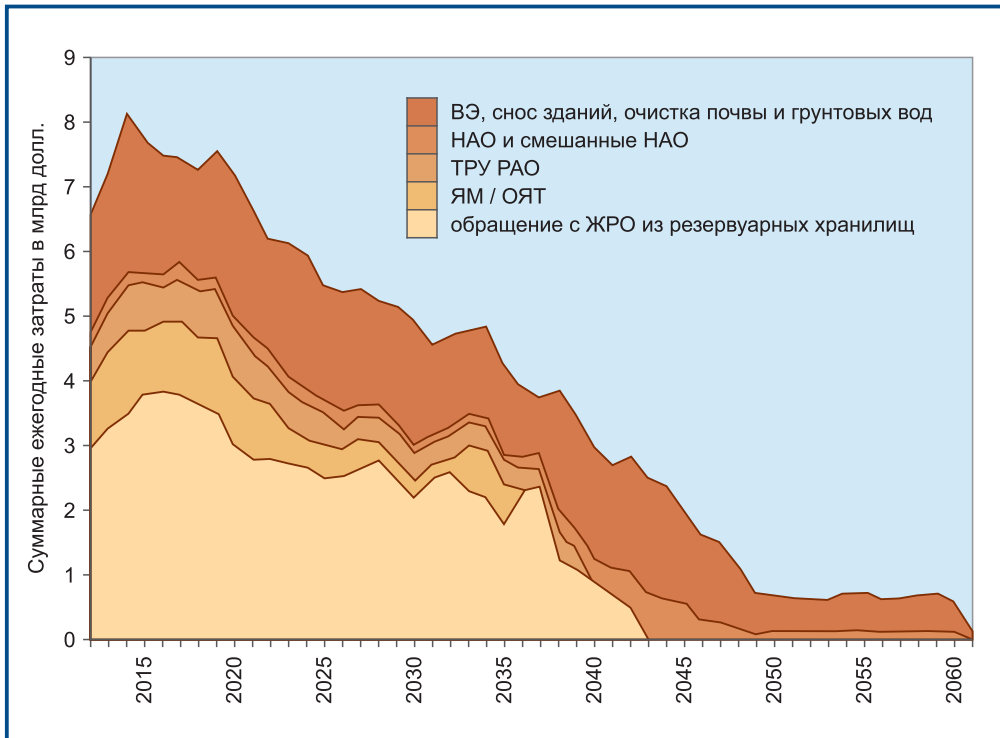


Рис. 1.82. Суммарные затраты Министерства энергетики на выполнение оставшихся обязательств по ликвидации ядерного наследия

При этом наиболее затратной статьёй расходов является деятельность по обращению с ЖРО из подземных резервуарных хранилищ. На втором месте – затраты на реализацию проектов по выводу из эксплуатации установок и сносу зданий и сооружений, а также очистке загрязненной почвы и грунтовых вод.

В табл. 1.36 представлены основные статьи расходов в рамках мероприятий, реализованных в период с 1989 по 2013 гг.

Табл. 1.36. Основные статьи расходов в рамках реализации программы по ликвидации ядерного наследия DOE в период с 1989 по 2013 гг.

Статья расходов	Суммарные затраты, млрд долларов	
Обращение с ЖРО из подземных резервуарных хранилищ	35	24
Обращение с РАО	24	7
Очистка почвы и грунтовых вод	19	13
Работы по дезактивации и демонтажу	24	7
Обращение с ОЯТ	20	14
Инфраструктура	22	15

1.3.2. Эволюция природоохранного законодательства в свете программы DOE по решению проблем ядерного наследия

Поворотным моментом, давшим толчок к ускоренному осуществлению работ по ликвидации ядерного наследия, стало принятие в 1992 году Закона о соответствии федеральных объектов нормативным требованиям (Federal Facility Compliance Act). Однако начало всей последующей природоохранной деятельности в США было положено еще в конце 1969 года, когда в силу вступил Закон о национальной политике в области охраны окружающей среды (NEPA). За ним последовали Закон о сохранении и восстановлении ресурсов (RCRA) и Закон о Суперфонде (CERCLA). Положения этих законов рассмотрены в главе 1.2. Ниже остановимся лишь на ключевых требованиях, имеющих непосредственное отношение к государственной программе DOE по ликвидации ядерного наследия.

Важнейшим нововведением, связанным с принятием Закона о национальной политике в области охраны окружающей среды (NEPA), стало требование к обязательному проведению оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) при планировании любой хозяйственно-экономической деятельности, способной оказать «значительное воздействие на качество окружающей человека среды». При этом ОВОС должна содержать не только сведения о потенциальных последствиях осуществления планируемой деятельности, но и анализ мер, направленных на их минимизацию, включая, при необходимости, вариант полного отказа от планируемой деятельности. Кроме того, ведомство или организация, ответственная за разработку ОВОС, должна подготовить проект ОВОС и вынести его на общественное обсуждение. Это требование NEPA было распространено на любую деятельность, лицензируемую Комиссией по атомной энергии (AEC) и Комиссией по ядерной безопасности (NRC), по строительству и эксплуатации

АЭС, пунктов хранения и захоронения, а также на деятельность АЕС/ERDA/DOE, связанную с разработкой новых ядерных установок, крупными проектами по обращению с отходами или их захоронению.

Таким образом, NEPA позволил укрепить позиции общественности в процессе принятия решений по подобным проектам. Если до 1960-х гг. американцы в целом относились положительно к ядерным проектам, реализуемым правительством США, то в 1970-е годы ситуация стала постепенно меняться: озабоченность вопросами загрязнения окружающей среды в результате хозяйственно-экономической деятельности АЕС стала проявляться все ярче. Решающую роль в этом сыграло принятие в 1966 году Федерального закона о свободном доступе к информации (Freedom of Information Act, FOIA). Закон обязывает все федеральные ведомства обеспечивать свободный доступ граждан ко всей информации, которой они располагают, кроме материалов, имеющих непосредственное отношение к национальной безопасности, личным и финансовым документам и материалам правоохранительных органов. Причем лица, запрашивающие такие документы, не обязаны каким-либо образом обосновывать необходимость их получения. Спорные вопросы подлежат решению в судебном порядке. Согласно положениям FOIA, запрашиваемая информация должна быть предоставлена в десятидневный срок с момента поступления запроса или апелляции, а споры должны разрешаться в течение 20 дней.

С тех пор FOIA стал использоваться как отдельными гражданами, так и различными организациями для получения информации о проектах по разработке ядерного оружия, строительству и эксплуатации АЭС и т. п., а также возникающих на таких площадках проблемах, связанных с обеспечением безопасности и загрязнением окружающей среды. Таким образом, общественности был предоставлен доступ к практически любой интересующей информации, необходимой для более эффективного участия в регулирующей деятельности государства, принятия решений по политике в области использования атомной энергии и т. п. Так, например, благодаря FOIA в 1978 году Юго-западный исследовательский информационный центр (Northwest Research Information Center) смог ознакомиться с предварительной версией ОВОС Сандийской национальной лаборатории по проекту создания WIPP, изначально предназначенной только для внутреннего пользования. В 1986 году FOIA помог Хэнфордской инициативной группе (Hanford Education Action League) и Институту экологической политики рассекретить несколько тысяч страниц документов DOE о произведенных плановых и аварийных выбросах и сбросах РАО с территории Хэнфордского ядерного комплекса, вызвавших загрязнение воздуха, почвы и воды.

Рост общественного недовольства в связи с установлением все новых фактов загрязнения окружающей среды побудил правительство США пересмотреть сложившуюся систему управления в сфере природоохранной деятельности, закрепив все управленческие функции в этой области за единым органом. Так, в 1970 году было создано Агентство по защите окружающей среды США (Environmental Protection Agency, EPA). EPA получило полномочия, раньше принадлежавшие АЕС, по утверждению «норм по защите окружающей среды общего применения», устанавливающих предельные значения радиационного воздействия коммерческих и военных ядерных установок в целях защиты здоровья человека и окружающей среды. За EPA были также закреплены функции «по утверждению предельно допустимых норм/уровней облучения, концентраций и количеств радиоактивного материала для территорий, выходящих за границы производственных площадок объектов, деятельность на которых контролируется лицами,

владеющими или использующими ядерные материалы». В 1977 году EPA завершило совместную работу с АЕС/NRC по разработке общих норм, распространяющихся на любые ядерные установки. Так, для населения были установлены предельные значения по эквивалентной дозе облучения, обуславливаемой воздействием всех компонентов ядерного топливного цикла – 2,5 мЗв для всего тела и 7,5 мЗв – для щитовидной железы. Таким образом, значения доз, фиксируемых за границами промышленных площадок любых ядерных объектов, не должны превышать этих значений. АЕС (а дальнейшем NRC) была поручена разработка норм для промышленных площадок отдельных установок, которые гарантировали бы соблюдение общих норм, установленных EPA, а также деятельность по контролю над соблюдением этих норм.

В 1974 году был принят еще один важный закон – Закон о реорганизации в области энергетики (Energy Reorganization Act, ERA), разделивший АЕС на два отдельных агентства. Так была учреждена Комиссия по ядерному регулированию (NRC) – независимый регулирующий орган, на который была возложена ответственность по контролю и надзору за соблюдением требований безопасности и защиты здоровья человека и окружающей среды на гражданских ядерных установках и при осуществлении деятельности по обращению с образующимися на таких объектах отходами. На второй орган – Управление по исследованиям и разработкам в области энергетики (Energy Research and Development Administration, ERDA) – была возложена ответственность за производство ядерного оружия, а также проведение любых ядерных НИОКР, в том числе в области ядерно-топливных технологий. ERDA отвечало за обеспечение защиты окружающей среды, здоровья человека и безопасности на таких объектах, в том числе за безопасность деятельности по обращению с образующимися на ядерных установках РАО. NRC было поручено осуществлять регулирующий контроль над установками ERDA, предназначенными для приема и хранения ВАО от переработки коммерческого ОЯТ.

В 1977 году ERDA было переименовано в Министерство энергетики, в ведение которого были переданы площадки оборонного комплекса и деятельность по исследованиям и разработкам в области мирного атома.

Таким образом, принятие Закона о реорганизации позволило устранить конфликт интересов: до этого полномочия по разработке ядерных технологий и регулированию вопросов их использования в целях обеспечения безопасности, защиты человека и окружающей среды были закреплены за одним агентством. С другой стороны, принятие ERA и создание EPA позволило окончательно зафиксировать распределение зон ответственности между тремя государственными ведомствами (NRC, ERDA (позднее DOE) и EPA), тем самым обозначив четкую границу между регулированием вопросов обращения, хранения и захоронения коммерческих и военных РАО. С тех пор система классификации РАО в США состоит из двух отдельных подсистем (рис. 1.83): одна относится к коммерческим РАО, а другая – к РАО Министерства энергетики США (DOE) [125].

На первую подсистему распространяются нормативные требования NRC (Комиссии по ядерному регулированию США), а на вторую – отдельные законы и, в частности, Постановление DOE 435.1 «Об обращении с РАО».

В законе США P.L. 96-573 «О радиоактивных отходах низкой активности» НАО определяются как радиоактивный материал, не являющийся ВАО, ОЯТ или вторичным материалом, который NRC классифицирует как низкоактивные отходы.

Согласно документу NRC 10 C.F.R. 61.55, «Классификация отходов» НАО делятся на четыре класса А, В, С и Greater than Class C (выше класса С) (табл. 1.37).

В табл. 1.38 (стр. 177) представлены основные характеристики для каждого класса коммерческих НАО. Следует отметить, что для целей регулирования к короткоживущим относят радионуклиды с периодом полураспада менее 100 лет, а к долгоживущим – более 100 лет [126, 127].

Если для НАО в США установлены количественные критерии отнесения по конкретным радионуклидам, то ситуация с ВАО обстоит иначе. Между тем следует отметить, что большая часть американских ВАО была произведена военными установками Хэнфорда и Саванна-Ривер, и поэтому подпадает под классификацию, установленную Министерством энергетики США. Что касается ВАО коммерческого происхождения, то NRC определяет данные РАО как:

- облученное реакторное топливо;
- ЖРО, образующиеся на первой стадии экстракции растворителем и концентрированные отходы, образующиеся на последующих стадиях экстракции, а также на установках по переработке облученного реакторного топлива;
- ТРО, образующиеся в результате переработки таких ЖРО.

В документе 40 CFR Part 191 «Нормы защиты окружающей среды при обращении и захоронении ОЯТ, ВАО и трансураниевых РАО» Агентства по охране окружающей среды США, положения которого применимы как к отходам NRC, так и к отходам Министерства энергетики, ВАО определяются как «высокорadioактивный материал, образующийся в результате переработки отработавшего топлива, включая жидкие отходы, и любой твердый материал, полученный из таких жидких отходов, который содержит продукты деления в достаточной концентрации, и другой высокоradioактивный материал, который Комиссия по ядерному регулированию США в соответствии с существующим законом определяет как материал, требующий окончательной изоляции» [128].

Таким образом, в основе существующей на сегодняшний день в США системы классификации коммерческих РАО лежат источники образования отходов и разделение ответственности между NRC и DOE за окончательное обращение с ними, а не их реальный уровень опасности и риски.

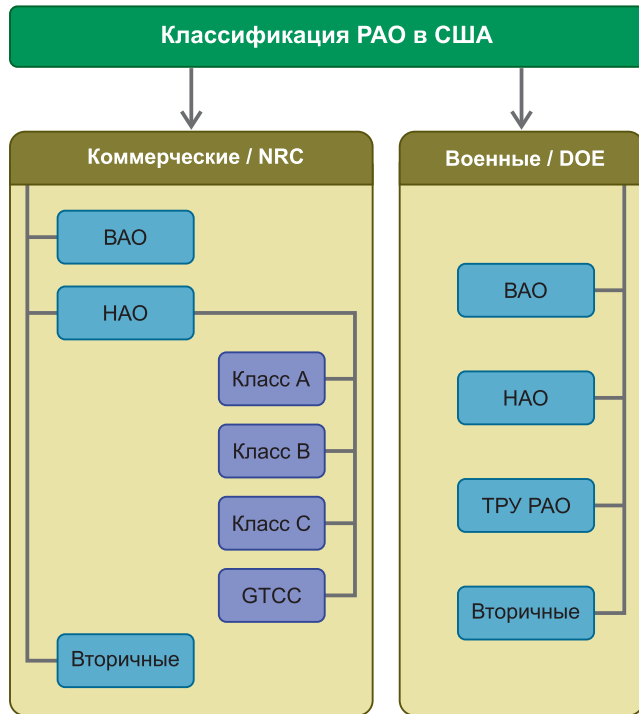


Рис. 1.83. Система классификации РАО

Табл. 1.37. Классы НАО согласно документу NRC 10 C.F.R. 61.55

Радионуклид		Удельная активность	
Класс А	C-14	< 2,96·	Бк/м ³
	C-14 в активированном металле	< 2,96·	
	Ni-59 в активированном металле	< 8,14·	
	Nb-94 в активированном металле	< 7,14· ⁸	
	Tc-99	< 1,11·	
	I-129	< 2,96· ⁸	
	Все нуклиды с T _{1/2} < 5 лет	< 2,59· ¹³	
	H-3	< 1,48· ¹²	
	Co-60	< 2,59· ¹³	
	Ni-63	< 1,3·	
	Ni-63 в активированном металле	< 1,3· ¹²	
	Sr-90	< 1,48· ⁹	
	Cs-137	< 3,7·	
	Альфа-излучающие ТРУ нуклиды с T _{1/2} > 5 лет	< 3,7· ²	
Pu-241	< 1,3· ⁴		
Cm-242	< 7,4· ⁴		
Класс В	Ni-63	1,3·10 ⁻² –2,59·10 ¹²	Бк/м ³
	Ni-63 в активированном металле	1,3·10 ¹² –2,59·10 ¹³	
	Sr-90	1,48·10 ⁹ –5,55·10 ¹²	
	Cs-137	3,7·10 ⁻¹ –1,63·10 ¹²	
Класс С	C-14	2,96·10 ⁻¹ –2,95·10	Бк/м ³
	C-14 в активированном металле	2,96·10 ⁻¹ –2,96·10 ¹²	
	Ni-59 в активированном металле	8,14·10 ⁻¹ –8,14·10 ¹²	
	Nb-94 в активированном металле	7,4·10 ⁸ –7,4·10 ⁹	
	Tc-99	1,11·10 ⁻¹ –1,11·10	
	I-129	2,96·10 ⁸ –2,96·10 ⁹	
	Ni-63	2,59·10 ¹² –2,59·10 ¹³	
	Ni-63 в активированном металле	2,95·10 ¹³ –2,59·10 ¹⁴	
	Sr-90	5,55·10 ¹² –2,59·10 ¹⁴	
	Cs-137	1,63·10 ¹² –1,7·10 ¹⁴	
	Альфа-излучающие ТРУ нуклиды с T _{1/2} > 5 лет	3,7·10 ² –3,7·10 ³	Бк/кг
	Pu-241	1,3·10 ⁴ –1,3·10 ⁵	
	Cm-242	7,4·10 ⁴ –7,4·10 ⁵	

Табл. 1.38. Основные характеристики различных классов НАО

	Класс А	Класс В	Класс С	Класс выше С
Форма	Мусор, почва, обломки горных пород, обедненный уран, незначительно загрязненное оборудование и одежда	Комплекующие реакторов, ЗРИ, фильтры и смолы фильтров АЭС	То же, что Класс В, но активность выше	Комплекующие реакторов и смолы фильтров после ВЭ реакторов
Удельная активность	От фоновой до $2,6 \cdot 10^{13}$ Бк/м ³	(0,15–2600) · 10 Бк/м ³	(160–26000) · 10 Бк/м ³	Выше, чем у класса С
Основы для определения предельной концентрации отходов	Распад в течение 100 лет до приемлемого уровня, установленного для лиц, проникающих в установку*	Распад в течение 100 лет до приемлемого уровня, установленного для лиц, проникающих в установку*	Распад в течение 100 лет до приемлемого уровня обеспечения безопасности для лиц, проникающих в установку*; достижение приемлемого уровня обеспечения безопасности через 500 лет; обеспечение защиты сроком на 500 лет за счет глубины захоронения и барьеров защиты от вторжения	Законодательно не определены
Глубина	До 30 м	До 30 м	Более 30 м	Геологическое захоронение
Требования к контейнерам	Специальных требований не предусмотрено в том случае, если отходы захорониваются в отдельных камерах	Требование к сохранению стабильности в течение 300 лет	Требование к сохранению стабильности в течение 300 лет	Не применимы
Особые требования к захоронению	Необходима стабилизация, если захорониваются совместно с отходами класса С и В	Не применимы	Барьеры защиты от вторжения должны выполнять свои функции в течение 500 лет, если условия на площадке не позволяют произвести захоронение на большей глубине	Подлежат захоронению в пунктах геологического захоронения, но могут быть захоронены в приповерхностных могильниках со специального разрешения КЯР

*Приемлемый уровень для лиц, проникающих в установку, определяется на основании максимальной годовой эквивалентной дозы облучения в 500 мбэр (для всего тела). Приемлемый уровень для населения определяется как максимальная эквивалентная доза, равная 25 мбэр для всего тела, 75 мбэр - для щитовидной железы и 25 мбэр - для любого другого органа.

Такой подход к классификации РАО уже на протяжении многих лет является объектом критики. К примеру, многие американские специалисты в сфере атомной энергетики отмечают, что одно только название категории «низкоактивные отходы» способно ввести в заблуждение. Ведь зачастую отходы класса «Выше С» имеют активность сопоставимую с высокоактивными РАО [129].

В определении ВАО Агентства по охране окружающей среды говорится о «содержании продуктов деления в достаточной концентрации». Однако ни в одном нормативном документе США не приводится количественных значений для такой «достаточной концентрации». В одном из пояснительных отчетов комиссии палаты представителей по делам вооруженных сил (англ. House Armed Services Committee) объясняется, что такое определение позволяет ответственному регулирующему органу, т. е. Агентству по охране окружающей среды, устанавливающему нормы радиационной безопасности для пунктов захоронения, «самостоятельно определять концентрации продуктов деления и ТРУ элементов, требующие окончательной изоляции». Таким образом, некоторые низкоактивные отходы от переработки ОЯТ могут быть классифицированы и захоронены не как ВАО в случае, если уровень исходящей от них опасности ниже уровня, требующего их окончательной изоляции [129].

Начиная с конца 1970-х гг. – начала 1980-х гг., общественность все пристальнее следила за появлением в СМИ новой информации о произошедших в прошлом случаях радиоактивного и химического загрязнения окружающей среды на площадках DOE. Правительство больше не могло закрывать глаза на необходимость принятия неотложных мер по решению огромного количества проблем, накопившихся за несколько десятилетий. Законодательную основу для запуска масштабной программы по очистке загрязненных территорий обеспечили два федеральных закона – Закон о сохранении и восстановлении ресурсов (RCRA) и Закон о Суперфонде (CERCLA) (см. § 1.2.).

Однако даже после принятия этих законов вопрос относительно регулирования деятельности по обращению с РАО, находящимися в ведении DOE, не был решен полностью. До сих пор оставалось неясно: распространяются ли положения RCRA и CERCLA на деятельность Министерства энергетики США? Ведь DOE является федеральным агентством, а значит, против него судопроизводство может быть начато только по требованию Конгресса США. В этом случае возникает вопрос: какие законодательные нормы и стандарты могут быть применены к DOE в целях обеспечения соответствия его деятельности требованиям безопасности и защиты окружающей среды и здоровья человека? Эта проблема была решена благодаря принятию двух новых законов: Закона о продлении срока действия и внесении поправок в программу Суперфонда (Superfund Amendments and Reauthorization Act (SARA)), вступившего в силу в 1986 году, и Закона о соответствии федеральных объектов нормативным требованиям (Federal Facility Compliance Act, FFCA). Эти законы позволили распространить требования RCRA и CERCLA на установки, находящиеся в ведении DOE и других федеральных органов власти. Также в них были описаны механизмы, благодаря которым федеральные агентства должны были обеспечить соблюдение этих требований.

1.3.3. Роль SARA и FFCA в формировании программы DOE по решению проблем ядерного наследия

SARA распространил требования Закона о Суперфонде на все федеральные агентства США, тем самым решив проблему, описанную выше. В соответствии с по-

ложениями SARA, EPA был учрежден Реестр соблюдения требований в отношении опасных отходов (Hazardous Waste Compliance Docket). В него заносилась информация о сбросах опасных веществ и загрязнении площадок, находящихся в ведении DOE и других федеральных ведомств. С тех пор EPA регулярно оценивает масштабы проблем на данных площадках и на основании результатов оценки принимает решение о внесении отдельных площадок в Национальный перечень приоритетных объектов (NPL) [130]. EPA, будучи федеральным агентством США, не имеет права подавать в суд на другие федеральные агентства. Поэтому SARA предписывает федеральным агентствам, в чьем ведении находятся площадки, включенные в NPL, заключать с EPA межведомственные соглашения (также называемые «Соглашениями о федеральных установках*»), где были бы прописаны состав работ по очистке загрязненных территорий и сроки их выполнения, а общественность получила право доступа ко всей относящейся к таким проектам информации и смогла участвовать в процессе разработки программ реабилитации. После заключения Соглашения о федеральных установках EPA контролирует соблюдение графика выполнения работ и своевременное достижение промежуточных целевых показателей, а также следит за соблюдением требований природоохранного законодательства. Помимо состава и сроков исполнения работ в таких соглашениях, как правило, приводится перечень возможных штрафных санкций, которые EPA может применить к федеральному агентству в случае несоблюдения требований или иных положений, прописанных в соглашении, а агентство, реализующее соответствующую программу по очистке загрязненных территорий, обязано ежегодно отчитываться о ходе работ перед Конгрессом США. На данный момент в NPL числятся 19 установок, находящихся в ведении DOE. По каждому из этих объектов были заключены межведомственные соглашения с указанием перечня работ, планируемых к реализации, сроков их исполнения и промежуточных целевых показателей.

К началу 1990-х гг. стало ясно, что положений SARA недостаточно для обеспечения приемлемых темпов реализации работ на площадках. Поэтому в 1992 году был принят еще один закон – Закон о соответствии федеральных объектов нормативным требованиям (FFCA), предлагающий целый ряд поправок к RCRA, согласно которым законодательные требования стали распространяться на любые опасные отходы, вне зависимости от формы собственности (федеральные агентства, власти штатов или местные органы власти) [131]. Кроме того, федеральные агентства утратили иммунитет от судебного преследования: отныне судебные иски на агентства могли подавать власти штата, частные лица, местные жители и экологические организации не только в связи с несоблюдением требований RCRA, но и экологических стандартов, прописанных на уровне отдельных штатов и округов, зачастую более строгих по сравнению с нормами RCRA [132, 133].

Также в центре внимания оказалась проблема смешанных отходов – т. е. отходов, загрязненных как радиоактивными, так и химическими веществами. Пункт 105 FFCA вносил поправку в RCRA, согласно которой DOE было обязано в течение трех лет разработать и передать на рассмотрение EPA или иным регулирующим органам на уровне отдельных штатов, наделенным соответствующими полномочиями, «план разработки технологий по переработке всех видов смешанных отходов**» для каждой установки Министерства, которая либо производит, либо содержит такие отходы. Кроме того, от

* англ. Federal Facilities Agreement.

** отходы, загрязненные как радиоактивными, так и химическими веществами.

DOE требовалось предоставить регулятору сведения о реестре смешанных отходов, планы по разработке и внедрению технологий переработки, график выполнения работ, а также регулярно отчитываться о достигнутых в этой области результатах.

После утверждения такого плана EPA, между DOE EPA и регулирующим органом на уровне штата заключается соглашение, которое обычно называют «Соглашением о приведении федерального объекта в соответствие нормативным требованиям»*. В том случае, если в соглашении прописываются требования относительно соблюдения не только норм RCRA, но и положений Закона о Суперфонде, то их называют Трехсторонними соглашениями**. В соответствии с положениями RCRA, регулирующий орган на уровне штата может в судебном порядке привлечь DOE к ответственности за неисполнение требований, прописанных в соглашении (EPA сделать этого не может). Кроме того, в таких соглашениях обычно прописывают процедуры урегулирования споров, а также штрафные санкции в отношении DOE в случае нарушения установленных требований.

1.3.4. Первые шаги в реализации государственной программы DOE по ликвидации ядерного наследия

Авария на Чернобыльской АЭС 1986 года и последовавшие за ней проверки на ядерных установках США привлекли внимание общественности и политиков к проблемам, связанным со значительным загрязнением окружающей среды в результате эксплуатации установок и рисками, обуславливаемыми накопленными объемами отходов, и несовершенством системы обращения с РАО ядерного оружейного комплекса США. Эти вопросы оказались в центре внимания СМИ. Так, в конце 1988 года всего за три месяца газета Нью-Йорк Таймс опубликовала более 100 статей, посвященных расследованию различных случаев загрязнения окружающей среды и нарушения норм безопасности на установках DOE. В 1989 году Министерство энергетики США возглавил адмирал в отставке Джеймс Уаткинс, признавший необходимость принятия срочных мер по ликвидации ядерного наследия в стране. Первым шагом к решению поставленной задачи стало учреждение в составе DOE специального отдела, которому предстояло оценить масштаб радиоактивного и химического загрязнения на площадках Министерства и определить приоритетность проведения работ на различных объектах. Так, при Министерстве энергетики США было создано Экологическое управление (Office of Environmental Management, DOE-EM) (рис. 1.84).

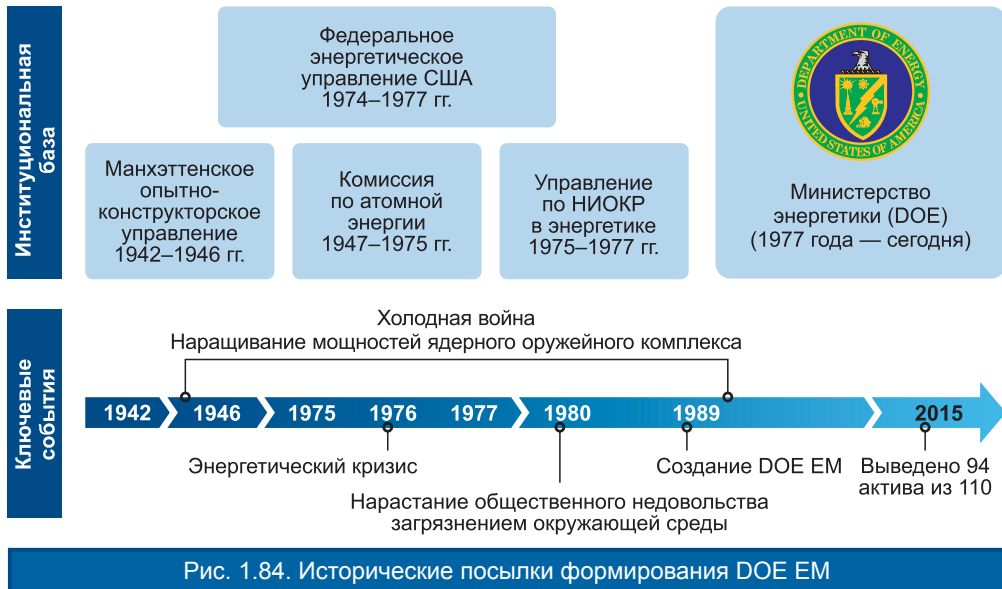
Функции Экологического управления Министерства энергетики США

На сегодняшний день DOE-EM ответственно за выполнение следующих основных задач:

- сооружение и эксплуатация установок для переработки жидких радиоактивных отходов из подземных резервуарных хранилищ с целью их приведения в стабильное состояние, позволяющее произвести окончательное захоронение таких РАО;
- обеспечение физической безопасности и стабильных условий для хранения ядерных материалов;
- организация безопасной транспортировки и захоронения трансурановых радиоактивных отходов и НАО;

* англ. Federal Facility Compliance Agreement.

** англ. Tri-party Agreement.



- организация работ по дезактивации и демонтажу ядерных установок, использование которых в дальнейшем не предусмотрено;
- организация работ по очистке почвы и грунтовых вод, подвергшихся радиоактивному или химическому загрязнению;
- планирование и организация всех необходимых мер, направленных на снижение уровня опасности, исходящего от объектов ядерного наследия, и завершение работ по очистке загрязненных территорий.

Таким образом, Управление получило активы от оборонных программ DOE и взяло на себя ответственность за выполнение полного цикла работ по очистке загрязненных территорий и выводу из эксплуатации. Следует еще раз подчеркнуть, что само понятие «ядерное наследие» юридически никак не закреплено (аналогичная ситуация сложилась и в Великобритании). Однако в отличие от Великобритании, в США государственным ядерным наследием считается только наследие холодной войны, поэтому все полученные DOE-EM активы относятся к военному сектору. Большинство активов были переданы целиком, частичная передача объектов была возможна как исключение. DOE-EM отвечает за полную очистку вмененных площадок: возведение необходимых зданий и сооружений, обращение с радиоактивными отходами, образующимися в процессе выполнения работ – также сфера ответственности DOE-EM (рис. 1.85).

Также следует отметить, что процесс передачи активов был преимущественно единовременным: около 75 % активов были переданы при создании DOE-EM, остальные – в течение последующих 5–10 лет. В то же время DOE-EM взяло на себя обязательство при необходимости выполнить соответствующие работы и на других государственных военных объектах, выведенных из эксплуатации (на момент передачи активов эти объекты были уже сняты с эксплуатации, а от DOE-EM требовалось лишь провести работы по очистке загрязненных территорий и выводу из эксплуатации). Территории, где проводились испытания ядерных бомб (в том числе атоллы), – также ответственность DOE-EM: на этих объектах реализуется программа мониторинга, а работ по очистке террито-

рий не предусмотрено вовсе. Тем не менее, исполнить свои обязательства перед операторами АЭС государство так и не смогло.

В части ОЯТ в США наблюдается неоднозначная ситуация, при которой государство не смогло выполнить обязательства, взятые на себя ранее. С 1977 года, после введения запрета на переработку ОЯТ в США, отработавшее топливо было признано ВАО, ответственность за окончательную изоляцию которых в пункте глубинного геологического захоронения была возложена на государство (рис. 1.86). Захоронение РАО в этом объекте планировалось начать еще в январе 1998 года. До момента создания такой установки ОЯТ подлежало размещению в пунктах сухого и мокрого хранения, расположенных на реакторных площадках.

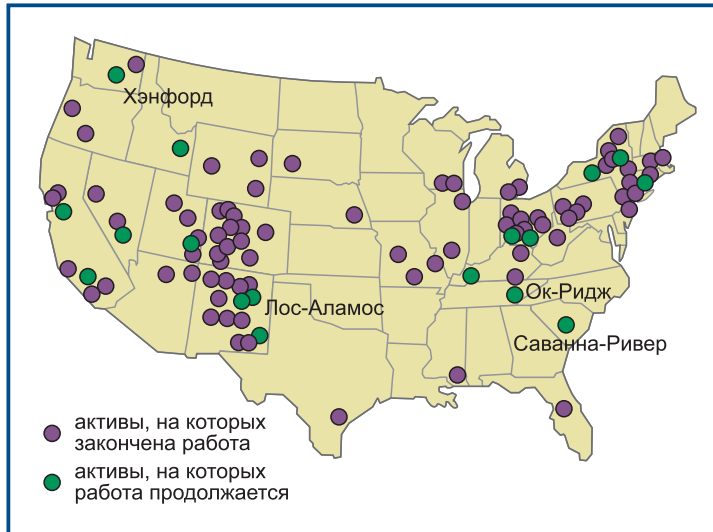


Рис. 1.85. Расположение активов, переданных DOE-EM

Финансирование работ по созданию пункта окончательной изоляции велось из специального Фонда ядерных отходов (англ. Nuclear Waste Fund), учрежденного на основании положений закона «О политике обращения с ядерными отходами». В соответствии с этим законом, операторы АЭС были обязаны уплачивать по 0,001 доллара за каждый кВт/ч проданной электроэнергии в Фонд, деньги из которого расходовались на осуществление программы работ по разработке проекта пункта глубинного геологического захоронения ОЯТ и ВАО, а также выбор и характеризацию площадки (проект Якка-Маунтин). В среднем в данный фонд ежегодно поступало около 750 млн долларов США. К 2014 году на счетах фонда находилось порядка 24 млрд долларов США, процент от которых приносил государственной казне США ежегодный доход в размере 1 млрд долларов США. На реализацию замороженного на сегодняшний день проекта Якка-Маунтин было потрачено еще около 9 млрд долларов США.

В 2013 году федеральный суд постановил прекратить DOE взимать сборы в фонд. В результате сложившейся ситу-

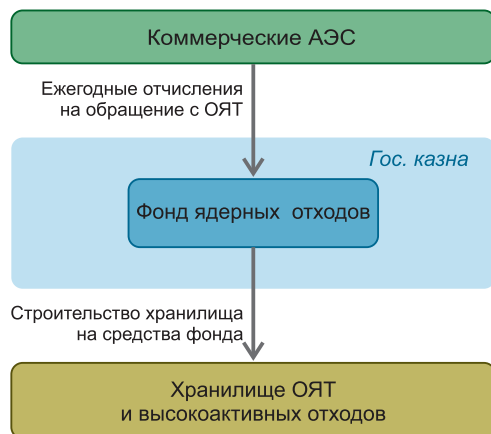


Рис. 1.86. Механизм обеспечения обязательств по ОЯТ

ации многие коммерческие компании подали в суд на DOE за невозможность выполнения собственных обязательств, и некоторые из них добились компенсации затрат на обращение с ОЯТ.

В целом сегодня работа с ОЯТ де-факто находится вне периметра деятельности DOE-EM (за исключением хранения государственного ОЯТ), хотя формально данный статус не зафиксирован.

Возвращаясь к программе ликвидации ядерного наследия, DOE-EM выполняет роль управляющей компании: Управление координирует работу специализированных подрядчиков. Иными словами, DOE-EM не выполняет непосредственные работы на активах, но координирует их, т. е. выбирает подрядчиков на проведение работ на каждом из активов, выдает финансирование, лицензии. При этом в США сотрудники Управления чаще вовлекаются в работу подрядчиков, что выражается, к примеру, в частом инспектировании площадок сотрудниками DOE.

Управление имеет сеть региональных представительств: всего в представительствах работает до 700 сотрудников, в головном офисе – около 200. Структура региональных представительств соответствует расположению ключевых площадок (рис. 1.87).

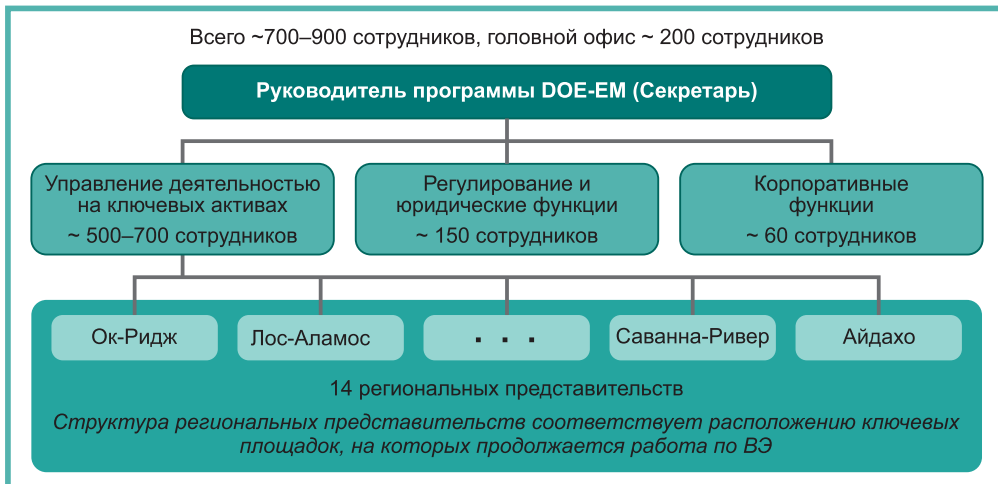


Рис. 1.87. Региональные представительства DOE-EM

Детальная организационная структура DOE-EM представлена на рис. 1.88. В региональных представительствах существует следующее разделение сотрудников по функциям: большинство (около 80 % сотрудников) занимаются управлением контрактами, 20 % – контролем безопасности и инспектированием. Количество сотрудников подрядчиков выше на порядки, чем количество сотрудников Управления в региональном представительстве, к примеру, в Ок-Ридже превышает примерно в 100 раз.

Следует отметить, что после окончания работ по очистке загрязненных площадок и выводу из эксплуатации активы обычно передаются Управлению по обращению с наследием (Legacy Management, LM), на который возложена ответственность за проведение окончательной реабилитации территорий с целью их подготовки к использованию в иных целях.

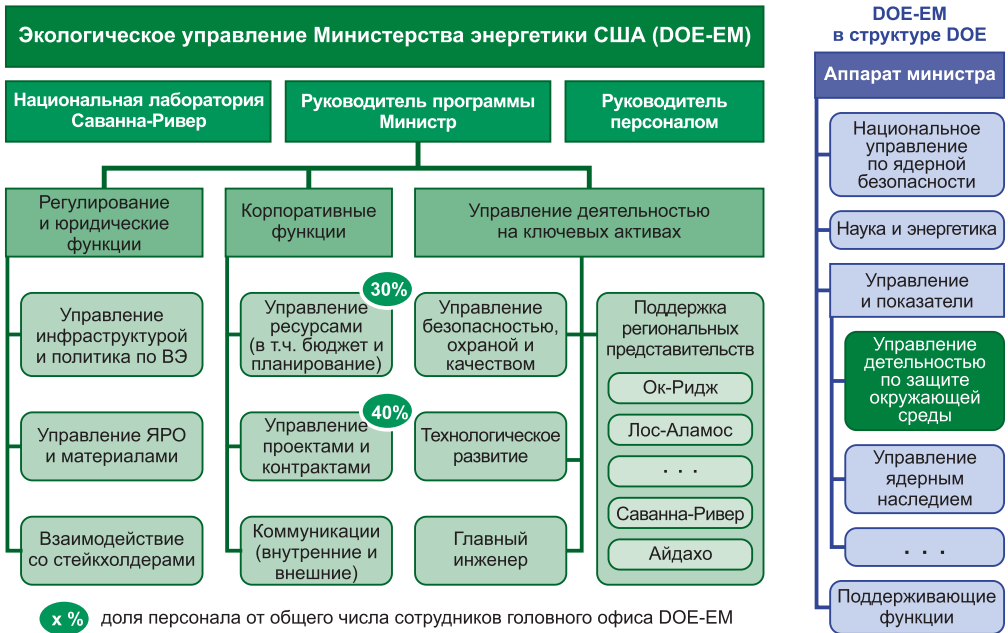


Рисунок 1.88. Организационная структура DOE-EM

Для отслеживания результатов своей деятельности DOE-EM руководствуется системой ключевых показателей эффективности. На рис. 1.89 представлены основные показатели операционной деятельности с указанием целевых значений и результатов за 2015 год. На основании представленных данных можно утверждать, что цели выполнены практически полностью.

	% достижения цели	Цель	Результат
Количество выведенных реакторов (Liquid waste tanks closed), шт.	93%	15	14
Объем ВАО, подготовленных к утилизации, кол-во контейнеров	96%	4 405	4 241
Объем захороненных трансурановых отходов, м ³	97%	102 026	99 179
Количество ядерных объектов, по которым завершён ВЭ, шт.	99%	153	151
Количество зараженных вспомогательных объектов, по которым завершён ВЭ, шт.	101%	563	566
Количество вспомогательных промышленных объектов, по которым завершён ВЭ, шт.	100%	2 107	2 105
Количество восстановленных участков, шт.	99%	8 035	7 945

Рис. 1.89. Основные показатели эффективности работы DOE-EM: результаты за 2015 год

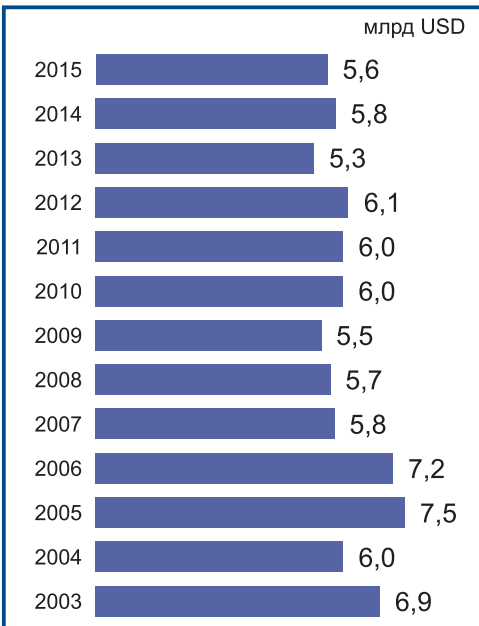


Рис. 1.90. Годовой бюджет DOE-EM

Финансирование деятельности DOE-EM осуществляется из государственного бюджета, а его размер согласовывается ежегодно Конгрессом. Обычно полученный объем финансирования соответствует заявленному на 80–90%, т. е. различия между ожидаемым и реальным финансированием, как правило, незначительны. На рис. 1.90 представлена динамика изменения объема финансирования деятельности DOE-EM за последние годы.

Планирование бюджета происходит на трёх уровнях: изначально была разработана стратегия финансирования до 2070 года, исходя из которой составляются планы на 5–10 лет, а на ежегодной основе выделяется бюджетное финансирование. Процесс формирования и утверждения годового бюджета инициируется на уровне площадок и завершается согласованием в Конгрессе. Шесть

этапов формирования годового бюджета представлены на рис. 1.91.

В ходе своей работы DOE-EM сотрудничает со множеством различных организаций. Всего можно выделить три ключевых категории организаций, с которыми Управление регулярно осуществляет взаимодействие: прочие управления в рамках самого Министерства энергетики, прочие государственные институты и подрядчики на активах.



Рис. 1.91. Процесс формирования годового бюджета

Общая схема взаимодействия представлена на рис. 1.92.

Взаимодействие с прочими управлениями Министерства энергетики происходит по двум ключевым направлениям: при принятии и при передаче активов. Принятие активов происходит от оборонных программ. Передача активов, по которым завершены работы по выводу из эксплуатации, происходит преимущественно с целью реабилитации загрязненных территорий и обеспечения их дальнейшего использования в новых целях (например, для создания заповедника), либо с целью дальнейшего целевого использования в рамках других программ DOE (например, НИОКР).

Взаимодействие с подрядчиками происходит на двух уровнях. Первый, стратегический: непосредственно выбор генерального подрядчика, выделение финансирования программы на активе осуществляется централизованно из головного офиса в Вашингтоне. Второй, операционный, уровень осуществляется на местах: региональные представительства взаимодействуют с подрядчиками в текущем режиме, осуществляют промежуточный контроль деятельности.

В контексте вопросов регулирования национальный оператор наследия США должен соответствовать требованиям регуляторных органов (как в аспектах деятельности, специфичных только для атомной промышленности, так и в более широком плане – с точки зрения исполнения пенсионных, трудовых и прочих законов). В этом отношении ключевая роль в регулировании деятельности Управления отведена двум ведомствам: Комитету по ядерной безопасности (Nuclear Safety Board) и Агентству по защите окружающей среды (EPA). Управляющие органы на уровне штатов и муниципальных образований также регулируют границы деятельности Управления на местах.

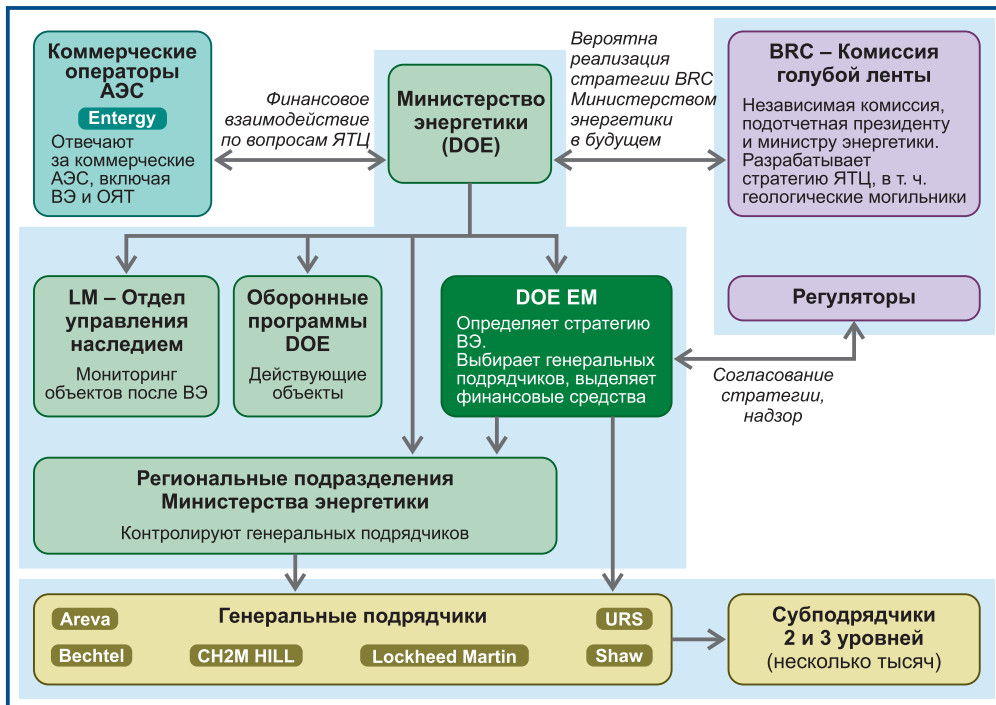
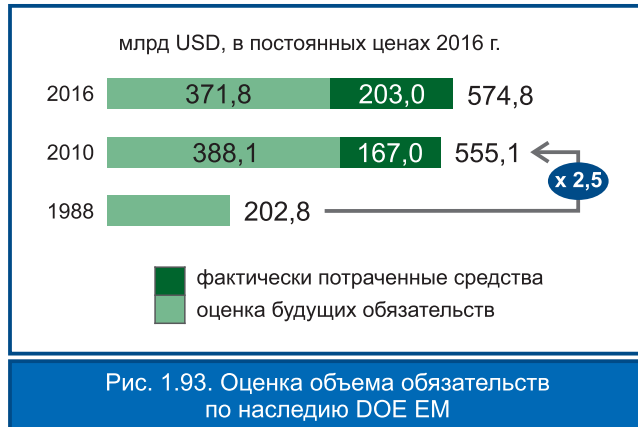


Рис. 1.92. «Экосистема» организаций во взаимодействии с DOE-EM

1.3.5. Основные компоненты ядерного наследия США

Первая редакция Всеобъемлющего плана по очистке загрязненных площадок Министерства энергетики США была опубликована в 1989 году. На DOE-EM была возложена ответственность за проведение работ на 134 площадках, в прошлом связанных с добычей урана и переработкой радиоактивных материалов в военных целях, ядерными военными НИОКР и испытаниями, а также производством ядерного оружия. На тот момент масштабы загрязнения и возможные затраты на проведение работ только предстояло оценить. Переоценка объема финансовых обязательств по наследию проводилась неоднократно, и по последним данным, размер будущих обязательств был оценен на уровне порядка 372 млрд долларов (рис. 1.93).

Темпы реализации программы ускорились после вступления в силу FFCA – закон обязывал DOE сотрудничать с властями штатов, что позволило добиться значительного прогресса в развитии понимания масштабов загрязнения, а также характеристики объемов и активности отходов, накопленных на отдельных площадках.



В целях содействия развитию сотрудничества между DOE и властями штатов Центр по исследованию передовых технологий при Национальной ассоциации губернаторов США учредил специальную рабочую группу по федеральным объектам (Federal Facilities Task Force, FFTF). В состав группы входило по два представителя от штата, назначаемых губернаторами: один из них отвечал за вопросы технического и нормативно-правового характера, второй – за соблюдение положений политики штата.

За три года совместной работы DOE с властями штатов и при содействии FFTF были разработаны планы по обращению со смешанными отходами для всех площадок Министерства. После чего FFTF продолжила свою работу, изучая проблемы технического и нормативно-правового характера, возникающие в ходе осуществления работ по очистке загрязненных территорий на разных площадках ядерного оружейного комплекса США.

Общая программа DOE по ликвидации объектов ядерного наследия была разделена на несколько подпрограмм [134, 135]:

- подпрограмма по восстановлению качества окружающей среды, включающая деятельность по очистке загрязненной почвы и грунтовых вод, а также дезактивацию и ликвидацию зданий, сооружений и резервуарных хранилищ. На начальном этапе реализации программы в ведении DOE находилось свыше 3 700 площадок, на которых требовалось проведение работ по очистке почвы и грунтовых вод, а работы по дезактивации и сносу были запланированы для более чем 500 строительных конструкций. На выполнение работ в рамках этой подпрограммы планировалось потратить около 28 % от общего бюджета программы,

- подпрограмма, включающая весь комплекс работ по обращению с отходами: переработка, хранение, транспортировка и захоронение отходов (как тех, что образуются в результате текущей эксплуатации установок, так и тех, что образуются в результате осуществления работ в рамках первой подпрограммы). На реализацию этой подпрограммы расходуется чуть более 49 % от общего бюджета программы,
- НИОКР, разработка новых технологий в области вывода из эксплуатации, очистки загрязненных компонентов окружающей среды и т. п. (5 % бюджета программы),
- обращение с ядерными материалами, укрепление строительных конструкций, перевод объектов в состояние, пригодное для проведения очистных работ, репрофилирования или ликвидации и т. п. (10 % бюджета программы),
- выполнение транспортных операций, обеспечение физической безопасности (8 % бюджета программы).

Первые более или менее реалистичные оценки объема обязательств DOE по ликвидации ядерного наследия были опубликованы в 1997 году [136]. На рис. 1.94 представлена количественная оценка основных компонентов ядерного наследия США.

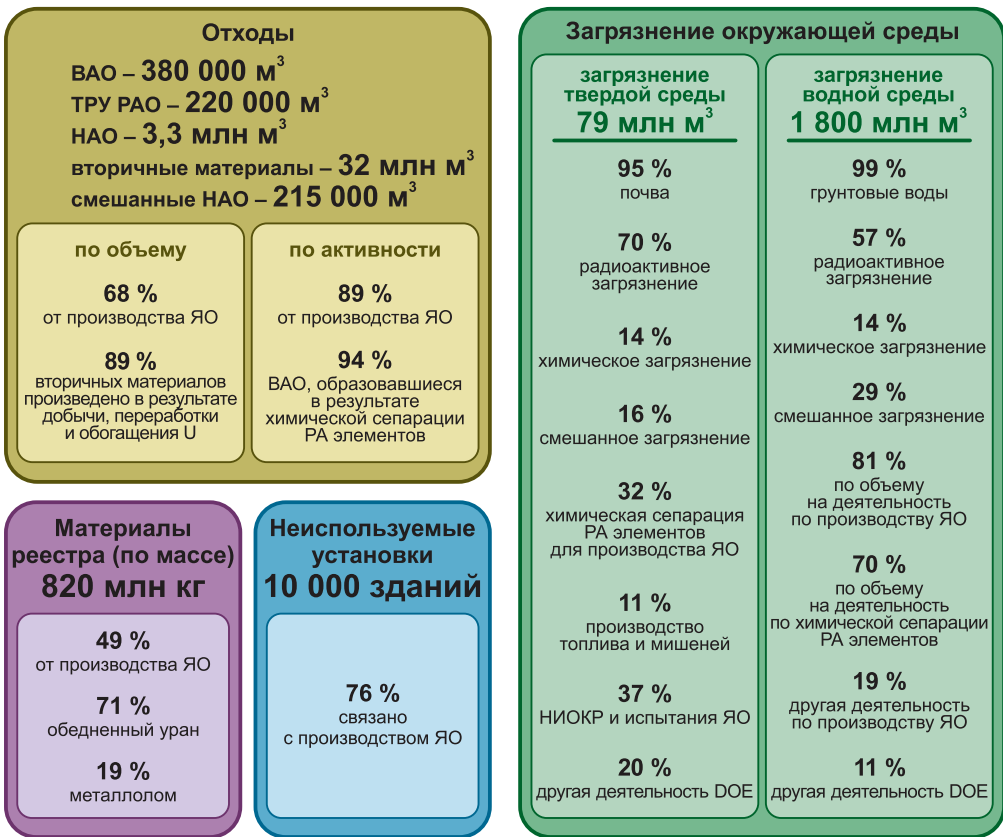


Рис. 1.94. Оценка основных компонентов ядерного наследия по состоянию на 1997 г. [136]

Всего специалистами DOE было выделено четыре группы таких компонентов:

- отходы, в том числе ВАО, трансурановые РАО, низкоактивные РАО, другие опасные отходы, а также вторичные материалы, признаваемые РАО в соответствии с частью 11 закона «Об атомной энергии» США от 1954 года и последующими поправками к нему;
- загрязненные компоненты окружающей среды, в том числе почва, грунтовые и поверхностные воды, донные отложения, загрязненный строительный мусор, обломочные породы и другие материалы;
- остановленные ядерные установки, в прошлом использовавшиеся для производства ядерного оружия, для которых дальнейшая эксплуатация не предусмотрена и планируется проведение работ по дезактивации и выводу из эксплуатации;
- материалы реестра, включающие в себя все материалы, которые нельзя отнести к категории РАО, находящиеся в хранилищах Министерства энергетики, которые на данный момент не используются и не будут использованы в течение ближайшего года.

По оценкам специалистов DOE, к отходам ядерного наследия, находящимся в ведении Министерства, может быть отнесено около 24 млн м³ твердых и жидких отходов суммарной активностью порядка $3,33 \cdot 10^{19}$ Бк. В том числе DOE отвечает за обращение с еще 12 млн м³ отходов суммарной активностью около $4,07 \cdot 10^{10}$ Бк, источником образования которых является деятельность, не связанная с разработкой и производством ядерного оружия [136]

Высокоактивные отходы

Согласно терминологии Министерства энергетики США ВАО представляют собой высокорadioактивный материал, образующийся в результате переработки отработавшего топлива, включая жидкие отходы, полученные непосредственно в результате переработки ОЯТ, а также любые твердые отходы, полученные из жидких, содержащие смесь трансурановых отходов и продуктов деления, присутствующих в таких концентрациях, при которых требуется окончательная изоляция РАО (геологическое захоронение).

При этом большая часть ВАО DOE находится на хранении в виде сильноокислых или сильнощелочных растворов, а также соляного сгустка и шлама и помимо радионуклидов также содержит соединения токсичных тяжелых металлов и органические растворители (например, гексон, трибутилфосфат). Из общего объема ВАО в 380 000 м³, около 92 % образовались в результате осуществления программ по производству ядерного оружия*.

При суммарной активности всех ВАО, находящихся в ведении DOE ($3,6 \cdot 10^{19}$ Бк, около 90 % активности) приходится на ВАО, образовавшиеся в результате производства ядерного оружия (рис. 1.95).

При этом 99 % активности, присутствующей на данный момент в ВАО, обусловлено короткоживущими радионуклидами с периодом полураспада менее 50 лет. Что

* В основе приведенных данных по объемам и активности лежат результаты исследований DOE, опубликованные в 1995 году. Environmental Management Waste Disposal Facility.

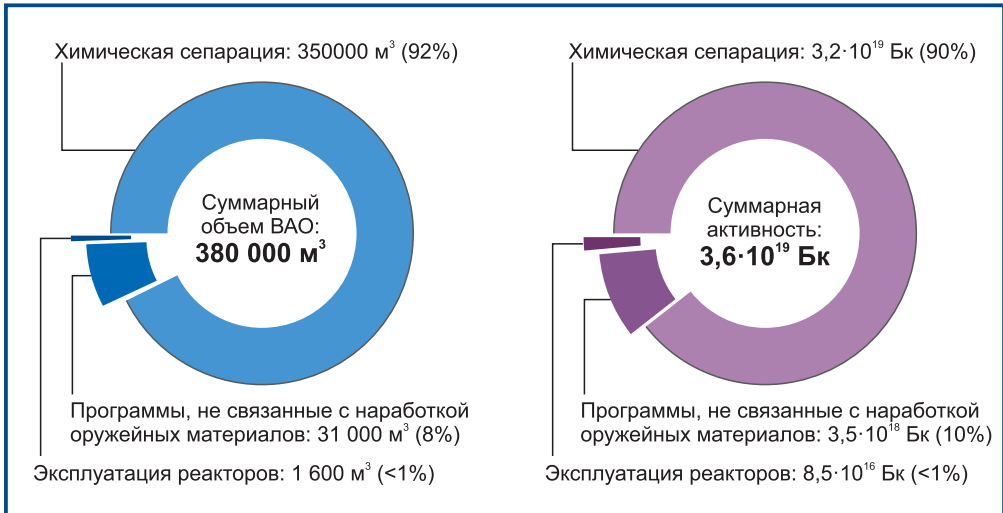


Рис. 1.95. Основные источники образования ВАО, находящихся в ведении DOE

касается источника образования, то большая часть ВАО и по активности и по объему образовалась в результате осуществления операций по сепарации ядерных материалов.

Программы DOE по обращению с ВАО реализуются на четырех площадках: Хэнфорд, Национальная техническая лаборатория в Айдахо, Саванна-Ривер и Уэст Велли (рис. 1.96).

Подробные данные о накопленных ВАО и способах обращения с ними в Хэнфорде и Саванна-Ривер приведены в § 1.1.

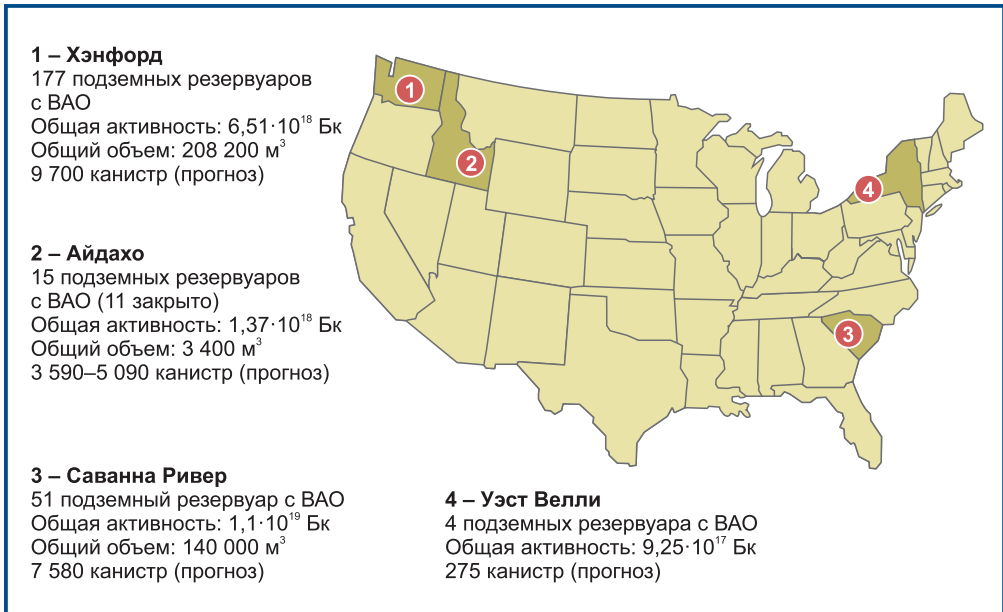


Рис. 1.96. Основные источники образования ВАО, находящихся в ведении DOE

Национальная техническая лаборатория в Айдахо (НТЛА)

ВАО Национальной Технической Лаборатории в Айдахо представлены щелочными растворами и кальцинированными ТРО. Щелочные растворы хранятся в подземных резервуарах, а кальцинированные ТРО, являющиеся побочным продуктом переработки ЖРО, размещены в бочках. Более 90 % радиоактивности в Айдахо приходится на ТРО при средней удельной активности около $4,4 \cdot 10^{14}$ Бк/м³. Средняя удельная активность ЖРО – всего $1,1 \cdot 10^{13}$ Бк/м³ [136].

Уэст Велли

ВАО Уэст Велли также находятся в ведении Министерства энергетики и относятся к объектам ядерного наследия, хотя образовались и не в результате осуществления военных программ. Здесь с 1966 по 1972 годы действовал единственный в США завод по переработке коммерческого ОЯТ. ВАО Уэст Велли представлены щелочными растворами, шламом и ионно-обменными смолами. По объему 90 % ВАО находятся в жидкой форме (удельная активностью порядка $6,3 \cdot 10^{13}$ Бк/м³), при этом 90 % активности ВАО Уэст Велли приходится на ТРО с удельной активностью $5,6 \cdot 10^{15}$ Бк/м³.

Стратегия обращения с ВАО и достигнутые результаты

Стратегия DOE в отношении ВАО, размещенных в резервуарных хранилищах, заключается в их извлечении и разделении высокоактивных и низкоактивных фракций, отверждении высокоактивной фракции в целях ее приведения в соответствие с критериями приемлемости для геологического захоронения, а также приведении НАО в состояние, приемлемое для их окончательной изоляции. Если в ходе такой обработки из НАО будут удалены все химически опасные соединения, то эти отходы разрешается окончательно изолировать в пункте захоронения, находящемся непосредственно на площадке. В противном случае НАО подлежат захоронению в качестве смешанных отходов на полигонах, включенных в программу RCRA.

В Саванна-Ривер установка по переработке отходов оборонной промышленности (DWPF) в зоне S производит иммобилизацию высокоактивной пульпы и заключает отходы в матрицу из боросиликатного стекла. Установка была введена в строй в 1996 году и к окончанию своего проектного срока службы в 2025 году должна произвести более 7 500 канистр с отверженными отходами. В дополнение к комплексу по переработке соляных отходов на территории Саванна-Ривер действует установка Салтстоун, производящая переработку и стабилизацию соляного фильтрата путем его смешивания с цементным раствором. Захоронение иммобилизованных таким образом отходов производится непосредственно на промышленной площадке данной установки.

Кроме того, в Саванна-Ривер имеется два пункта захоронения: один для НАО вместимостью 30 500 м³ и другой для САО вместимостью 7 300 м³. Согласно текущим оценкам оба пункта захоронения будут полностью заполнены не ранее 2050 года.

В Хэнфорде полным ходом идет строительство завода по обработке и иммобилизации НАО и ВАО из резервуарных хранилищ. Комплекс стоимостью свыше 12,3 млрд долларов планируется ввести в эксплуатацию уже в 2019 году. На рис. 1.97 показана схема обращения с ВАО из резервуарных хранилищ Хэнфорда [137].

В Айдахо уже сооружена установка по переработке натрийсодержащих ВАО стоимостью более 550 млн долларов; на данный момент проводятся пуско-наладочные работы и испытания, хотя согласно утвержденному графику выполнения работ установка

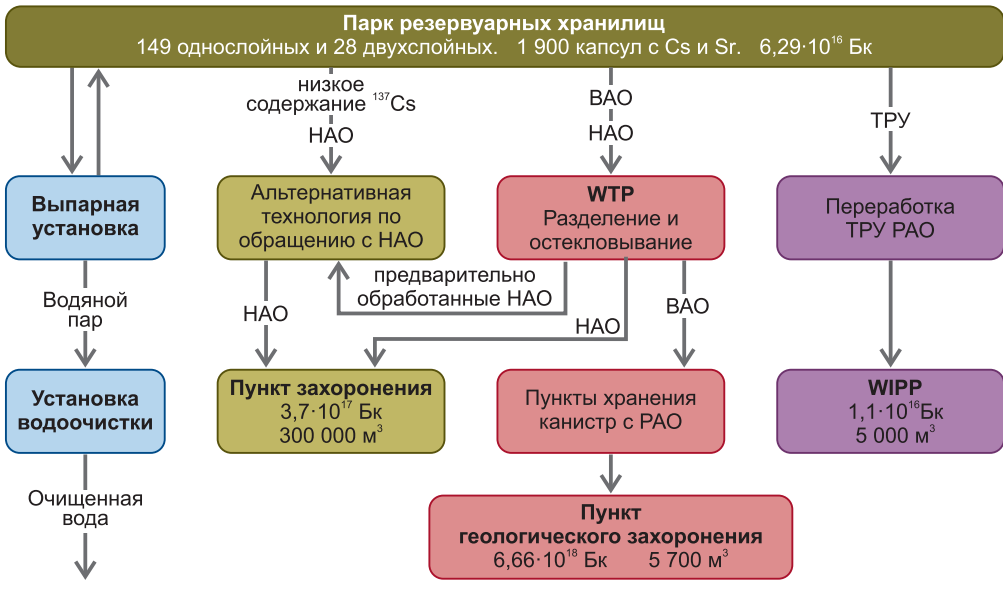


Рис. 1.97. Схема обращения с ВАО из подземных резервуарных хранилищ (Хэнфорд), находящихся в ведении DOE

должна была заработать 30 сентября 2016 года. В случае если установка не будет введена в эксплуатацию в течение полугода, DOE придется уплатить штраф в размере свыше 100 000 долларов (по 3 600 долларов в день), а дальнейшие задержки с реализацией программы переработки РАО будут облагаться еще большим штрафом [138, 139].

На сегодняшний день в ведении DOE остается около 333 000 м³ ВАО. С момента запуска программы иммобилизовано было всего лишь около 20 000 м³ высокоактивных отходов [140].

Так, например, в Саванна-Ривер за более чем 20 лет реализации программы DOE по активности было переработано менее 3 % ВАО. В 2002 году, согласно планам Министерства, одна канистра остеклованных ВАО могла содержать около $5,55 \cdot 10^{15}$ Бк активности, что позволило бы соблюсти критерии приемлемости для захоронения в Якка-Маунтин. Однако к 2006 году канистра остеклованных ВАО в среднем содержала не более $1,81 \cdot 10^{14}$ Бк активности. При этом мониторинг состояния и техническое обслуживание оставшихся подземных резервуаров с ВАО обходится Министерству в более чем 500 млн долларов в год [129]. Суммарные затраты на завершение данного проекта оцениваются на уровне 190–244 млрд долларов.

Что касается возможностей для окончательного захоронения ВАО, то в октябре 2014 года команда экспертов под руководством Отдела по атомной энергетике DOE подготовила отчет на тему: «Оценка различных вариантов захоронения ВАО и ОЯТ, находящихся в ведении Министерства энергетики США», т. е. ВАО, образующихся в результате осуществления военных программ, и ОЯТ с промышленных реакторов-работчиков плутония, а также атомных подводных лодок и кораблей с ядерными силовыми установками. Согласно текущим оценкам, к 2035 году в США будет накоплено около 33,5 тыс. м³ таких РАО, что составит 15 % от суммарного объема ВАО и ОЯТ, подлежащих захоронению [141].

Начиная с середины 1980-х гг., все ВАО и ОЯТ вне зависимости от их происхождения планировалось разместить в одном или нескольких пунктах геологического захоронения. В отчете DOE наряду с принятой стратегией захоронения был проанализирован альтернативный вариант, предусматривающий захоронение оборонных РАО отдельно от коммерческих. Выводы экспертов указывают на техническую осуществимость подобной концепции захоронения РАО. При этом на захоронение военных РАО не будут распространяться требования Закона о ядерных отходах от 1982 года. Тем не менее, для строительства и ввода в эксплуатацию такого объекта потребуется получить лицензию NRC. Кроме того, в отношении пункта захоронения будут действовать требования Закона 1982 года в части привлечения властей штата и местных жителей к процессу выбора площадки.

Комиссия рекомендовала Министерству энергетики приступить к реализации поэтапной адаптивной стратегии, направленной на разработку проекта отдельного пункта геологического захоронения для оборонных ВАО и ОЯТ военных реакторов. В этом пункте захоронения может быть размещена часть ОЯТ подводных лодок и кораблей с ядерными силовыми установками.

Эксперты отмечают, что обеспечить безопасность захоронения военных РАО не столь проблематично, как в случае коммерческих РАО. Следовательно, разработка проекта пункта захоронения и сам процесс лицензирования будут менее трудоемкими. Кроме того, полученный технический и организационный опыт пригодятся при реализации проекта по созданию национального пункта захоронения коммерческих РАО. Также в целях обеспечения гибкости процесса эксперты рекомендовали изучить возможность захоронения малых форм отходов в глубинных скважинах, а не в геологическом пункте захоронения [141]. В марте 2015 года DOE официально заявило о своем намерении захоронивать военные ОЯТ и ВАО отдельно от коммерческого ОЯТ [142].

Трансурановые РАО

Согласно документу DOE 435.1 «Об обращении с РАО», трансурановые РАО – это радиоактивные отходы, содержащие альфа-излучающие трансурановые элементы с периодом полураспада более 20 лет, чья активность на момент проведения радиоанализа превышает 3700 Бк/г.

ТРУ РАО делятся на два класса. Первый класс – ТРУ РАО, требующие дистанционного обращения, мощность дозы от которых превышает 2 мЗв/ч. Второй класс – ТРУ РАО, допускающие контактное обращение, с мощностью дозы меньше 2 мЗв/ч. Большая часть ТРУ РАО образовалась в процессе производства ядерного оружия и содержит плутоний.

Практически единственным источником образования таких РАО являлись операции по производству компонентов плутониевого оружия, переработки плутоний-содержащего промышленного металлолома и списанного оружия, а также химической сепарации этого материала. Значительные объемы ТРУ РАО также содержат и другие опасные токсичные компоненты и регулируются в соответствии с положениями RCRA (смешанные ТРУ РАО), а также большие количества полихлорированных дифенилов, подпадающих под действие закона «О контроле над токсическими веществами»*.

* англ. Toxic Substances Control Act.

Следует отметить, что разделения между трансурановыми отходами и обычными РАО не существовало вплоть до 1970 года. До этого ТРУ РАО, как правило, смешивали с НАО и захоранивали в приповерхностных могильниках. С 1970 года такая практика была прекращена, и ТРУ РАО стали направлять на хранение с возможностью повторного извлечения – их помещали в металлические бочки или ящики и хранили на открытых площадках или в приповерхностных сооружениях. Часть ТРУ РАО была захоронена в Окриджской гидроразрывной установке (табл.1.39, рис. 1.98).

Табл. 1.39. Содержание ТРУ РАО на основных площадках (по данным 1995 г) [136]

Площадка	Связаны с созданием оружия		Не связаны с созданием оружия	
	Объем, м ³	Активность, Бк	Объем, м ³	Активность, Бк
Хэнфорд	55 000	5,6·10 ¹⁵	8 800	8,9·10 ¹⁴
Айдахо	53 000	8,5·10 ¹⁵	4 500	7,4·10 ¹⁴
Лос-Аламос	14 000	2,1·10 ¹⁴	0	0
Саванна-Ривер	4 900	1,1·10 ¹⁵	0	0
Ок-Ридж	5	2,6·10	170	8,6·10 ¹²
Сандийская НЛ		3,7·10 ¹⁰	0	0
Площадки, где не производилась разработка ядерного оружия	0	0	1 350	2,4·10 ¹⁶
Ок-Ридж, гидроразрывная установка	290	7,4·10 ¹⁴	9 200	2,4·10 ¹⁶

С 1999 года основная часть ТРУ РАО подлежит захоронению в Опытной установке по изоляции ТРУ РАО в Нью-Мексико (WIPP). За последние 15 лет на эту площадку было выполнено свыше 11 800 поставок ТРУ РАО. В итоге суммарный объем захороненных в WIPP ТРУ РАО* составил 90 900 м³ [143]. После произошедшего в 2014 году инцидента все операции по захоронению РАО в WIPP были приостановлены. Ожидается, что установка сможет вновь принимать отходы в начале 2017 года.

Низкоактивные РАО

Постановление DOE 435.1 «Об обращении с РАО» определяет НАО как РАО,

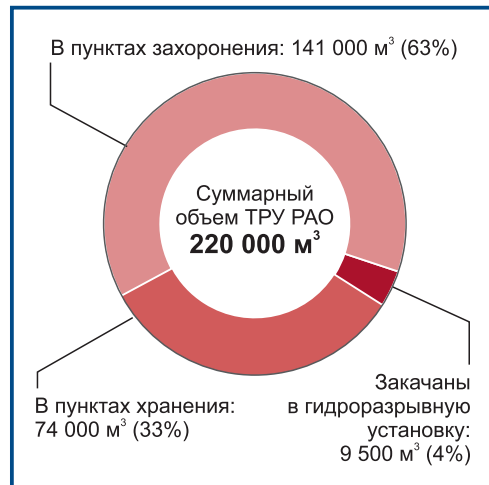


Рис.1.98. Объемы ТРУ РАО, находящихся в ведении Министерства энергетики

* по состоянию на декабрь 2014 года.

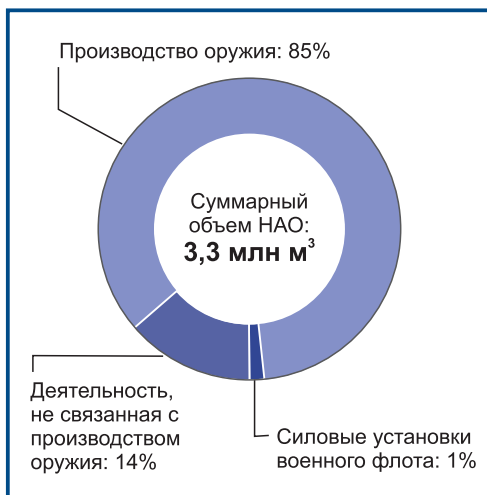


Рис. 1.99. Источники образования НАО, находящихся в ведении DOE

не являющиеся ВАО, ТРУ РАО, ОЯТ или природным ураном и торий-содержащим вторичным материалом (рис. 1.99).

Министерство энергетики разделяет низкоактивные отходы на НАО, допускающие контактное обращение, и НАО, требующие дистанционного обращения, т. к. в некоторых НАО концентрация альфа-излучающих трансурановых радионуклидов превышает 3700 Бк/г. НАО, содержащие полихлорированные дифенилы, относят к категории смешанных низкоактивных отходов. Кроме того, Министерство энергетики относит к НАО ряд радиоактивных материалов природного происхождения и материалов, образующихся в результате работы ускорителей.

Министерство энергетики захоранивает большинство твердых НАО в приповерхностных могильниках на пяти площадках: в Хэнфорде, Айдахо, Лос-Аламосе, Невадском полигоне и в Саванна-Ривер. Перед захоронением жидкие НАО, как правило, переводят в стабильную форму. Такие операции обычно осуществляются непосредственно на тех площадках, где отходы образовались.

Вторичные материалы

Под вторичными материалами Министерство энергетики понимает хвостохранилища или отходы, произведенные путем экстракции или концентрирования урановой или ториевой руды, перерабатываемой в первую очередь с целью получения первичного материала (т. е. урана или тория). Источником образования практически всех РАО этой категории стала деятельность, связанная с добычей урановой руды и ее обогащением. Большая часть таких РАО состоит из однородных частиц, напоминающих по своей консистенции песок или глину. Сами хвостохранилища после извлечения урановой руды остаются радиоактивными из-за высокого содержания альфа-излучающего урана, ²³⁰Th, ²²⁶Ra и дочерних продуктов распада, а удельная радиоактивность хвостохранилищ может превышать 37 Бк/г. Кроме того, дочерний продукт распада радия – радон – может представлять значительную опасность при вдыхании загрязненного воздуха и попадании частиц в легкие, что влечет за собой разрушение клеток легких. Также вторичный материал может содержать небольшие концентрации таких токсичных веществ, как хром, свинец, молибден и ванадий.

Реестр вторичных материалов, находящихся в ведении Министерства энергетики, насчитывает порядка 32 млн м³ РАО. Около 65 % образовалось в результате осуществления программ по наработке оружейных материалов, 27 % – приходится на реализацию программы по разработке ядерных силовых установок для ВМС США, а оставшиеся 8 % – на реализацию деятельности, не связанной с созданием ядерного оружия (рис. 1.100).

К настоящему моменту работы по рекультивации завершены на всех площадках со вторичными материалами, находящихся в ведении DOE (табл. 1.40).



Хвостохранилища обычно представляют собой шламообразную смесь, размещенную в крупных бассейнах. Жидкая фаза хвостохранилищ, которая либо испаряется, либо просачивается в почву, может содержать порядка 288 Бк/л ²²⁶Ra; 810 Бк/л ²³⁰Th и около 0,01 % урана. Сухое хвостохранилище обычно содержит около 85 % радиоактивности, обнаруживаемой в необработанной урановой руде. Высушенный шлам периодически удаляют из бассейнов и хранят в виде громадных отвалов. При проведении работ по рекультивации сухие хвостохранилища из бассейнов и других зон выдержки, а также выветренные хвостохранилища стабилизируют и помещают в специальные поверхностные сооружения, которые затем закрывают слоем прочного материала, предотвращающего дальнейшую эрозию. В этом заключается основное отличие между подходами, применяемыми в случае обращения с вторичным материалом и другими видами отходов, которые обычно хранят или захоранивают в контейнерах или канистрах.

Табл. 1.40. Объемы вторичных материалов, находящиеся на различных площадках DOE [136]

Площадка	Штат	От производства ядерного оружия, м ³	От деятельности, не связанной с ядерным оружием, м ³	Работы завершены
Falls City	Техас	2 900 000	1 500 000	1994 год
Grand Junction Mill Tailing Site	Колорадо	2 300 000	1 200 000	1994 год
Old Rifle & New Rifle	Колорадо	2 100 000	1 100 000	1997 год
Ambrosia Lake	Нью-Мексико	1 900 000	1 000 000	1995 год
Mexican Hat	Юта	1 400 000	750 000	1995 год
Salt Lake City	Юта	1 400 000	720 000	1989 год
Durango	Колорадо	1 300 000	670 000	1991 год
Riverton	Вайоминг	900 000	480 000	1990 год
Shiprock	Нью-Мексико	800 000	420 000	1987 год
Monument Valley	Аризона	470 000	250 000	1994 год

Площадка	Штат	От производства ядерного оружия, м ³	От деятельности, не связанной с ядерным оружием, м ³	Работы завершены
Lakeview	Орегон	460 000	250 000	1990 год
Tuba City	Аризона	390 000	210 000	1990 год
Gunnison	Колорадо	360 000	190 000	1995 год
Naturita	Колорадо	270 000	150 000	1998 год
Green River	Юта	190 000	100 000	1990 год
Spook	Вайоминг	160 000	84 000	1989 год
Canonsburg	Пенсильвания	110 000	60 000	1986 год
Lowman	Айдахо	64 000	34 000	1992 год
Maybell	Колорадо	1 700 000	930 000	1998 год
Monticello Remedial Action Plan	Юта	1 300 000	690 000	1999 год
Slick Rock Union Carbide & North Continent	Колорадо	320 000	120 000	1997 год
Niagara Falls Storage Site	Нью-Йорк	200 000	0	1987 год
Weldon Spring Site	Миссури	160 000	0	2001 год
Bowman	Северная Дакота	64 000	34 000	1998 год
Bellfield	Северная Дакота	29 000	15 000	1997 год
Middlesex Sampling Plant	Нью-Джерси	17 000	9 300	1987 год
Edgemont Vicinity Properties	Южная Дакота	15 000	8 000	1989 год
Fernald Environmental Management Project	Огайо	11 000	0	2007 год
Grand Junction Projects Office	Колорадо	690	370	2001 год
Другие площадки ЯОК		0	56 000	

1.3.6. Очистка загрязненных компонентов окружающей среды: почва, донные отложения, грунтовые воды

Вторым направлением работ, осуществляемых Министерством энергетики США в рамках программы по ликвидации ядерного наследия, является очистка компонентов окружающей среды от радиоактивных и химически токсичных веществ, поступивших в почву, донные отложения, грунтовые и поверхностные воды в результате осуществления прошлой деятельности по производству ядерного оружия и проведения сопутствующих НИОКР и испытаний. В результате происходивших в прошлом аварий образовалось множество небольших участков с локальным загрязнением, в то время как многолетний плановый сброс технологических ЖРО привел к загрязнению куда больших по площади участков.

Еще одним источником загрязнения становились подземные резервуары-хранилища ЖРО, бочки и контейнеры с отходами, потерявшие герметичность, утечки из которых приводили к загрязнению почвы и грунтовых вод. Дополнительным источником загрязнения также становились непредвиденные проливы токсичных материалов, происходившие в ходе выполнения различных технологических операций. Также следует отметить, что в результате прошлой деятельности загрязнению подверглись не только сами промышленные площадки ядерного оружейного комплекса, но и их окрестности.

Загрязнение почвы и грунтовых вод на территориях, прилегающих к промышленным площадкам, было зафиксировано в Ферналде, Хэнфорде, Канзасе, Ок-Ридже, Маунде, Саванна-Ривер, Национальных лабораториях в Айдахо, Лос-Аламосе, Брукхейвене и др.

Согласно оценкам DOE, в общей сложности загрязнению подверглось около 75 млн м почвы и свыше 1,8 млрд м грунтовых вод. При этом наиболее загрязненными были признаны пять площадок DOE: Хэнфорд, Саванна-Ривер, Ок-Ридж, Роки-Флэтс и Национальная лаборатория в Айдахо (табл. 1.41, стр. 206) [144].

По самым скромным оценкам в ближайшие годы затраты DOE на проведение работ по восстановлению качества окружающей среды могут превысить 15 млрд долларов.

Выбор той или иной технологии или системы очистки для конкретной площадки определяется целым рядом факторов. Он зависит, к примеру, от перечня загрязняющих веществ и их концентраций, геологических характеристик площадки, глубины залегания грунтовых вод, размеров ареала загрязнения и т. п. Все существующие на сегодняшний день технологии реабилитации и очистки загрязненных компонентов окружающей среды можно разделить на две группы:

- методики очистки «на месте»;
- методики очистки «вне площадки».

Первые обеспечивают очистку без предварительного удаления загрязненных компонентов окружающей среды с территории площадки, в то время как очистка «вне площадки» предполагает извлечение загрязненного грунта, донных отложений или воды с их последующим захоронением на другой площадке и/или обработкой с помощью установок, расположенных на поверхности.

Табл. 1.41. Объемы загрязненных грунтовых вод и почвы по пяти основным площадкам ЯОК США [144]

Площадка	Примеры основных загрязняющих веществ	Объемы загрязненных грунтовых вод, м ³	Объемы загрязненной почвы, м ³
Саванна-Ривер	трихлорэтилен, тетрахлорэтилен, алюминий, цинк, мышьяк, кадмий, хром, литий, ртуть, свинец, тритий, ⁹⁰ Sr, ⁷ Cs, Cs, ⁶⁰	3,1·10 ⁸	8,6·10 ⁶
Хэнфорд	тритий, кобальт, цезий, стронций, технеций, плутоний, уран, четырёххлористый углерод, нитраты, йод, хром, смешанные и трансуранные отходы	2,0·10 ⁷	6,4·10 ⁷
Ок-Ридж	асбест, нефтяные углеводороды, полихлорированные дифенилы, радионуклиды (²³⁵ U, обедненный уран), смешанные отходы, ⁹⁰ Sr, ⁷ Cs, ⁶⁰ Co, тритий, тяжелые металлы, нитраты, органические растворители, соединения бериллия, ртуть, кадмий	4,6·10 ⁶	4,3·10 ⁵
Роки-Флэтс	почвы – плутоний, америций, уран, летучие органические соединения, полициклические ароматические углеводороды, бериллий; грунтовые воды – нитраты, металлы, растворители, поверхностные воды – радионуклиды, металлы, летучие органические соединения, полихлорированные дифенилы.	1,2·10 ⁶	3,2·10 ⁵
Айдахо	тяжелые металлы, полихлорированные бифенилы, кислоты, асбест, растворители, НАО, ТРУ РАО	7,6·10 ⁵	6,5·10 ⁵

В свою очередь технологии очистки грунтовых и поверхностных вод можно разделить на две категории [145]:

- биологическая очистка (биодegradация и биореакторы);
- физико-химическая очистка (отгонка воздухом/воздушный барботаж, фильтрация, окисление, откачка с последующей очисткой и т. п.).

Технологии очистки почв, донных отложений и шлама делятся на четыре категории:

- биологическая очистка (биодegradация, биологическое удаление*, биодegradация в жидкой фазе**, биодegradация в твердой фазе***, биологическая обработка на поверхности);

* технология очистки «на месте» предусматривает закачку воздуха в загрязненную почву, в результате чего в почве повышается содержание кислорода, что стимулирует рост популяций аэробных бактерий.

** технология, обеспечивающая перемещение загрязняющих веществ в жидкую фазу, где процессы биодegradации протекают наиболее интенсивно (биореакторы (очистка «вне площадки»)) и осадительные бассейны (очистка «на месте»).

*** размещение извлеченного грунта в облицованных траншеях или контейнерах на поверхности земли с внесением специальных добавок, питательных веществ и/или бактерий.

- физико-химическая очистка (паровая экстракция, отверждение и стабилизация, физическая сепарация и химическая экстракция, промывка почвы);
- термическая очистка (витрификация, паровая экстракция при нагревании, термическая десорбция, сжигание, пиролиз и др.);
- особые методики очистки, например, экскавация.

В табл. 1.42 представлен исчерпывающий перечень всех технологий, имеющих в арсенале Министерства энергетики США и применяемых при очистке площадок ядерного оружейного комплекса. Ниже более подробно описаны некоторые наиболее распространенные, а также приведены примеры их применения на конкретных площадках.

Табл. 1.42. Полный перечень технологий для очистки загрязненных компонентов окружающей среды на площадках DOE

Технология	Среда	Загрязняющие вещества	Краткое описание	Технология очистки
Металлы				
остекловывание в дуговых печах	почва	токсичные металлы	остекловывание	отверждение/ стабилизация
биологическая иммобилизация тяжелых металлов	грунтовые и поверхностные воды, жидкие отходы	токсичные металлы	использование бактерий в целях приведения ионов тяжелых металлов в нерастворимую и менее токсичную форму	отверждение/ стабилизация
очистка ЖРО из резервуарных хранилищ методом биологической деструкции	супернатант, жидкие отходы	токсичные металлы	биологическая сорбция	биореакторы
электрокинетическое удаление тяжелых металлов и радионуклидов	почва	тяжелые металлы	под действием электрического тока, протекающего между двумя электродами, ионы загрязняющих веществ притягиваются к одному из электродов	электрокинетическая сепарация
инкапсуляция опасных отходов	жидкие и твердые отходы, шлам	металлы, неорганические вещества	инкапсуляция отходов	отверждение/ стабилизация
очистка грунтовых вод «на месте» с применением коллоидных технологий	грунтовые воды	тяжелые металлы, абсорбировавшиеся на глине или песке	коллоидная иммобилизация загрязняющих веществ «на месте»	отверждение/ стабилизация

Технология	Среда	Загрязняющие вещества	Краткое описание	Технология очистки
остекловывание загрязненного грунта «на месте»	почва	тяжелые металлы	иммобилизация «на месте»	отверждение/стабилизация
установка изолирующих барьеров и покрытий	безводные почвы	растворимые металлы	локализация и очистка	пассивная очистка с использованием реактивных завес
инкапсуляция в полиэтилен	водно-соляные растворы и концентраты, глауберова соль (сульфат натрия), шлам, зола, отработавшие ионо-обменные смолы из резервуарных хранилищ	токсичные металлы (например, хром, свинец, кадмий)	инкапсуляция	отверждение/стабилизация
очистка почвы, загрязненной металлами, с использованием лигандов	почва	Pb, Hg, Cr	разделение по плотности и последующая экстракция	сепарация и химическая экстракция
Смешанные отходы				
динамическая отгонка воздухом	почва, грунтовые воды	смешанные отходы	интенсификация процесса очистки за счет термического воздействия	термическая обработка
электрокинетическое удаление тяжелых металлов и радионуклидов	почва	тяжелые металлы и радионуклиды	под действием электрического тока, протекающего между двумя электродами, ионы загрязняющих веществ притягиваются к одному из электродов	электрокинетическая сепарация
очистка грунтовых вод «на месте» с применением коллоидных технологий	грунтовые воды	смешанные отходы	коллоидная иммобилизация загрязняющих веществ «на месте»	отверждение/стабилизация

§ 1.3. Программа Министерства энергетики США по решению проблем ядерного наследия

Технология	Среда	Загрязняющие вещества	Краткое описание	Технология очистки
остекловывание загрязненного грунта на месте	почва	смешанные отходы	разложение и иммобилизация	отверждение/ стабилизация
плазменный нагрев	почва, отходы из пунктов хранения	смешанные отходы	улучшение качества формы отходов	отверждение/ стабилизация
Органики				
адсорбция бензола, толуола, этилбензола и ксилола органическим цеолитом	грунтовые и поверхностные воды	одноядерные ароматические УВ, бензол, толуол, этилбензол и ксилол	адсорбция ароматических соединений	адсорбция/ абсорбция
остекловывание в дуговых печах	почва	органика	остекловывание	отверждение/ стабилизация
очистка ЖРО из резервуарных хранилищ методом биологической деструкции	супернатант, жидкие отходы	органика	биосорбция	биореакторы
использование биореакторов	грунтовые воды	тетрахлорэтилен, винилхлорид, трихлоруксусная кислота, бензол, толуол, этилбензол и ксилол	использование биореактора для разложения содержащих хлор химических веществ	биореакторы
очистка почвы от компонентов сильных взрывчатых веществ с помощью растений	почва	ароматические соединения на основе нитратов, взрывчатые вещества	биологическая очистка	усовершенствованная технология биологической очистки
использование сухих барьеров для локализации и очистки загрязнений	почва	ЛОС, летучие растворители, нефтяное топливо	горизонтальное высушивание верхнего слоя почвы в целях формирования барьера	установка покрытия
динамическая отгонка воздухом	почва, грунтовые воды	ЛОС	усовершенствованная технология удаления ЛОС, использование	термическая очистка

Технология	Среда	Загрязняющие вещества	Краткое описание	Технология очистки
технологическая система биологической очистки грунтовых вод «на месте»	грунтовые воды	4	микроорганизмов, разлагающих CCl_4 до безвредных химических соединений	усовершенствованная технология биологической очистки
использование источника тока высокого напряжения для разложения ЛОС	газовый конденсат, водосодержащие и неводные жидкости	ЛОС, галогенированные растворители	разложение ЛОС при комнатной температуре	разложение под действием тока высокого напряжения
отгонка воздухом ЛОС с использованием горизонтальных скважин (метод очистки «на месте»)	водопроницаемый грунт, грунтовые воды	ЛОС, легкие УВ, хлорсодержащие растворители	Усовершенствованная технология удаления	скважинная отгонка воздухом
очистка грунтовых вод «на месте» с применением коллоидных технологий	грунтовые воды	пестициды	коллоидная иммобилизация загрязняющих веществ «на месте»	отверждение/стабилизация
остекловывание загрязненного грунта на месте	почва	ЛОС	разложение/иммобилизация	отверждение/стабилизация
паровая экстракция в скважинах	грунтовые воды	ЛОС	газ прокачивается сквозь загрязненную воду, что позволяет выделить токсичные химические вещества	скважинная отгонка воздухом
биологическое разложение тетрахлорэтилена с использованием метана и горизонтальных скважин	почва, грунтовые воды	галогенированные алифатические органические соединения	разложение химических соединений микроорганизмами	усовершенствованная технология биологической очистки
установка изолирующих барьеров и покрытий	безводные почвы	ЛОС, органические соединения	локализация/очистка	пассивная и реактивная скважинная очистка

§ 1.3. Программа Министерства энергетики США по решению проблем ядерного наследия

Технология	Среда	Загрязняющие вещества	Краткое описание	Технология очистки
плазменный нагрев	почва, захороненные отходы	органические соединения	улучшение качества формы отходов	отверждение/стабилизация
шестиступенчатый нагрев почвы	почва	ЛОС, полелетучие органические соединения	экстракция	термическая очистка
система термической паровой экстракции	безводные почвы	ЛОС, полелетучие органические соединения, химические соединения с давлением пара менее 0,02 атм при 20°C	экстракция	термическая очистка
регулируемый гибридный плазменный нагрев	воздух	ЛОС	органические соединения разрушаются или окисляются под действием электронного пучка	разложение под действием тока высокого напряжения
мембранная сепарация ЛОС из отходящих газов	газы	ЛОС, галогенированные растворители четырёххлористый углерод, хлороформ	мембранная сепарация	мембранная сепарация
извлечение ЛОС и их повторное использование	воздух	ЛОС	тепловой насос, работающий согласно циклу Брайтона, позволяет конденсировать поток воздуха, из которого выделяют ЛОС с целью их повторного использования	адсорбция активированным углем в газовой фазе
Радиоактивное загрязнение				
очистка грунтовых вод «на месте» с применением коллоидных технологий	супернатант, жидкие отходы	различные радионуклиды, ТРУ РАО	биосорбция	биореакторы

Технология	Среда	Загрязняющие вещества	Краткое описание	Технология очистки
использование комплексообразователей для удаления актинидов	почва, технологические отходы		селективное удаление радиоактивных и высокотоксичных актинидов с помощью органических комплексонов	сепарация
компактные блоки очистки РАО	жидкости, шлам	BAO, HAO, ТРУ РАО	биосорбция	ионный обмен
извлечение захороненных отходов с использованием криогенных технологий	почва, захороненные отходы	ТРУ РАО	заморозка/извлечение отходов	экскавация, извлечение и сепарация вне площадки
электрокинетическое удаление тяжелых металлов и радионуклидов	почва	различные радионуклиды	под действием электрического тока, протекающего между двумя электродами, ионы загрязняющих веществ притягиваются к одному из электродов	электрокинетическая сепарация
очистка грунтовых вод «на месте» с применением коллоидных технологий	грунтовые воды		коллоидная иммобилизация загрязняющих веществ «на месте»	отверждение/стабилизация
остекловывание загрязненного грунта на месте	почва	различные радионуклиды, ТРУ РАО	иммобилизация	отверждение/стабилизация
инкапсуляция в полиэтилен	водно-соляные растворы и концентраты, глауберова соль (сульфат натрия), шлам, зола, отработавшие ионо-обменные смолы в резервуарных хранилищах	различные радионуклиды, ТРУ РАО	инкапсуляция	отверждение/стабилизация

§ 1.3. Программа Министерства энергетики США по решению проблем ядерного наследия

Технология	Среда	Загрязняющие вещества	Краткое описание	Технология очистки
очистка почвы, загрязненной металлами за счет экстракции лигандами	почва		разделение по плотности и последующая экстракция	сепарация, химическая экстракция
ионно-обменные колонны со смолами на основе резорцилового альдегида для удаления цезия	супернатант, содержащий Cs		ионный обмен	ионный обмен
селективная экстракция/ выщелачивания урана из почвы	почва, донные отложения		карбонатное выщелачивание	химическая экстракция
Вне зависимости от характера загрязнения				
биологическое разложение ЖРО из резервуарных хранилищ	супернатант, жидкие отходы	нитраты	биосорбция	биореакторы
извлечение захороненных отходов с использованием криогенных технологий	почва, захороненные отходы	любые опасные отходы	заморозка/извлечение отходов	экскавация, извлечение и сепарация вне площадки
использование технологий гидроудара	затвердевший шлам из резервуаров-хранилищ ЖРО	–	растрескивание твердой формы отходов	гидроразрыв
барьер на основе геля из полимеров, предотвращающий дальнейшее распространение загрязнения, возникшего в результате проливов	почва	–	закачка жидкости, которая при затвердевании образует барьер	отверждение/стабилизация
система дистанционного извлечения грунта	почва	не зависит от типа отходов	извлечение	экскавация, извлечение
подземные барьеры	почва	не зависит от типа отходов	установка цементного покрытия под захороненными отходами	установка покрытий

Экскавация загрязненной почвы

Экскавация загрязненного грунта предполагает либо простое удаление слоя загрязненной почвы с площадки и ее последующее размещение в пункте захоронения, либо удаление слоя загрязненной почвы, ее очистку в поверхностных установках и засыпку очищенной почвы обратно на участки, где ранее была проведена экскавация [146].

До 1984 года метод экскавации с последующим захоронением извлеченной почвы (рис. 1.101) использовался наиболее часто, а на сегодняшний день в большинстве случаев он рассматривается лишь в качестве предварительного этапа очистки вне площадки (кислотно-щелочная нейтрализация, отверждение, удаление свободных жидкостей за счет внесения почвы, известняка, золы или полимеров и т. п.).

Данный метод может быть использован при очистке от практически любых загрязняющих веществ, но существует ряд факторов, которые могут ограничивать применение этой технологии[147]:

- ветровой унос загрязняющих веществ при проведении экскавации;
- токсичное воздействие загрязняющих веществ на персонал;
- транспортировка загрязненного грунта через густонаселенные территории может вызвать недовольство общественности;
- нехватка полигонов, пригодных для захоронения смешанных отходов;
- затраты на очистку извлеченной почвы могут в разы превышать затраты на проведение работ по экскавации, транспортировку и захоронение. В подобных случаях извлеченную почву направляют в пункт захоронения без предварительной очистки.

Конструкция полигонов для захоронения определяется особенностями площадки и набором предусмотренных функций: это могут быть и однослойные системы (слой плодородной почвы) и сложные многослойные системы, состоящие из прослоек грунта и геосинтетических материалов. В целом более простые системы подходят для засушливого климата, а во влажных климатических условиях требуется применение более слож-

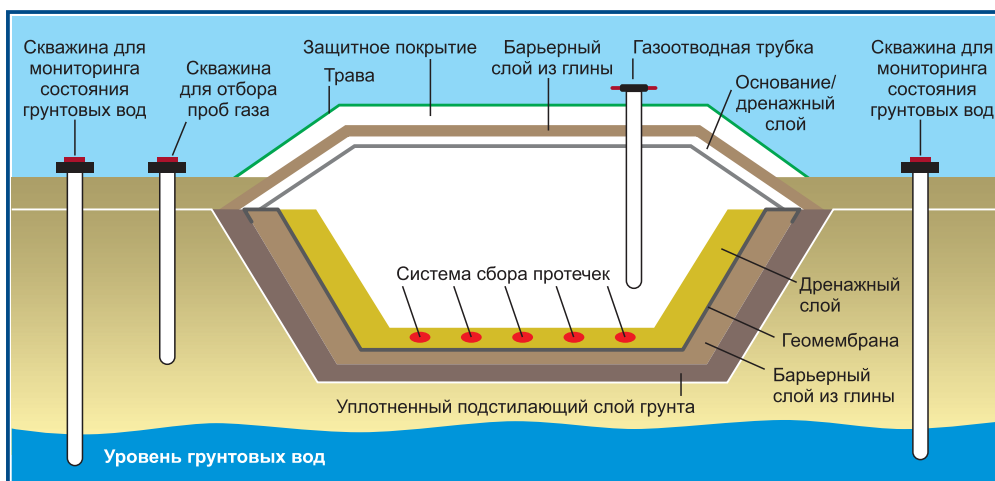


Рис.1.101. Стандартная конструкция полигона для захоронения загрязненного грунта

ных систем. Как правило, конструкция таких полигонов состоит из перемежающихся слоев грунта и геосинтетических материалов, отличающихся разной степенью водопроницаемости. Так, материалы, обладающие малой проницаемостью, позволяют отвести воду от отсека захоронения и не допустить ее контакта с отходами. Высокопроницаемые слои обеспечивают дренаж воды, просочившейся сквозь верхние слои полигона. Для формирования слоев малой проницаемости, также называемых барьерными слоями, используют либо природные материалы (глины с коэффициентом фильтрации не более $1 \cdot 10^{-6}$ см/с), либо синтетические материалы (геосинтетические бентонитные изоляционные ковры). Поверх барьерного слоя устанавливают гибкую геомембрану, выполненную из материалов на основе поливинилхлорида, полиэтилена, хлорсульфированного полиэтилена, полипропилена и т. п. [148].

В табл. 1.43 приведены затраты на проведение работ по экскавации и захоронению загрязненного грунта на территории Лаборатории Санта Сьюзен, где располагались установки NASA и DOE [145].

Табл. 1.43. Затраты на проведение работ по экскавации и захоронению отходов в Лаборатории Санта Сьюзен, доллар/т

Работы	Затраты	Описание площадки
Экскавация	132 дол/м	<p>8 700 м³ загрязненной почвы</p> <p><u>Основные загрязняющие вещества:</u> ЛОС, полугетучие органические соединения, щелочные металлы, пестициды, полихлорированные дифенилы, хлорированные растворители.</p> <p><u>Технология переработки смешанных отходов:</u> термическая десорбция (X-TRAX), скорость переработки – 57 м³/день.</p> <p><u>Удаленность пункта захоронения опасных отходов</u> – 274 км.</p> <p>Радиоактивные отходы захоронены в контейнерах.</p> <p><u>Год проведения работ:</u> 1994 г.</p>
Химический анализ	4000 дол.	
Захоронение опасных отходов	200	
Переработка опасных отходов	140	
Захоронение неопасных отходов	65	
Переработка смешанных отходов	2750	
Захоронение смешанных отходов	1014	
Захоронение РАО	1600	

В среднем на экскавацию 20 000 тонн загрязненной почвы уходит около двух месяцев. Средние затраты на реализацию комплекса работ по экскавации грунта, его транспортировке на незначительное расстояние и захоронению составляют порядка 270–460 долларов за тонну (в зависимости от степени опасности отходов и метода экскавации).

Системы откачки и очистки грунтовых вод

Данная технология предусматривает откачку загрязненных грунтовых вод с использованием погружного вакуумного насоса с последующей переработкой или захоронением откаченной воды (рис. 1.102, стр. 216).

Загрязненная вода из откачных скважин поступает в накопительный резервуар, а оттуда передается на очистную установку. Наибольшее распространение получили следующие технологии очистки [145, 149]:

биореакторы обеспечивают разложение загрязняющих веществ в воде микроорганизмами за счет биологических систем с суспензионными культурами или

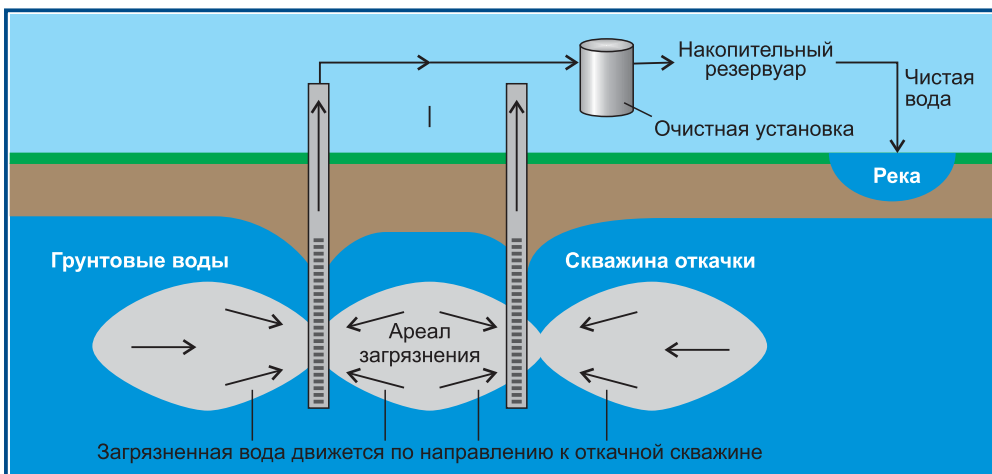


Рис.1.102. Принципиальная схема откачки и очистки грунтовых вод

организмами-обработателями. В первом случае (например, реактор с активированным илом, псевдооживленным слоем или последовательно-циклический реактор) загрязненные грунтовые воды циркулируют в аэрационном бассейне, где микробная популяция аэробно разлагает органическое вещество и вырабатывает CO_2 , H_2O и новые клетки. Клетки образуют ил, оседающий в отстойнике. Ил из отстойника направляется на переработку в аэрационный бассейн или удаляется. В биореакторах с организмами-обработателями (например, биореакторы с фиксированной пленкой и восходящим потоком, вращающиеся биореакторы и капельные биологические фильтры) микроорганизмы закрепляются на матрице инертной подложки для аэробного разложения загрязняющих веществ в воде;

- искусственные экосистемы переувлажненных земель, используемые для очистки воды с высокой концентрацией металлов и низким показателем pH: вода протекает через аэробные и анаэробные зоны экосистемы переувлажненных земель, а содержащиеся в ней металлы удаляются за счет процессов ионного обмена, адсорбции, абсорбции и осаждения при геохимическом и микробном окислении и восстановлении;

адсорбция/абсорбция. Механизмы адсорбции, как правило, можно разделить на несколько категорий: физическая, химическая и электростатическая. Незначительные молекулярные силы, например Ван-дер-Ваальсовы силы, инициируют физическую адсорбцию, а в результате химической реакции формируется химическая связь между соединением и поверхностью тела в хемосорбции. Электростатическая адсорбция представляет собой адсорбцию ионов за счет силы кулоновского взаимодействия;

отгонка воздухом является комплексной технологией, которая позволяет за счет многократного увеличения площади загрязненной воды под воздействием потока воздуха (массовое перемещение летучих загрязняющих соединений из воды в воздух), выделять из грунтовых вод летучие органические соединения. Для этих целей используются такие технологии, как отгонка с использованием насадочных башен, рассеивающее выветривание, многоступенчатая поддонная аэрация и аэрация разбрызгиванием;

адсорбция гранулированным активированным углем (и адсорбция углем в жидкой фазе) представляет собой комплексный процесс, в котором грунтовая вода подается насосами в резервуары с активированным углем, который адсорбирует растворенные в воде органические загрязняющие вещества;

ионный обмен позволяет удалять ионы из жидкой фазы благодаря процессу обмена катионов или анионов между загрязняющими веществами и средой обмена;

осаждение / коагуляция / флокуляция. Процесс осаждения металлов, зачастую используемый в качестве предварительного этапа очистки воды от металлов, которые бы препятствовали эффективной реализации других технологий очистки (например, перед химическим окислением или отгонкой воздухом). В процессе очистки в загрязненной воде происходит преобразование растворимых солей тяжелых металлов в нерастворимые соли, которые затем осаждаются. В целях увеличения производительности очистки часто используют специальные химические осадители, коагулянты и флокулянты для увеличения размера частиц за счет процессов агрегации;

сепарация позволяет выделить загрязняющие вещества из среды, в которой они содержатся (грунтовые воды). Для этих целей может использоваться целый ряд технологий: дистилляция; фильтрация / ультрафильтрация / микрофильтрация; кристаллизация вымораживанием; испарение через полупроницаемую мембрану; обратный осмос;

орошение дождеванием – распределение воды с содержанием летучих органических веществ под давлением с использованием типовой оросительной ирригационной системы. В процессе орошения летучие органические вещества переходят из фазы растворения в водной среде в паровую фазу и в таком виде удаляются в окружающую среду.

В табл. 1.44 представлены затраты на реализацию системы откачки и очистки грунтовых вод, функционирующей на территории зоны 200 Хэнфордского комплекса [150].

Табл. 1.44. Затраты на внедрение и эксплуатацию систем откачки и очистки грунтовых вод в Хэнфорде (площадки 200-UP-1 и 200-ZP-1*) с октября 2008 по декабрь 2009 гг.

Площадка	Статьи расходов	Затраты, доллары США
200-UP-1	проектирование	35 100
	сопровождение проекта	18 900
	техническое обслуживание и эксплуатация	98 200
	мониторинг	131 600
	обращение с отходами	1 500
	ИТОГО	285 300
200-ZP-1	проектирование	210 600
	сопровождение проекта	368 500
	техническое обслуживание и эксплуатация	1 735 100
	мониторинг	434 300
	обращение с отходами	154 500
	ИТОГО	2 903 000

* основные характеристики систем и краткое описание условий на данных участках представлены в §1.1 раздела 1.1.3

Затраты на очистку одного литра воды на участках 200-UP-1 и 200-ZP-1 составили 0,003 и 0,006 долларов соответственно. Затраты на удаление единицы массы загрязняющих веществ на участке 200-UP-1 составляли [149], долларов/г:

- уран (за отчетный период удалено 2 861 г урана) – 95,1;
- технеций-99 (удалено 2,39 г) – 10 931;
- тетрахлорметан (удалено 2 481 г) – 2 857,6;
- нитраты (удалено 5 805 кг) – 0,01.

Отверждение и стабилизация

Технология отверждения позволяет физически связывать загрязняющие вещества или включить их в состав стабилизированной массы, а химические характеристики полученной формы отходов облегчают дальнейшее обращение с ними и обеспечивают снижение мобильности загрязняющих веществ за счет создания физического барьера, препятствующего их выщелачиванию; стабилизация (или иммобилизация) позволяет снизить мобильность загрязняющих веществ за счет химических или тепловых реакций [151].

Технологии стабилизации и отверждения можно разделить на два типа: термические и реагентные. К термическим методам очистки почвы, прежде всего, следует отнести остекловывание, когда в почву вводят электроды – за счет тока почва нагревается до очень высоких температур (свыше 2 000° С), грунт расплавляется, органика пиролизуется, образующиеся газы направляют на очистку. Охлаждаясь, почва остекловывается, благодаря чему загрязнители, радионуклиды и тяжелые металлы, связываются в устойчивую форму, препятствующую их дальнейшему вымыванию.

При очистке загрязненного грунта «вне площадки» наиболее широко используется технология битумирования, относящаяся к группе реагентных методов стабилизации и отверждения. В процессе битумирования отходы помещают в жидкий битум, по мере его охлаждения и затвердевания образуется стабильная форма отходов. Битумирование проводится в специальных литейных формах, конструкцией которых предусмотрены винты, обеспечивающие равномерное перемешивание битума и отходов. Вода, содержащаяся в смеси, выпаривается до тех пор, пока показатель влажности не снизится до 0,5 %.

Помимо битумирования широкое распространение получили технологии отверждения и стабилизации с применением эмульгированного асфальта, серного цемента, пуццоланового и поргландского цемента. Средние затраты на обработку при помощи методов реагентной стабилизации составляют около 100 долларов/т.

В табл. 1.45 приведены конкретные примеры реализации данных технологий на площадках DOE.

Табл. 1.45. Затраты на проведение работ по остекловыванию почвы на площадках DOE, дол./т

Технология	Затраты	Краткое описание работ
Остекловывание почвы на месте (Хэнфорд)	300–400 (1993 год)	Основные загрязняющие вещества: органические и неорганические соединения, радионуклиды. Технология: нагрев с помощью электродов, разрушение органических соединений, иммобилизация неорганических соединений и радионуклидов.
Остекловывание вне площадки (Butte, штат Монтана)	2 000 (1993 год)	Основные загрязняющие вещества: 28 000 г/т оксида цинка, 1 000 г/т гексахлорбензола. Остекловывание в плазменной дуговой печи.

Почвенная паровая экстракция

Почвенная паровая экстракция (ППЭ) позволяет выполнять очистку верхнего, ненасыщенного слоя почвы, расположенного между наземной поверхностью и поверхностью грунтовых вод (вадозная зона): под действием вакуума, нагнетаемого компрессором, создается контролируемый поток воздуха, уводимый по паровым экстракционным скважинам вертикального заложения, уходящим на глубину от 1,5 до 90 м, или по скважинам горизонтального заложения и направляемый на дальнейшую очистку.

Этот способ эффективен при очистке почвы от летучих и полуметучих загрязняющих веществ. Затраты на применение метода почвенной паровой экстракции зависят от особенностей конкретной площадки, ее размера, характера и объема загрязнения, а также гидрогеологических условий. От этих факторов зависит необходимое количество паровых экстракционных скважин, мощность компрессорных установок, а также продолжительность очистки. В случае применения данной технологии дополнительные расходы связаны с необходимостью очистки отходящих из скважин газов.

В табл. 1.46 приведен анализ затрат на реализацию технологии почвенной паровой экстракции для четырех различных сценариев [152].

Табл. 1.46. Оценка затрат на реализацию работ по паровой очистке почвы от полуметучих органических соединений на месте с использованием вертикальных паровых экстракционных скважин [152]

Характеристики	Сценарий А	Сценарий В	Сценарий С	Сценарий D
	Небольшая площадка		Большая площадка	
Уровень сложности работ по очистке	легко	сложно	легко	сложно
Тип почвы	песчано-илистый грунт/суглинок	илистый грунт/песчано-глинистая смесь	песчано-илистый грунт/суглинок	илистый грунт/песчано-глинистая смесь
Площадь загрязненного участка, м ²	42	42	250	250
Средняя глубина скважины, м	1,5	1,5	1,5	1,5
Диаметр скважины, м	0,05	0,05	0,05	0,05
Расстояние между скважинами, м	10,6	6,7	10,6	6,7
Количество паровых экстракционных скважин		2		8
Средний расход пара, м /м	0,42	0,17	0,42	0,17
Суммарный расход пара, м /м	0,42	0,34	1,27	1,36
Продолжительность, годы	2	2	2	2
Затраты, доллары				
на технологическое обслуживание	51 689	62 094	78 404	180 087
на проектирование	10 000	10 000	10 000	17 125
накладные расходы на осуществление ППЭ	18 606	21 442	64 585	171 253
суммарные накладные расходы	80 295	93 536	152 989	368 465
на очистку куб. м	1 275	1 485	405	975

Безопасность промышленных водоемов

Помимо очистки загрязненных грунтовых вод и почвы еще одним направлением деятельности DOE в рамках реализации обязательств по второму компоненту ядерного наследия является обеспечение безопасности поверхностных вод. В прошлом на большинстве площадок Министерства энергетики сброс жидких РАО производился в полноводные реки.

Так, например, в Хэнфорде отходы сбрасывались в реку Колумбия. Наиболее интенсивные выбросы загрязняющих веществ в реку Колумбия наблюдались в период с 1956 по 1965 гг., когда на территории комплекса одновременно работало сразу восемь реакторов. В то время объем выбросов составлял от $3,7 \cdot 10^{14}$ до $4,44 \cdot 10^{14}$ Бк/день. Пик загрязнения пришелся на 1963 год – ежедневно в реку сбрасывалось по $5,4 \cdot 10^{14}$ Бк.

На сегодняшний день уровни активности вод реки Колумбия существенно ниже. В результате анализа проб прибрежной воды, проведенного в 2008 году в целях оценки удельной активности основных загрязняющих веществ, были получены следующие значения, Бк/л: тритий – $4,81 \div 1,02 \cdot 10^2$, ^{90}Sr – $1,9 \cdot 10 \div 7,4 \cdot 10$, уран – от 0,74 до 1,59 мг/л [153]. На данный момент основным источником загрязнения вод реки Колумбия остаются грунтовые воды. Поэтому на данной площадке ключевую роль в обеспечении надлежащего качества воды в реке играет очистка грунтовых вод.

В то же время на некоторых площадках для целей промежуточной выдержки жидких НАО перед их сбросом в реки использовались искусственные промышленные водоемы. Наиболее крупными промышленными водоемами промежуточной выдержки являются водоемы Par Pond и L-Lake в Саванна-Ривер и озеро Уайт Оук в Ок-Ридже (табл. 1.47).

Табл. 1.47. Загрязнение промышленных водоемов DOE, использовавшихся для промежуточной выдержки низкоактивных ЖРО

Площадка	Водный объект	Характеристики	Особенности
Саванна-Ривер	Par Pond	Искусственный водоем-охладитель (площадь – 10,68 км ² , средняя глубина – 6,2 м, максимальная глубина – 18 м, объем – 62 млн м ³); загрязнение в основном обусловлено ^{7}Cs , на момент окончания сброса суммарная активность донных отложений на глубине до 0,3 м оценивалась в $8,21 \cdot 10^{12}$ Бк. Результаты измерений 2012 г. показали снижение уровня суммарной активности по ^{7}Cs до $1,89 \cdot 10^{12}$ Бк	Использовался с 1958 года для промежуточной выдержки охлаждающей жидкости (НАО), поступающей с промышленных реакторов Р и R, перед сбросом в реку Лоуер Три Ранз. Сброс был прекращен в 1964 г.
	L-Lake	Искусственный водоем-охладитель (площадь – 4,05 км ² , средняя глубина – 8 м, максимальная глубина – 19,8 м, объем – 31 млн м ³); активность донных отложений, Бк/кг: ^{7}Cs – 5,11–1 740, ^{60}Co – 0–29,6 (данные проботбора от 1996 года).	Использовался с 1984 года для промежуточной выдержки охлаждающей жидкости (НАО), поступающей с реактора L, перед сбросом в реку Стил Крик. Сброс был прекращен в 1988 году.

Площадка	Водный объект	Характеристики	Особенности
Ок-Ридж	Озеро Уайт Оук	Искусственный водоем (площадь 0,1 км ² объем – 0,2 млн м ³ , средняя глубина – 2,07 м, максимальная глубина – 5,6 м) с прилегающим к нему водоемом промежуточной выдержки объемом 5 700 м ³ ; объем загрязненных донных отложений 43 000 м ³ ; активность основных радионуклидов (1991 год), Бк: ⁹⁰ Sr – 5,4·10 ¹² , ⁶⁰ Co – 5,62·10 ¹² , ⁷ Cs – 2,6·10 ¹² , ¹⁰⁶ Ru – 3,48·10 ¹² .	Использовалось с 1943 года для выдержки и осаждения жидких НАО перед их сбросом в р. Уайт Оук. Проведение работ по реабилитации территории водоема отложено до 2036–2048 года, на данный момент осуществляется мониторинг уровней загрязнения воды и техническое обслуживание плотины.

В табл.1.48 представлены результаты замеров в 1962 году активности основных радионуклидов в донных отложениях озера Уайт Оук.

Табл. 1.48. Загрязнение промышленных водоемов DOE, использовавшихся для промежуточной выдержки низкоактивных ЖРО

Год	Суммарная активность донных отложений (слой 7 – 15 см), Бк			
1945	7,8·10 ¹²			
1946	7,4·10 ¹²			
1948	1,1·10 ¹²			
1950	1,5·10 ¹²			
5	1,3·10 ¹²			
1952	1,1·10 ¹²			
1962	¹⁰⁶ Ru – 3,8·10 ¹²	⁷ Cs – 2,6·10 ¹²	⁶⁰ Co – 5,6·10 ¹²	⁹⁰ Sr – 5,4·10 ¹²

Загрязнение этих водных объектов в первую очередь обусловлено ⁷Cs, большая часть которого накоплена в верхнем слое донных отложений – т. е. проникла на глубину не более 0,3 м. Сброс ЖРО в эти водоемы был прекращен более 20 лет назад, поэтому в результате естественного распада активность донных отложений значительно снизилась.

Так, например, на момент прекращения сборов суммарная активность донных отложений в Par Pond на глубине до 0,3 м оценивалась в 8,21·10¹² Бк. В настоящее время результаты измерений свидетельствуют о снижении уровня суммарной активности по цезию до 1,89·10¹² Бк [154].

В 1991 году водоем Par Pond был на две трети осушен во избежание попадания больших количеств загрязненной воды в реку Лоуэр Три Ранз. Это была предупредительная мера, принятая из-за возникших подозрений на нарушение целостности плотины, отгораживающей водоем от реки. В результате общая площадь обнажившихся дон-

ных отложений составила около 5,42 км², что обусловило повышенный риск ветрового уноса загрязняющих веществ.

Произошедшее заставило экспертов задуматься о возможных мерах по снижению уровня опасности, исходящей от водоема с ¹³⁷Cs, отличающимся достаточно большой мобильностью в локальных экосистемах и способным активно накапливаться в растениях и животных. Предстояло оценить потенциальные альтернативы решения данной проблемы. С одной стороны, концентрации ¹³⁷Cs были достаточно высокими и вызвали опасения с точки зрения обеспечения безопасности гипотетической группы людей, которые в будущем могли бы использовать прилегающие к водоему территории для сельскохозяйственных нужд, а также тех, кто мог употреблять в пищу рыбу, пойманную в Pag Pond. С другой стороны, за более чем 30 лет отсутствие какой бы то ни было хозяйственной деятельности на данном участке привело к резкому увеличению популяций пресноводных рыб в водоеме и других представителей животного мира, обитающих в его окрестностях. Таким образом, за эти годы Pag Pond стал своего рода заповедной зоной для множества видов растительного и животного мира. Было очевидно, что проведение работ по реабилитации водоема и прилегающих к нему территорий приведет к разрушению сложившейся экосистемы [155].

Тем не менее, случай, произошедший в 1991 году, привлек внимание регулирующих органов к проблеме загрязнения Pag Pond – вскоре Агентство по защите окружающей среды США (EPA) включило данный объект в Национальный перечень приоритетных объектов, реабилитация которых может быть осуществлена в рамках закона о Суперфонде*. Тем самым на оператора площадки DOE была возложена ответственность за проведение всестороннего анализа потенциальных мер, призванных снизить уровень опасности, исходящий от водоема. Всего было рассмотрено четыре наиболее перспективных стратегии реализации работ [155]:

1. Осушение водоема, ликвидация плотины, засыпка ложа озера, лесопосадка.
2. Осушение водоема, ликвидация плотины, экскавация и удаление донных отложений.
3. Осушение водоема и проведение работ по иммобилизации донного осадка на месте.
4. Проведение ремонтных работ на плотине и заполнение водоема водой до уровня, позволяющего покрыть загрязненные цезием донные отложения.

В 1995 году с целью обоснования выбора наиболее эффективной стратегии обеспечения безопасности было проведено исследование по оценке суммарной активности воды и донных отложений в водоеме Pag Pond. Как и ожидалось, активность была в основном обусловлена ¹³⁷Cs, однако в воде и донных отложениях были обнаружены и другие гамма-излучающие радионуклиды (табл.1.49) [156], а также ртуть (средняя и максимальная удельная концентрация которой составила 38,8 и 323 мг/г соответственно). В табл. 1.50 представлены результаты замеров концентраций радионуклидов и металлов в воде Pag Pond на основании анализа проб, отобранных в верхних и придонных слоях водоема.

* англ. Comprehensive Environmental Restoration Conservation and Liability Act (CERCLA).

Табл. 1.49. Удельная активность гамма-излучающих радионуклидов в донных отложениях озера Par Pond (сентябрь 1995 г), Бк/г

Радионуклид	Средняя арифметическая удельная активность	Максимальная удельная активность
²²⁸ Ac	$4,29 \cdot 10^{-2}$	$7,29 \cdot 10^{-2}$
7	$3,33 \cdot 10^{\cdot}$	4,6
60	$2,22 \cdot 10^{\cdot}$	$4,8 \cdot 10^{-2}$
⁵⁵ Eu	$1,11 \cdot 10^{\cdot}$	$4,8 \cdot 10^{\cdot}$
212	$4,4 \cdot 10^{-2}$	$7,55 \cdot 10^{-2}$
⁵⁴ Mg	$7,4 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{\cdot}$
²³⁹ Np	$1,85 \cdot 10^{\cdot}$	$8,51 \cdot 10^{\cdot}$
40	$2,26 \cdot 10^{-2}$	$1,17 \cdot 10^{\cdot}$
¹⁴⁶ Pm	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$4,07 \cdot 10^{\cdot}$
²³⁴ Th	$3 \cdot 10^{-2}$	$6,29 \cdot 10^{-2}$
⁵ Zr	$3,7 \cdot 10^{-4}$	$1,48 \cdot 10^{\cdot}$

Табл. 1.50. Концентрации радионуклидов и некоторых металлов в воде водоема Par Pond (сентябрь 1995 г)

Радиоизотоп/металл	Верхний слой			Придонный слой		
	Ср. арифм.	Ср. геометр.	Макс.	Ср. арифм.	Ср. геометр.	Макс.
Удельная активность радионуклидов, Бк/л						
7	0,182	0,176	0,268	0,201	0,196	0,253
212	-	-	1,11	-	-	0,314
⁵⁴ Mn	-	-	$5,11 \cdot 10^{-2}$	-	-	-
Нелетучие бета	$8,21 \cdot 10^{-2}$	$7,99 \cdot 10^{-2}$	$1,04 \cdot 10^{\cdot}$	$8,84 \cdot 10^{-2}$	$8,29 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{\cdot}$
40	1,05	0,936	1,69	1,01	0,871	1,68
²³⁴ Th	5,67	4,73	0,102	4,45	4,21	5,59
Концентрации металлов, мг/л						
Алюминий	5		72	5	57	7
Мышьяк	2	2				4
Барий		10	18	10	10	5
Бериллий	1,3	1,3	1,5	1,5	1,5	1,5
Кадмий						
Кальций	3 396	3 387	3 555	3 523	3 547	3 770
Хром	2	2	2	2	2	2
Кобальт	2	2	2	2		2
Железо	266	268	286	279	274	318
Свинец	2	2			2	
Магний	7 7	740	764	7 7	740	766

Радиоизотоп/ металл	Верхний слой			Придонный слой		
	Ср. арифм.	Ср. геометр.	Макс.	Ср. арифм.	Ср. геометр.	Макс.
Ртуть	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Калий	930	932	946		932	965
Натрий	3 739	3 714	3 980	3 775	3 801	4 120
Ванадий	4,4	4,2	5,0	5,0	5,0	5,0
Цинк			4			4

На основе приведенных выше результатов и данных других исследований был проведен всесторонний анализ четырех предложенных вариантов реализации работ.

Вариант, предполагающий засыпку ложа озера с последующей лесопосадкой, казался достаточно перспективным. В обоснование безопасности данного варианта одна независимая лаборатория провела специальное теоретическое исследование, результаты которого свидетельствовали о непревышении допустимых уровней риска для гипотетического лица, которое проживало бы на данной территории и питалось выращенными здесь сельскохозяйственными продуктами.

Однако результаты проботбора, проведенного сотрудниками Экологической лаборатории Саванна-Ривер, показали несостоятельность аргументов, приведенных специалистами независимой лаборатории: уровень усвояемости ^{70}Cs сельскохозяйственными культурами оказался намного выше указанного в исследовании и обуславливал гипотетический риск, уровень которого мог превысить в 30 раз установленный ЕРА предел в 10^{-4} (эта величина означает, что воздействием радиации будет спровоцирован рак с летальным исходом в одном случае из 10 000). В результате от первой стратегии было решено отказаться.

Вариант под номером три также отвергли, так как на тот момент в мире не существовало технологий с доказанной эффективностью, которые бы позволили иммобилизовать ^{70}Cs на месте. Однако даже если бы такие технологии были разработаны, то затраты на реализацию проекта оказались бы непомерными.

Оставалось сопоставить достоинства и недостатки оставшихся двух стратегий. Основным недостатком четвертой стратегии, в ходе реализации которой планировалось произвести ремонт плотины и в дальнейшем регулировать уровень воды в водоеме за счет насосной системы, являлись высокие затраты – около 10–15 млн долларов (ежегодные затраты на эксплуатацию насосного оборудования по состоянию на середину 1990-х гг. составляли порядка 340 000 долларов).

Приблизительная стоимость работ по реализации второй стратегии с экскавацией донных отложений и их последующей транспортировкой оценивалась в районе 4 млрд долларов. Кроме того, в результате осуществления второй стратегии оказалась бы разрушена сложившаяся в водоеме Par Pond экосистема, а эрозия донных отложений стала бы причиной поступления загрязняющих веществ в воды ниже по течению в реки Лоу-ер Три Ранз. Причем процессы уноса загрязняющих веществ протекали бы достаточно длительное время вплоть до момента окончательной стабилизации почвенного слоя и восстановления нарушенного растительного покрова.

Таким образом, вариант под номером четыре характеризовался куда меньшими недостатками. Опасения вызывало лишь воздействие, оказываемое ^{137}Cs на местную биоту, а также на лиц, которые бы могли употреблять в пищу рыбу из водоема. Однако результаты исследования, проведенного сотрудниками Экологической лаборатории Саванна-Ривер, показали, что дозовые нагрузки на животных и растения экосистемы *Par Pond* не превышали предельных значений, установленных Министерством энергетики (от 0,001 до 0,01 Зв/день в зависимости от конкретного вида), а риск для гипотетического лица, потребляющего в пищу рыбу, пойманную в водоеме, также не превысил бы норм, установленных EPA (10^{-4}). Кроме того, результаты мониторинга окружающей среды, проводимого на протяжении нескольких десятилетий сотрудниками лаборатории, не выявили никаких свидетельств негативного воздействия радиации на биоту водоема и прилегающих к нему территорий. Наоборот, специалисты отмечали большое разнообразие растительного и животного мира и сложившиеся благоприятные условия для его интенсивного развития.

В итоге было решено реализовать четвертую стратегию: общие затраты на ремонт плотины и заполнение водоема составили порядка 12 млн долларов (на проведение научных исследований в обоснование выбранного варианта реализации работ было выделено около 200 000 долларов), а экосистема водоема полностью восстановилась всего за 5 лет.

Похожая стратегия была принята и в отношении озера Уайт Оук, расположенного на территории Окриджской резервации, в прошлом использовавшегося для выдержки и осаднения жидких НАО перед их сбросом в реку Уайт Оук.

Согласно оценкам, выполненным в 1982 году, большая часть загрязняющих веществ была сконцентрирована в донных отложениях озера: всего в результате сброса загрязнению подверглось около 43 000 м донных отложений [156]. В 1991 году была определена суммарная активность основных радионуклидов, обуславливающих загрязнение донных отложений, Бк: $^{90}\text{Sr} - 5,4 \cdot 10^4$, $^{60}\text{Co} - 5,62 \cdot 10^{12}$, $^{137}\text{Cs} - 2,6 \cdot 10^4$, $^{106}\text{Ru} - 3,48 \cdot 10^4$ [157]. Согласно последним оценкам, в результате процессов естественного распада активность донных отложений снизилась примерно на порядок (2009 год) [158, 159].

Как и в случае *Par Pond*, уровень воды в озере регулируется с помощью плотины и насосной системы, благодаря чему не допускается чрезмерного обнажения дна водоема. Согласно положениям «Соглашения о приведении федерального объекта в соответствие нормативным требованиям»*, заключенного между EPA, DOE и Министерством по охране окружающей среды штата Теннесси, перечень возможных вариантов реализации работ по реабилитации данных территорий должен быть разработан оператором площадки (DOE) и передан на рассмотрение регулирующим органам лишь к 2036 году [160]. Поэтому на сегодняшний день наиболее важную роль в обеспечении безопасности объекта играют работы по мониторингу состояния плотины Уайт Оук, ее техническому обслуживанию, а также реализация превентивных мер, призванных не допустить разрушения плотины в случае любых прогнозируемых экстремальных природных явлений.

Визуальный осмотр плотины проводится персоналом площадки раз в квартал. Кроме того, в случае прохождения обильных осадков и поднятия уровня воды в водоеме

* англ. Federal Facility Compliance Agreement.

до отметки, на 1 м превышающей нормальный, в течение последующих нескольких недель проводится дополнительное инспектирование состояния плотины.

Регулирующий контроль осуществляется раз в год Федеральной комиссией по регулированию в сфере энергетики (FERC*). В ходе такой проверки, проведенной в 2008 году, экспертами было установлено, что при аномально обильных осадках в районах, расположенных выше по течению, существует угроза переливания воды через гребень плотины, что может потенциально привести к нарушению целостности ее конструкции.

Отметим, что за всю историю существования объекта подобных инцидентов зафиксировано не было, и вероятность возникновения таких событий оценивается как крайне незначительная [159]. Тем не менее, оператором площадки было принято решение о проведении работ по укреплению и расширению плотины Уайт Оук. В итоге за четыре месяца были проведены работы общей стоимостью около 3,7 млн долларов, позволившие расширить плотину на 61 м как ниже, так и выше по течению. Склоны плотины были укреплены с использованием гравийного заполнителя, уплотненной глины, крупных камней до уровня, обеспечивающего стабильность плотины в случае прогнозируемой максимальной интенсивности водных потоков [160].

Таким образом, Министерство энергетики США из всех возможных стратегий реабилитации водоемов, загрязненных в результате сброса низкоактивных ЖРО (осушение водоема, ликвидация плотины, засыпка ложа озера, лесопосадка; осушение водоема, ликвидация плотины, экскавация и удаление донных отложений; осушение водоема и проведение работ по иммобилизации донного осадка на месте; проведение ремонтных работ на плотине и заполнение водоема водой до уровня, позволяющего покрыть загрязненные цезием донные отложения) отдает предпочтение именно последнему варианту. Поэтому текущая деятельность операторов таких объектов в первую очередь сосредоточена на контроле уровня воды в водоемах и недопущении обнажения донных отложений, в которых сконцентрирована основная часть загрязняющих веществ.

1.3.7. Вывод из эксплуатации и ликвидация ядерных установок

Вывод из эксплуатации и ликвидация неиспользуемых ядерных установок представляет собой третий компонент программы Министерства энергетики США. В прошлом для реализации ядерной программы DOE и его предшественниками было сооружено более 20 000 различных установок (сами установки, здания и сооружения, вспомогательные установки и сооружения). В середине 1990 годов DOE была проведена масштабная работа по оценке состояния находящихся в его ведении установок и сооружений и формированию долгосрочных планов, направленных на снижение исходящей от них опасности; ведь большая их часть находилась в достаточно ветхом состоянии и подверглась значительному химическому и/или радиоактивному загрязнению. В результате свыше 5 000 установок получили статус «неиспользуемых»* (промышленные и исследовательские реакторы, радиохимические производства, газодиффузионные заводы и т. п.) [136]. Около 76 % установок из этого перечня в прошлом использовались в рамках программы по созданию ядерного оружия. На рис. 1.103 показана разбивка «неиспользуемых» установок по категориям.

* англ. Federal Energy Regulatory Commission.

* англ. surplus facilities

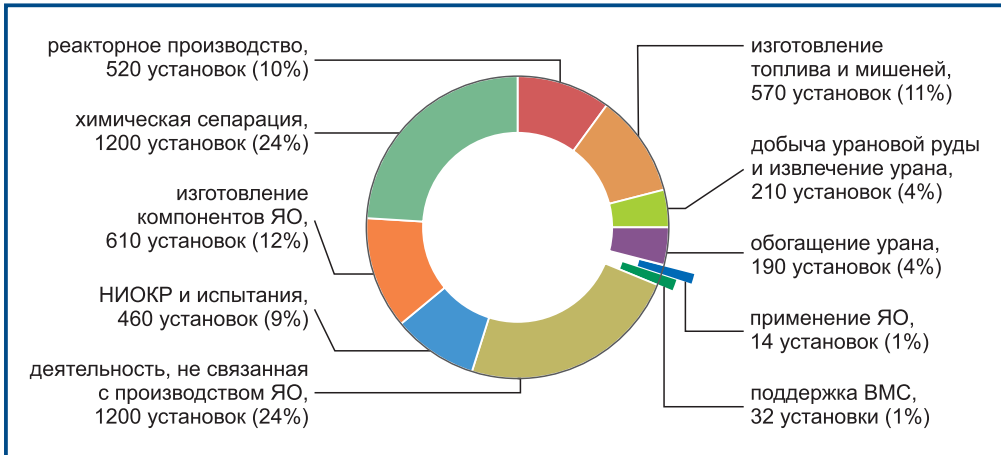


Рис. 1.103. Разбивка перечня «неиспользуемых» установок DOE по категориям

Экологическое управление при Министерстве энергетики отвечает за осуществление комплекса мероприятий, направленного на приведение таких объектов в «конечное состояние» (рис. 1.104) [161]. Следует отметить, что на достижение «конечного состояния» для отдельных площадок может уйти от нескольких месяцев до

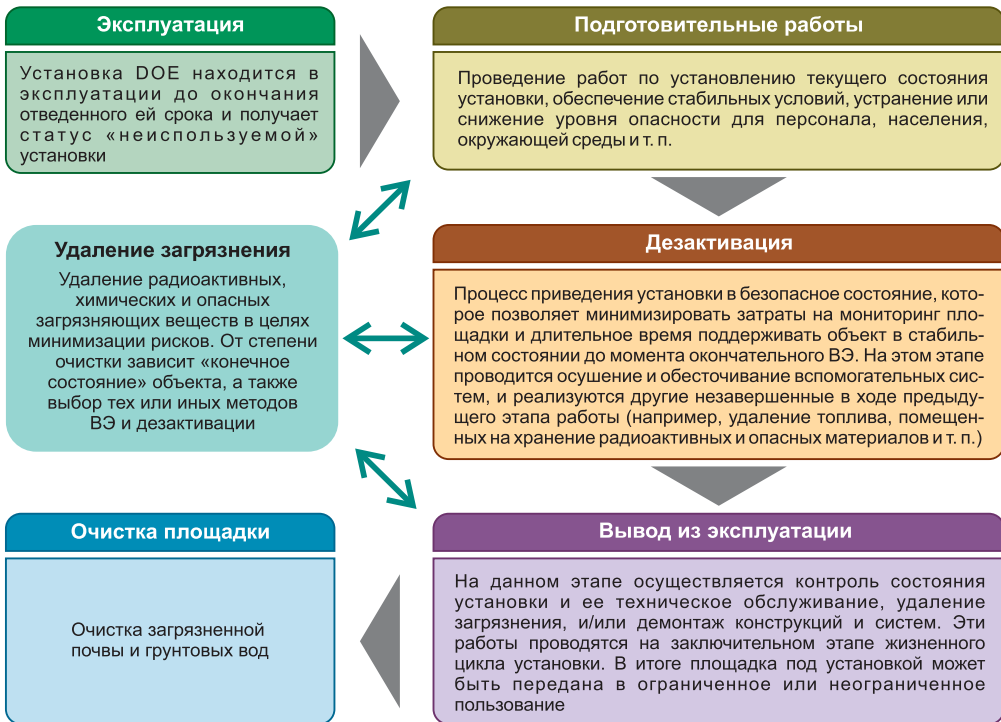


Рис. 1.104. Основные этапы, предшествующие приведению установки в «конечное состояние»

нескольких лет. Всего существует три возможных варианта «конечных состояний» (рис. 1.105) [179]:



Рис. 1.105. Три варианта «конечных состояний» для установок ДОО

- ликвидация – из здания удаляются все вспомогательные конструкции, оборудование и отходы, после чего производится дезактивация несущих строительных конструкций и их снос. Далее осуществляется очистка земельного участка, находившегося под такой установкой.

В результате площадка может получить статус «коричневой лужайки», пригодной для дальнейшего использования в промышленных целях, либо «зеленой лужайки». В последнем случае территории могут быть переданы хозяйствующим субъектам в неограниченное пользование.

- «захоронение на месте» предполагает использование конструкций самой установки в целях обеспечения локализации и удержания содержащихся в ней химических и радиоактивных отходов;
- повторное использование – удаление систем, подвергшихся загрязнению, и дезактивация конструкционных материалов при сохранении самого здания и сооружения в целях его дальнейшего использования для хозяйственных нужд;

С 2003 по 2013 год благодаря усилиям Экологического управления 1 962 установки (19 площадок в 13 штатах) были приведены в «конечное состояние» (табл. 1.51).

В подавляющем большинстве случаев «конечное состояние» предполагало полную ликвидацию установок в виду значительного химического и радиоактивного загрязнения. Почти 85 % этих установок было расположено на 5 площадках:

- 29 % в Хэнфорде;
- 20 % в Ок-Ридже;
- 13 % в Саванна Ривер;
- 12 % в Национальной исследовательской лаборатории в Айдахо;
- 12 % в Роки-Флэтс.

Общая площадь данных установок «под крышей» составила более 1,82 км².

Табл. 1.51. Итоги работ по снятию с эксплуатации и ликвидации ядерных объектов (на конец 2013 г.)

Площадка	Штат	Количество закрытых установок
Хэнфорд	Вашингтон	500
Национальная лаборатория в Айдахо	Айдахо	234
Роки-Флэтс	Колорадо	225
Аргоннская национальная лаборатория	Иллинойс	7
Маунд Сайт	Огайо	76
Колумбус	Огайо	
Аштабула	Огайо	
Уэст Велли	Нью-Йорк	23
Национальная лаборатория Брукхэвен	Нью-Йорк	
Портсмут	Огайо	50
Ок-Ридж	Теннесси	398
Саванна-Ривер	Южная Каролина	248
Ферналд	Огайо	14
Падьюкский завод	Кентукки	25
Панткес	Техас	
ЛАНЛ	Нью-Мексико	26
Испытательный полигон в штате Невада	Невада	
Инженерно-технический энергетический центр	Калифорния	
Лаборатория по изучению влияния энергетических технологий на здоровье человека	Калифорния	2

После 2013 года Экологическому управлению DOE все еще предстояло осуществить аналогичные работы на 9 площадках – всего свыше 2 900 установок, из них 38 % расположено в Хэнфорде и 28 % – в Саванна-Ривер.

Американская программа по выводу из эксплуатации энергетических реакторов

Несмотря на то, что энергетические реакторы не относятся к объектам ядерного наследия, в рамках монографии невозможно оставить без внимания американскую программу по выводу из эксплуатации атомных реакторов, общая стоимость работ по которой в настоящий момент оценивается в сумму свыше 100 млрд \$ [162]. По состоянию на осень 2015 года в США эксплуатировалось 99 реакторов (34 реактора типа BWR и 65 реакторов типа PWR) суммарной мощностью около 100 ГВт, вырабатывающих 19,5 % всей электроэнергии, производимой в стране [163]. На данный момент в США строятся

два реактора типа AP-1000* на АЭС V.-C. Summer (штат Южная Каролина, с 2013 года) и еще два на АЭС Vogtle (штат Джорджия, с 2013 года) общей мощностью около 5 ГВт. Их пуск запланирован на 2019–2020 гг. [164]. При этом к настоящему времени в режиме окончательного останова, в процессе вывода из эксплуатации или в режиме безопасного сохранения находится 19 энергетических реакторных установок, ликвидировано 15 энергоблоков (рис. 1.106) [165, 166].

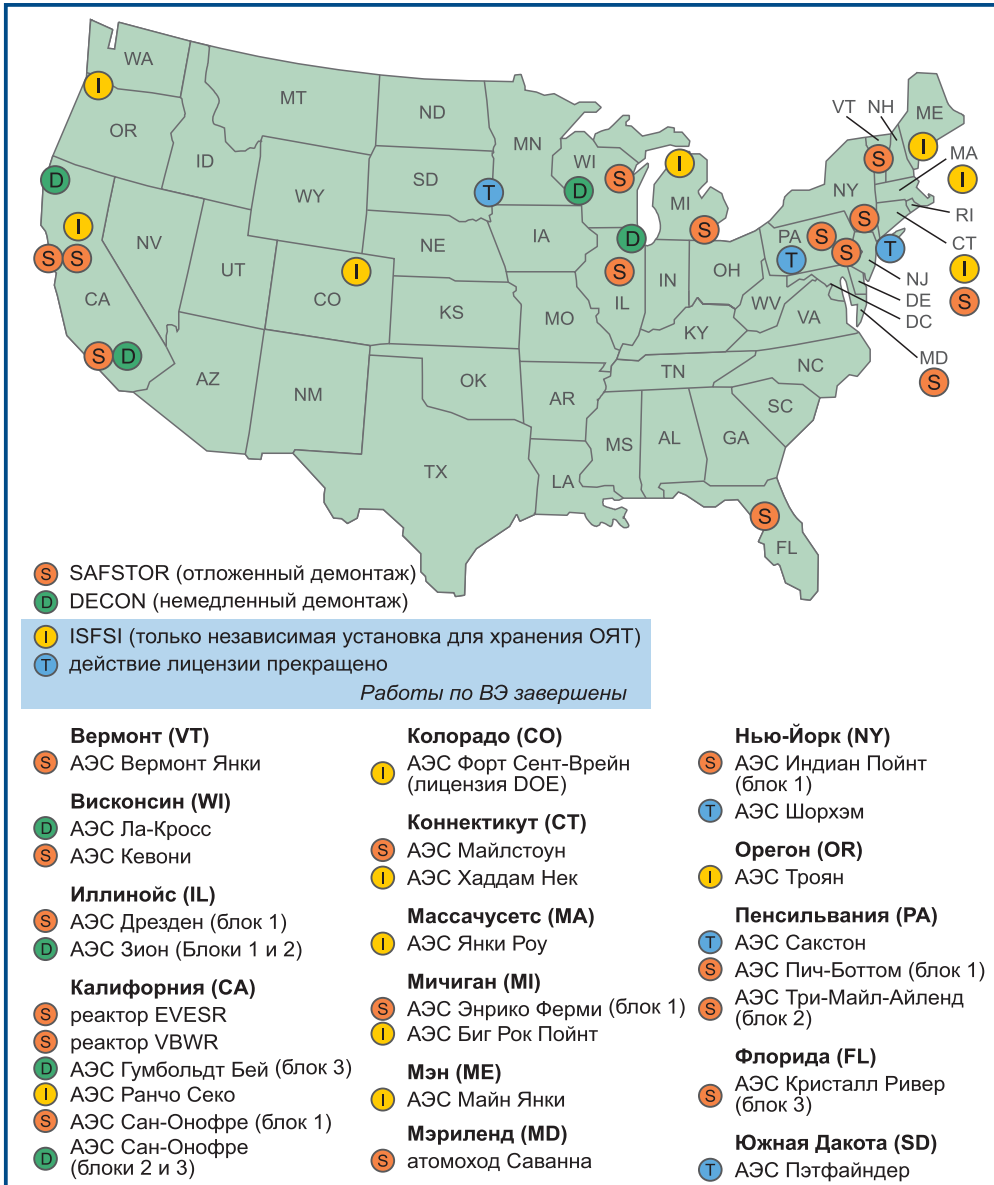


Рис. 1.106. Остановленные реакторы США (по состоянию на июль 2016 года)

* двухконтурный водно-водяной ядерный реактор с водой под давлением (PWR/ВВЭР), электрической мощностью порядка 1,1 ГВт. AP-1000 стал первым реактором поколения III+, получившим сертификат NRC.

Впервые в США о необходимости решения задачи вывода из эксплуатации атомных реакторов задумались в 1960-х гг. Тогда Комиссия по атомной энергии США (Atomic Energy Commission, АЕС) – государственное агентство, в то время осуществлявшее регулирующие функции по контролю деятельности в атомной отрасли*, занялось разработкой подходов, которые в конечном счете позволили бы осуществить безопасное снятие реакторных установок с эксплуатации, гарантировав реализацию одной из трех альтернатив [167]:

- сохранение установки в безопасном состоянии в течение продолжительного времени с минимизацией рисков для здоровья человека и окружающей среды;
- дезактивация установки до уровней, при которых площадку можно было бы использовать повторно в промышленных целях;
- дезактивация установки до уровней, при которых площадку можно было бы использовать для любых целей.

Перечисленные альтернативы были оформлены в виде трех стратегий вывода из эксплуатации [168]:

- DECON (англ. *decontamination*) – немедленный демонтаж или дезактивация всех строительных конструкций, оборудования, систем и компонентов реакторной установки, содержащих радиоактивные вещества, сразу после ее закрытия. ОЯТ и теплоноситель после продолжительной выдержки помещают на долгосрочное хранение. Все радиоактивно загрязненные материалы, элементы строительных конструкций и оборудование демонтируют и удаляют, обеспечивая тем самым радиационно безопасное состояние площадки, условия для прекращения действия ядерной лицензии, выданной NRC, полное или частичное освобождение площадки от регулирующего контроля (рис. 1.107).



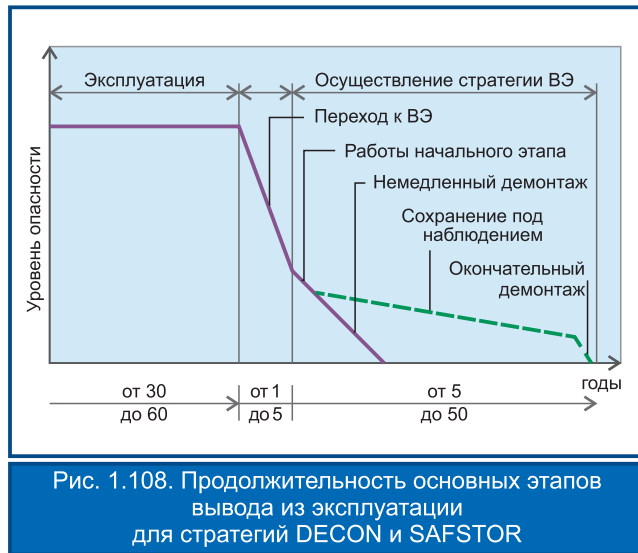
Рис. 1.107. Реактор Big Rock Point, выведенный из эксплуатации по стратегии DECON (слева – состояние площадки до начала проведения работ по выводу из эксплуатации, справа – текущее состояние площадки)

* после 1974 года функции АЕС были распределены между двумя государственными агентствами – Комиссией по ядерному регулированию США (NRC) и Управлением энергетических исследований и разработок (позже Министерством энергетики США, DOE).

- SAFSTOR или отложенный демонтаж (англ.

) – этот вариант еще называют долгосрочным «сохранением под наблюдением», когда реакторную установку, все системы и оборудование консервируют, изолируют от внешней среды, и затем поддерживают в безопасном состоянии в течение десятков лет (рис. 1.108). При этом неактивное оборудование демонтируют в целях последующего использования

или утилизации. Слабоактивное оборудование последовательно дезактивируют до уровней, при которых санкционировано его неограниченное использование или возможна утилизация. После окончания срока «сохранения под наблюдением», который может превышать 60 лет, процесс вывода из эксплуатации завершают, а площадка полностью или частично освобождается от регулирующего контроля.



Ликвидация может предусматривать достижение одного из двух вариантов конечного состояния реакторной площадки: «коричневая лужайка» (англ. или *«brownfield»*) или «зеленой лужайки» (англ. *«greenfield»*). Первая концепция предусматривает полный демонтаж оборудования, зданий и сооружений, не предназначенных для дальнейшего использования, переработку и удаление с территории всех радиоактивных отходов, приведение состояния площадки в пригодное для целей ее дальнейшего использования при реализации атомно-энергетических проектов (например, строительство нового блока АЭС или сооружение пункта хранения или захоронения РАО). В случае создания «зеленой лужайки» также осуществляется полный демонтаж зданий и сооружений реакторной установки, переработка и удаление всех РАО, рекультивация территорий, что позволяет передать площадку в неограниченное пользование.

- Концепция ENTOMB или захоронение на месте (англ.) предусматривает консервацию на месте наиболее опасных радиоактивных элементов, включая корпус реактора, оборудование первого контура, путем их изоляции внутри защитной оболочки, как правило, выполненной из бетона, и сооружения дополнительных барьеров безопасности, обеспечивающих герметизацию и выдержку загрязненных элементов до тех пор, пока в результате радиоактивного распада нуклидов их излучение не достигнет приемлемого уровня, допускающего освобождение площадки от регулирующего контроля.

В 1977 году Управление энергетических исследований и разработок США (Energy Research and Development, ERDA) завершило работу над составлением реестра неиспользуемых установок, подвергшихся радиоактивному загрязнению, и утвердило программу по их последовательному выводу из эксплуатации. Всего в эту программу было включено около 500 различных установок. Затем, после расформирования ERDA

реализация программы вывода из эксплуатации перешла под контроль Министерства энергетики США (DOE), которое разделило все установки на две группы: к категории «гражданских» было отнесено 114 установок, а к категории «военных» – 234 установки.

В табл. 1.52 (стр. 228–231) представлены данные по 34 реакторам, уже выведенным из эксплуатации или находившимся на этапе вывода из эксплуатации по состоянию на конец сентября 2015 года [167, 168, 169].

Как видно из табл. 1.52, в большинстве случаев из трех стратегий вывода из эксплуатации операторы реакторных установок отдают предпочтение варианту долгосрочного сохранения под наблюдением, предполагающего начало работ по полному демонтажу установки спустя 60 лет после ее окончательного останова. Однако и этот срок может быть увеличен, если соответствующее решение будет обосновано оператором с точки зрения обеспечения безопасности и защиты здоровья человека. Кроме того лицензиат может выбрать компромиссный вариант, при котором часть реакторной установки может быть ликвидирована или дезактивирована (DECON), а остальные части будут находиться в состоянии «сохранения под наблюдением» (SAFSTOR). Такое решение может быть обосновано как с точки зрения целесообразности выдержки радиоактивных материалов до распада радиоактивных веществ, так и с позиции наличия свободного места для захоронения отходов в пунктах окончательной изоляции [168].

Между тем стратегия захоронения на месте (ENTOMB) была реализована в отношении только трех американских реакторов: Hallam, Piqua и BONUS. Все три проекта были осуществлены в конце 1960-х гг., и с тех пор в США концепция ENTOMB ни разу не была реализована на практике [170].

Реактор Hallam

Проект по выводу из эксплуатации экспериментального реактора с графитовым замедлителем и натриевым охлаждением Hallam, мощностью 240 МВт был завершен в 1969 году. В ходе проведения работ по выводу из эксплуатации графит был удален из реактора и вывезен с территории реакторной площадки. Все наземные сооружения реакторной установки, за исключением бетонной коробки, в которой размещался промежуточный теплообменник, были снесены. На месте была захоронена лишь часть радиоактивно загрязненных конструктивных элементов. Всего было создано три зоны захоронения:

- зона 1, содержащая корпус реактора;
- зона 2 – зона так называемого «топливного хранилища», в которую поместили трубы глухих каналов из нержавеющей стали, раньше использовавшиеся для хранения ОЯТ. После того как бассейн выдержки был осушен, в трубы были помещены элементы технологических каналов, трубы регулирующих стержней, элементы защитных конструкций и отработавший нейтронный источник;
- зона 3 – могильник, состоящий из 12 камер, содержащих элементы замедлителя, загрязненные в ходе эксплуатации реактора из-за повреждения оболочки ТВЭЛов.

Кроме того, в этих камерах размещены загрязненные элементы конструкции, например, насосы, клапаны и т. п. Согласно оценкам, на момент выполнения работ под землей были захоронены материалы суммарной активностью порядка 300 000 Ки ($1,11 \cdot 10^{10}$ МБк). Проектный срок службы большей части компонентов могильника составляет 100 лет. Вывести площадку Hallam из-под регулирующего контроля планируется к 2070 году [171].

Табл. 1.52 – Американские энергетические реакторы, выведенные из эксплуатации или находящиеся на стадии вывода из эксплуатации

Реактор	Тип	Мощность [170]	Дата начала коммерческой эксплуатации [169]	Дата окончательного останова [169]	Стратегия ВЭ [169]	Причины окончательного останова [169]	Текущий этап ВЭ [168, 169]	Обращение с ОЯТ [169]	Ориентировочные сроки окончания работ по ВЭ [166]
BIG ROCK POINT	BWR	240 MBт	03.1963	29.08.1997	ID	2, другое	DECON – завершено	1	✓
BONUS	BWR	50 MBт	09.1965	01.06.1968	ISD	5, 6	ENTOMB	–	✓
Crystal River-3	PWR	2 609 MBт	03.1977	20.02.2013	SE	–	SAFSTOR	1	2074 год
CVTR	PTHW*	65 MBт	–	01.01.1967	Dd+SE	7, другое	DECON – завершено	–	✓
DRESDEN-1	BWR	700 MBт	07.1960	31.10.1978	Dd+SE	6	⑥ SAFSTOR	1	2036 год
ELK RIVER	BWR	58 MBт	07.1964	01.02.1968	ID	1, другое	DECON – завершено	–	✓
FERMI-1	FBR	200 MBт	–	29.11.1972	Dd+SE	4, 5	⑤⑥ SAFSTOR	2	2032 год
FORT ST. VRAIN	HTGR**	842 MBт	07.1979	29.08.1989	ID	1, другое	DECON – завершено	1	✓
GE VALLECITOS	BWR	50 MBт	10.1957	09.12.1963	Dd+SE	–	SAFSTOR	2	2025 год
HADDAM NECK	PWR	1 825 MBт	01.1968	05.12.1996	ID	6	③④	1	✓
HALLAM	SGR	256 MBт	11.1963	01.09.1964	Dd+SE	5	ENTOMB	–	✓

* реактор канального типа.

** высокотемпературный газоохлаждаемый реактор.

§ 1.3. Программа Министерства энергетики США по решению проблем ядерного наследия

Реактор	Тип	Мощность [170]	Дата начала коммерческой эксплуатации [169]	Дата окончательного останова [169]	Стратегия ВЭ [169]	Причины окончательного останова	Текущий этап ВЭ [168, 169]	Обращение с ОЯТ [169]	Ориентировочные сроки окончания работ по ВЭ [166]
HUMBOLDT BAY	BWR	200 MBt	08.1963	02.07.1976	Dd+PD+SE	5	②③④ DECON – в процессе	①	2017 год
INDIANA POINT-1	PWR	615 MBt	10.1962	31.10.1974	Dd+PD+SE	5	SAFSTOR	①	2026 год
KEWAUNEE	PWR	1 772 MBt	06.1974	07.05.2013	Dd+SE	2, 6	SAFSTOR	①	2073 год
LA CROSSE	BWR	165 MBt	11.1969	30.04.1987	Dd+PD+SE	2	SAFSTOR	①	2019 год
MAINE YANKEE	PWR	2 700 MBt	12.1972	01.08.1997	ID	6	⑤ DECON - завершено	①	✓
MILLSTONE	BWR	2 011 MBt	03.1971	01.07.1998	Dd+PD+SE	6	SAFSTOR	①	2056 год
S Savannah*	PWR	74 MBt	+++	01.11.1970	Dd+SE	+++	SAFSTOR	②	2031 год
PATHFINDER	BWR	190 MBt	-	01.10.1967	Dd+SE	5	⑥ DECON – завершено	②	✓
PEACH BOTTOM-1	HTGR	115 MBt	06.1967	01.11.1974	Dd+SE		①⑤ SAFSTOR	②	2034 год
PIQUA	OCM	46 MBt	11.1963	01.01.1966	ISD	4, 5	⑥ ENTOMB	-	✓
RANCHO SECO-1	PWR	2 722 MBt	04.1975	07.06.1989	Dd+PD+SE	5, 6	DECON – завершено	①	✓
SAN ONOFRE-1	PWR	1 347 MBt	01.1968	30.11.1992	Dd+PD+SE	другое	③ DECON – завершено SAFSTOR	①	2030 год

* судно с ядерной силовой установкой.

Реактор	Тип	Мощность [170]	Дата начала коммерческой эксплуатации [169]	Дата окончательного останова [169]	Стратегия ВЭ [169]	Причины окончательного останова [169]	Текущий этап ВЭ [168, 169]	Обращение с ОЯТ [169]	Ориентировочные сроки окончания работ по ВЭ [166]
SAN ONOFRE-2	PWR	3 438 МВт	08.1983	07.06.2013	DECON	+++	DECON – в процессе	–	2031 год
SAN ONOFRE-3	PWR	3 438 МВт	04.1984	07.06.2013	DECON	+++	DECON – в процессе	–	2031 год
SAXTON	PWR	24 МВт	03.1967	01.05.1972	ID	другое	⑥ DECON – завершено	②	✓
SHIPPING-PORT	PWR	236 МВт	05.1958	01.10.1982	ID		⑥ DECON – завершено	②	✓
SHOREHAM	BWR	2 436 МВт	-	01.05.1989	ID	7, другое	⑥ DECON – завершено	②	✓
THREE MILE ISLAND-2	PWR	2 770 МВт	12.1978	28.03.1979	Иная	4, 5	⑥ SAFSTOR	②	2036 год
TROJAN	PWR	3 411 МВт	05.1976	09.11.1992	Dd+PD+SE	6	DECON – завершено	①	✓
VERMONT YANKEE	BWR	1 912 МВт	11.1972	29.12.2014	-	+++	SAFSTOR	①	2073 год
YANKEE NPS	PWR	600 МВт	07.1961	01.10.1991	ID	5, 7	③④ DECON – завершено	①	✓
ZION-1	PWR	3 250 МВт	12.1973	12.02.1998	Dd+PD+SE	5, 6	①⑤ DECON – в процессе	①	2020 год
ZION-2	PWR	3 250 МВт	09.1974	13.02.1998	Dd+PD+SE	5, 6	①⑤ DECON – в процессе	①	2020 год

Условные обозначения

Стратегия вывода из эксплуатации	Описание
ID	немедленный демонтаж
Dd+SE	отложенный демонтаж с обеспечением безопасного хранения оставшихся радиационно загрязненных зон
Dd+PD+SE	отложенный демонтаж, включая частичный демонтаж и обеспечение безопасного сохранения оставшихся радиационно загрязненных зон
ISD	захоронение на месте с инкапсулирующей радиоактивных материалов и ограничением доступа на площадку
другое	ничто из вышеперечисленного

Причина закрытия	Описание
2	Устаревшие технологии и технологические процессы
	Нерентабельность технологического процесса
	Изменение требований лицензирования
4	Инцидент во время эксплуатации
5	Технологические причины
6	Экономические причины
7	Общественное недовольство или политическое решение
другое	Ничто из вышеперечисленного

Стадия вывода из эксплуатации	Описание
①	Разработка окончательной редакции плана работ по выводу из эксплуатации
②	Кондиционирование отходов на площадке (только РАО от вывода из эксплуатации)
③	Транспортировка отходов с площадки (только РАО от вывода из эксплуатации)
④	Частичный демонтаж
⑤	Окончательный демонтаж
⑥	Прекращение действия лицензии (официальное завершение процедуры вывода из эксплуатации)
	На площадке действует только независимая установка для хранения ОЯТ
<input checked="" type="checkbox"/>	Работы по выводу из эксплуатации полностью завершены

Обращение с ОЯТ	Описание
1	Сухое хранение на площадке
2	Хранение вне реакторной площадки

Реактор Piqua

Реактор с органическим замедлителем и охлаждением Piqua мощностью 45,5 МВт был также выведен из эксплуатации в соответствии с концепцией «захоронения на месте». Этот реактор функционировал всего в течение трех лет с июня 1963 года по январь 1966 года и был окончательно остановлен по финансовым и техническим соображениям. Спустя год на площадке начались работы по его выводу из эксплуатации, завершившиеся в 1969 году. В результате проведения работ [172]:

- топливо, отдельные элементы активной зоны реактора и другие радиоактивные материалы были вывезены с территории реакторной площадки;
- органический теплоноситель сожжен;
- корпус реактора, тепловой экран, опорные решетки для крепления топливных стержней и опорные цилиндры активной зоны были захоронены на месте.

Вокруг корпуса реактора, целиком захороненного под землей, расположен биологический экран из бетона толщиной стен около 2,5 м (рис. 1.109). Согласно оцен-

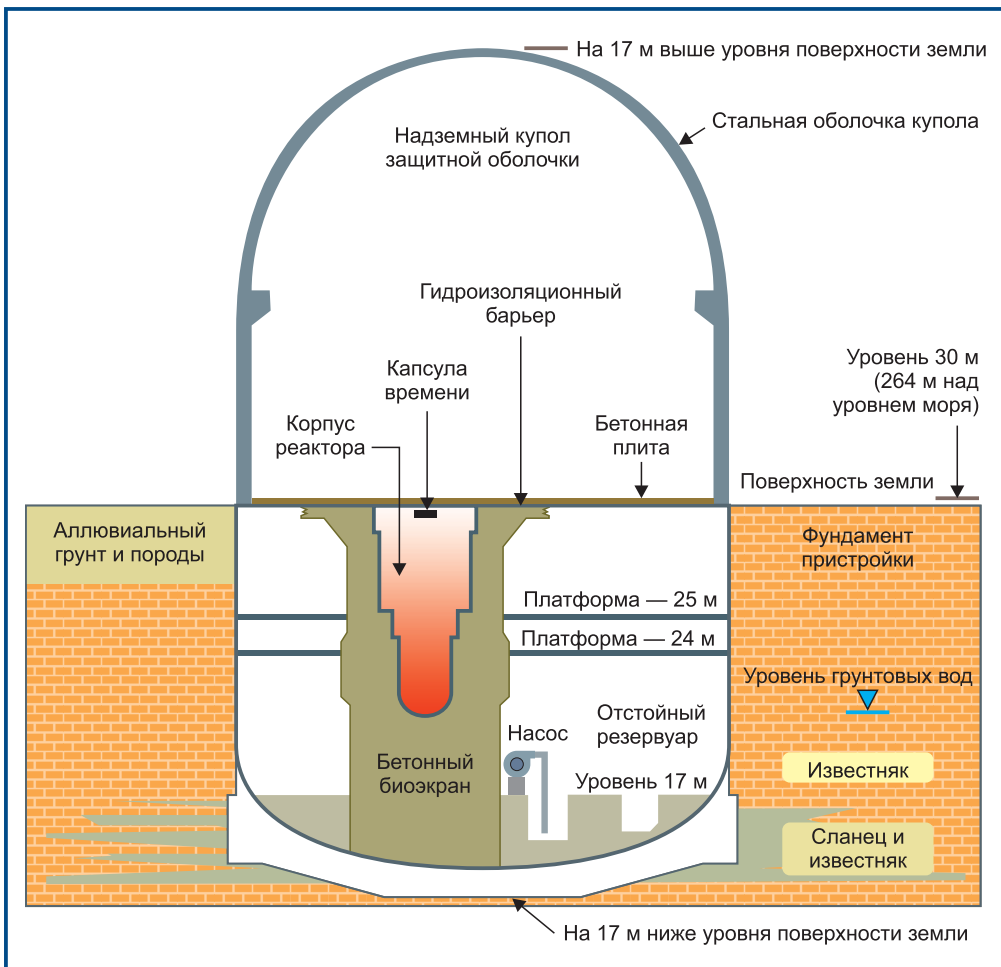


Рис. 1.109. Захороненный реактор Piqua

кам, с внутренней части экрана продукты активации прошли на глубину около 0,6 см. В виду того, что во время проведения работ по выводу из эксплуатации все топливо было полностью удалено из реактора, а конструкция самого экрана способна обеспечивать надежную изоляцию окружающей среды от радиоактивного излучения, такой барьер способен предотвратить и выход продуктов активации, образующихся вследствие процессов радиоактивного распада. Для предотвращения инфильтрации в установку поверхностных вод пол внутри реакторного здания был покрыт слоем водоупорного материала и бетона, также позволяющего предотвратить проникновение в установку людей. Два экранированных металлических ящика, содержащие подробную информацию по проекту установки и ее содержимому («капсулы времени»), были заложены внутрь конструкции: одна – в стену реакторного здания, другая – в бетонное перекрытие над корпусом реактора.

Всего на момент осуществления работ (1967–1969 гг.) в объекте было захоронено 250 000 Ки суммарной активности ($9,25 \cdot 10^{12}$ кБк). Ожидается, что площадка будет освобождена от регулирующего контроля не ранее чем через 120 лет.

Реактор BONUS

Третий блок, захороненный на месте, – реактор типа BWR BONUS (Boiling Nuclear Superheater Power Station) мощностью 50 МВт тепл., расположен на острове Пуэрто-Рико (рис. 1.110). Работы по выводу из эксплуатации были завершены в 1970 году. В результате корпус реактора и некоторые другие конструкционные элементы были захоронены на месте. Отработавшее и необлученное топливо, а также часть



Рис. 1.110. Захороненный реактор BONUS

радиоактивных материалов (например, управляющие стержни) были вывезены с территории реакторной площадки. На момент выполнения работ под землей было захоронено порядка 50 000 Ки суммарной активности ($1,85 \cdot 10^8$ МБк) [173].

Организация работ по выводу из эксплуатации

По состоянию на середину 2016 года в США на этапе вывода из эксплуатации находилось 19 реакторных блоков АЭС, выведено из эксплуатации – 16 энергетических реакторных установок (см. табл. 1.52 и рис. 1.106) [176]. В целом всю процедуру вывода из эксплуатации можно условно разделить на четыре последовательных этапа, на каждом из которых предусмотрены соответствующие виды отчетности, которые оператор площадки должен направить на рассмотрение регулирующему органу (рис. 1.111) [175]:

- На первом этапе таким документом является предварительное уведомление о выводе из эксплуатации (англ. Initial Notification). В случае принятия решения о закрытии реакторной установки ее оператор должен в течение 30 дней в письменной форме уведомить регулирующий орган об окончательном останове реактора.

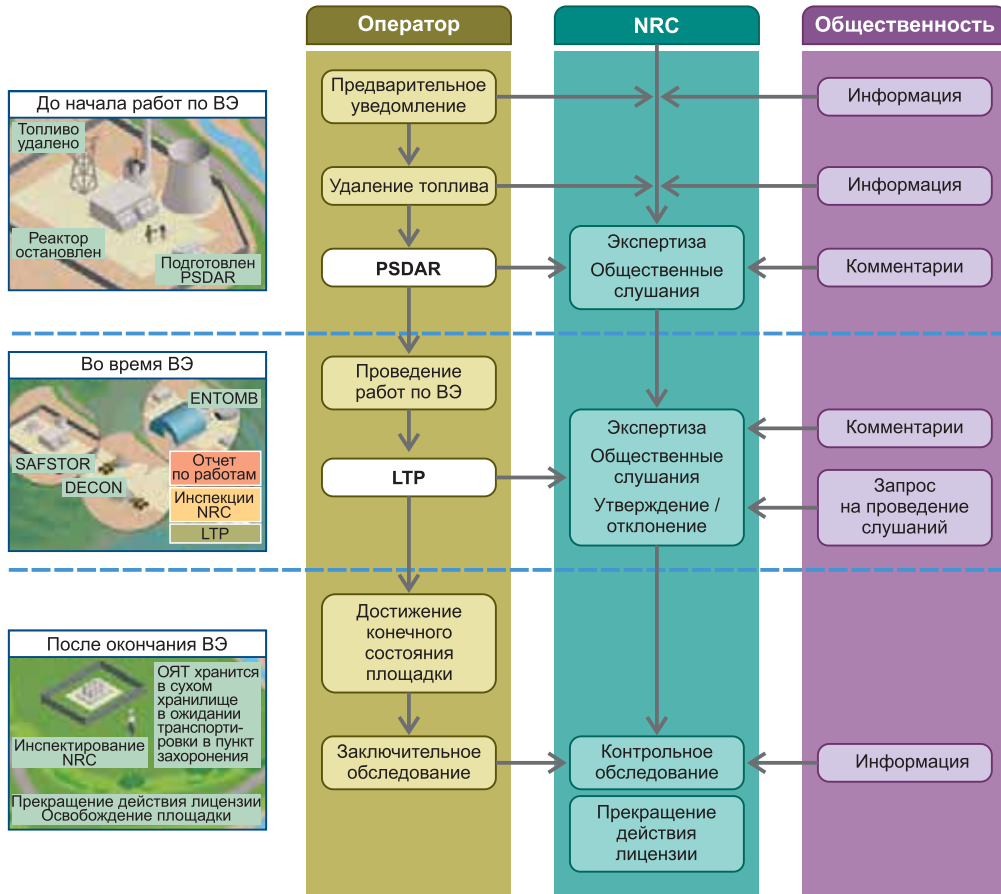


Рис. 1.111. Процедура вывода из эксплуатации энергетического реактора. PSDAR – отчет о запланированных работах по выводу из эксплуатации; LTP – план по прекращению действия лицензии; SAFSTOR – отложенный демонтаж; DECON – немедленный демонтаж; ENTOMB – захоронение на месте

Еще одно письменное уведомление должно быть подготовлено оператором после окончательной выгрузки топлива из реактора. После этого с оператора установки снимается ответственность за исполнение целого ряда требований, применимых исключительно в процессе эксплуатации реакторной установки.

- Спустя два года после официального уведомления регулирующего органа о закрытии установки от ее оператора требуется представить отчет о запланированных работах по выводу из эксплуатации (англ. Post-Shutdown Decommissioning Activities Report, PSDAR). В таком отчете оператор должен описать мероприятия по выводу из эксплуатации, планируемые к реализации на данном объекте, представить график работ и оценку их стоимости. Кроме того, в отчете необходимо привести доказательства того, что потенциальное воздействие запланированных работ по выводу из эксплуатации уже было проанализировано в рамках имеющихся отчетов по воздействию на окружающую среду. В противном случае от оператора потребуются направить соответ-

ствующие заявки на внесение изменений в условия действия лицензии, предварительно представив NRC подробные отчеты по анализу дополнительных воздействий на окружающую среду, обуславливаемых проведением запланированных работ. По прошествии 90 дней с момента принятия отчета на рассмотрение регулятором оператор может приступить к выполнению заявленных работ по выводу из эксплуатации. Таким образом, особого разрешения от NRC для этого не требуется. Исключением из правил являются три возможные ситуации, при которых выполнение работ по выводу из эксплуатации может привести следующим последствиям [176]:

- площадка не сможет быть освобождена от регулирующего контроля и передана в неограниченное пользование;
- запланированные работы могут обуславливать непредвиденные последствия для окружающей среды;
- будут израсходованы непомерно большие объемы денежных средств.

Во всех остальных случаях со дня получения отчета NRC и в течение следующих трех месяцев оператор площадки может приступить к проведению некоторых работ по выводу из эксплуатации. На эти работы может быть израсходовано не более 3 % средств, предусмотренных в соответствии с разработанным проектом и планом работ. Через 90 дней при условии отсутствия каких-либо замечаний, оператор может приступить к последовательной реализации заявленной программы работ по выводу из эксплуатации, включающей демонтаж корпуса реактора, парогенераторов, крупных систем трубопроводов, насосов и клапанов.

NRC в свою очередь заносит полученный от оператора отчет в базу Федерального Реестра США, после чего широкая общественность может ознакомиться с подготовленными оператором материалами. Также NRC организует общественные слушания с участием местных жителей, проживающих в окрестностях выводимой из эксплуатации реакторной установки.

• План по прекращению действия лицензии (англ. License Termination Plan, LTP) должен быть подготовлен оператором реакторной установки и передан на рассмотрение регулятору вместе с соответствующей заявкой на прекращение действия ядерной лицензии. Сделать это оператор должен не позднее чем за два года до предполагаемой даты прекращения действия лицензии. В плане требуется представить следующую информацию:

- данные по характеристике площадки;
- перечень еще не выполненных работ по выводу из эксплуатации;
- план работ по очистке территории площадки;
- подробный план проведения радиологических обследований площадки, предваряющих ее освобождение от регулирующего контроля;
- оценку затрат на выполнение оставшихся работ по выводу из эксплуатации;
- дополнение к отчету о воздействии на окружающую среду, содержащее любые новые сведения или данные о существенных изменениях состояния окружающей среды в результате проведения работ по очистке территории реакторной площадки.

В большинстве случаев итогом проведения работ по выводу из эксплуатации становится освобождение реакторной площадки от регулирующего контроля и ее передача в неограниченной пользование. Это означает, что уровни остаточного радиоактивного загрязнения на площадке не превысят установленных NRC норм (25 мБэр/год). В противном случае, предполагающем наложение ограничений на использование земельного участка, в планах по выводу из эксплуатации оператору необходимо указать, какую именно категорию землепользования планируется присвоить рассматриваемому участку, а также описать мероприятия по организации общественных слушаний, ведомственного контроля и обеспечению достаточного финансирования, т. е. то каким образом будут соблюдены требования регулятора, установленные в отношении случая присвоения площадке статуса ограниченного землепользования.

NRC публикует план по прекращению действия лицензии в Федеральном Регистре США, тем самым инициируя процедуру общественных слушаний. По результатам их проведения NRC принимает решение об утверждении плана и вносит изменения в условия действия лицензии. Оператор или лицо, ответственное за вывод из эксплуатации, должны в течение 60 лет с момента окончательного останова реактора выполнить оставшуюся часть указанных в плане работ. Хотя и данный срок может быть продлен в том случае, если регулирующий орган сочтет это необходимым в целях обеспечения защиты здоровья населения и обеспечения безопасности, например, ввиду отсутствия доступных пунктов для окончательной изоляции РАО или других факторов, связанных с особенностями конкретной площадки.

- Завершив работы по выводу из эксплуатации, оператор должен направить на рассмотрение регулятору Отчет о результатах достижения конечного состояния площадки (англ. Final Status Survey Report, FSSR). В нем следует представить описание достигнутых радиологических условий на площадке, а также запросить у NRC либо прекращения действия ядерной лицензии, либо разрешения на изменение географических границ установки, указанных в условиях действия лицензии таким образом, чтобы в периметре действия лицензии оказалась только площадка пункта сухого хранения радиоактивных отходов (например, независимая установка для хранения ОЯТ). После чего NRC утверждает FSSR и принимает решение об окончании действия лицензии, основываясь на данных о том, насколько точно оператор следовал утвержденному плану и графику работ, а также на уровнях остаточного загрязнения площадки.

Еще один важный вопрос, тесно связанный с решением задач в области вывода из эксплуатации, – обращение с ОЯТ выводимых и выведенных из эксплуатации реакторов. Так, в США несколько проектов по выводу из эксплуатации реакторных установок было завершено еще в 1990-е гг. Причем вопрос долгосрочного обращения с выгруженным из этих объектов ОЯТ еще долго оставался открытым. С 1977 года, после введения запрета на переработку ОЯТ в США, отработавшее топливо было признано ВАО, ответственность за окончательную изоляцию которых в пункте глубинного геологического захоронения была возложена на государство. Захоронение РАО в этом объекте планировалось начать еще в январе 1998 года. До момента создания такой установки ОЯТ подлежало размещению в пунктах сухого и мокрого хранения, расположенных на реакторных площадках. Тем не менее, исполнить свои обязательства перед операторами АЭС государство так и не смогло.

В соответствии с действующими законодательными нормами, утвержденными NRC, оператор площадки может продать часть находящихся в его собственности земель

в случае, если их характеристики соответствуют критериям освобождения от регулирующего контроля. Оставшиеся земли, отведенные под размещение пункта хранения ОЯТ, остаются в собственности оператора. На такие отдельно стоящие пункты хранения на площадках с выведенными из эксплуатации АЭС, называемые «независимыми установками для хранения ОЯТ», продолжают распространяться требования NRC и положения ядерной лицензии. На оператора площадки возложена ответственность за обеспечение физической безопасности на площадке, а также финансовое обеспечение работ по техническому обслуживанию и окончательному выводу из эксплуатации таких установок.

Финансирование работ по выводу из эксплуатации

После окончания Второй мировой войны ведущие ядерные державы сосредоточили свои усилия на совершенствовании атомноэнергетических технологий, совершив в 1950–1960-е гг. громадный рывок в развитии отрасли мирного использования атомной энергии. В США уже имевшиеся к тому времени наработки стали основой для создания собственного флота гражданских атомных реакторов. Большинство первых реакторов и установок ЯТЦ, появившихся в начале 1950-х гг., представляло собой маломощные опытные модели, основной задачей которых была отработка определенных технологий и демонстрация экономической целесообразности производства электроэнергии на АЭС. Эксплуатация многих демонстрационных моделей была довольно быстро признана нецелесообразной как с точки зрения их экономической эффективности, так и из соображений безопасности. Эти реакторы были окончательно остановлены спустя всего пару лет после запуска (реактора Халлам, Пикуа, Элк Ривер). Одной из первых удачных моделей реакторов, разработанных в США, стал опытный реактор BONUS, формально построенный за пределами США в Пуэрто-Рико. Именно эта модель реактора мощностью всего в 17 МВт (эл.) стала прототипом ядерных реакторов кипящего типа (BWR), которые впоследствии наряду с легководными реакторами с водой под давлением (PWR) стали наиболее распространенными видами атомных реакторов в США.

На первых парах становления атомноэнергетических технологий о вопросах вывода из эксплуатации реакторов по окончании их срока службы особо не задумывались: главная цель состояла в создании все более совершенных и мощных установок. В то время считалось, что на вывод из эксплуатации может уйти не более 10 % средств, затраченных на сооружение реактора [177]. Причем, несмотря на то, что данная цифра приводилась во многих официальных отчетах, каких-либо доказательств, обосновывающих правильность такой оценки, опубликовано не было. По мере реализации проектов по выводу из эксплуатации становилось все очевиднее, что затраты в этой области были существенным образом недооценены, и что сама структура затрат – куда более разнообразна, чем предполагалось ранее. Вопросы обеспечения безопасности, давление общественности, срывы графиков проведения работ и нехватка опыта – все это в конце концов привело к осознанию реальных масштабов проблемы.

Стало очевидно, что решить данную проблему можно лишь проработав три группы вопросов: совершенствование процедуры планирования работ, оценки затрат и обеспечение гарантированного финансирования всех работ. С тех пор затраты на вывод из эксплуатации стали одним из ключевых факторов, определяющих перспективность реализации того или иного атомноэнергетического проекта. Правительство и регулирующие органы также обеспокоились сложившейся ситуацией. В 1988 году NRC, наконец, завершило разработку руководств и особых финансовых критериев в области вывода из

эксплуатации ядерных установок. Через два года эти нормы были уточнены: были сформулированы механизмы финансирования работ по выводу из эксплуатации (при подаче заявки на получение лицензии на эксплуатацию от оператора требовалось предоставление финансовых гарантий на проведение работ по выводу из эксплуатации в размере не менее 100 млн долларов США (по курсу на 1984 год) за каждую реакторную установку) и проведена оценка общих финансовых обязательств. Эта оценка пересматривалась в последующие годы, в последний раз – в 2003 году.

Очевидно, что суммарные затраты на реализацию проекта по выводу из эксплуатации реакторной установки зависят от целого ряда факторов: типа реактора, его места расположения, затрат на обращение с отходами и их захоронение, плана по хранению ОЯТ, стратегии вывода из эксплуатации и др. В целом, согласно последним оценкам NRC, суммарные затраты на проведение работ по выводу из эксплуатации одного реакторного блока могут колебаться в диапазоне от 280* до 612** млн долларов США.

В свою очередь оператор реакторной установки обязан не реже чем раз в два года отчитываться о состоянии фондов, предназначенных для вывода из эксплуатации. В течение пяти лет, предшествующих окончательному останову реактора, и в течение года после закрытия установки такая отчетность должна предоставляться оператором уже ежегодно. В финансовом отчете от оператора требуется указать следующие сведения:

- результаты оценки объема средств, необходимых для проведения работ по выводу из эксплуатации;
- объем средств, аккумулированных на счете по состоянию на конец года, предшествующего публикации данного отчета;
- график сбора недостающих средств;
- предположения относительно возможности повышения затрат на проведение работ по выводу из эксплуатации, уровня доходности активов и других факторов, способных повлиять на прогнозы;
- информацию о любых договорах, реализация которых представляет статью дохода оператора;
- любые изменения в части механизмов обеспечения финансовых гарантий в области вывода из эксплуатации, произошедшие за отчетный период, и любые существенные изменения в положениях договора по трастовому фонду.

В целом регулятором определено три основных механизма, посредством которых оператор должен продемонстрировать свою финансовую состоятельность:

- Авансовый платеж (англ. prepayment) – это вклад, который оператор вносит на отдельный счет еще до начала эксплуатации реакторной установки, например, в трастовый фонд.
- Залог, страховка или финансовая гарантия контролирующей компании – все эти механизмы позволяют обеспечить уверенность в том, что все затраты на вывод из эксплуатации будут покрыты другой стороной в случае неплатежеспособности оператора.

* оценка для среднестатистического американского реактора PWR мощностью 1100 МВт.

** оценка для среднестатистического американского реактора BWR.

- Внешний резервный фонд (англ. external sinking fund) – отдельный счет, не находящийся под управлением оператора установки, на котором с течением времени будут аккумулироваться средства, предназначенные для вывода из эксплуатации.

Следует отметить, что все описанные выше механизмы, обеспечивают финансовые гарантии исключительно в области вывода из эксплуатации, при этом они не охватывают вопросы обращения с ОЯТ и его окончательного захоронения. Как уже отмечалось выше, правительство США взяло на себя обязательство обеспечить место для окончательной изоляции всего объема накопленного ОЯТ к 31 января 1998 года, которое так и не было выполнено. Финансирование работ по созданию такой установки велось из специального Фонда ядерных отходов (англ. Nuclear Waste Fund), учрежденного на основании положений закона «О политике обращения с ядерными отходами». В соответствии с этим законом, операторы АЭС были обязаны уплачивать по 0,001 доллара за каждый кВт/ч проданной электроэнергии в Фонд, деньги из которого расходовались на осуществление программы работ по разработке проекта пункта глубинного геологического захоронения ОЯТ и ВАО, а также выбор и характеризацию площадки (проект Якка-Маунтин). В среднем в данный фонд ежегодно поступало около 750 млн долларов США. К 2014 году на счетах фонда находилось порядка 24 млрд долларов США, процент от которых приносил государственной казне США ежегодный доход в размере 1 млрд долларов США. На реализацию замороженного на сегодняшний день проекта Якка-Маунтин было потрачено еще около 8 млрд долларов США. Несмотря на то, что пункт захоронения так и не был открыт, сбор средств на захоронение ОЯТ с операторов АЭС продолжался. Между тем операторам уже выведенных из эксплуатации АЭС приходилось покрывать расходы, связанные с хранящимся на их площадках ОЯТ. Так, например, компании Янки, оператору трех закрытых АЭС, приходилось ежегодно тратить миллионы долларов на обеспечение безопасной эксплуатации сухих хранилищ ОЯТ. В результате судебного разбирательства оператору все-таки удалось возместить затраты на обращение с ОЯТ: 14 ноября 2013 года компании Янки была предоставлена компенсация в размере 126,3 млн долларов США за обращение с ОЯТ на установке Коннектикут Янки, 73,3 млн долларов США – на Янки Атомик, 35,8 млн долларов США – на Мейн Янки. Таким образом, общий размер компенсации составил более 235 млн долларов США.

Спустя год сбор денежных средств в Фонд был прекращен. Данное решение было принято во исполнение постановления Апелляционного суда США от 16 мая 2014 года, рассмотревшего иск, поданный в 2011 году от операторов ядерных установок и Национальной ассоциации представителей энергетических компаний по вопросам регулирования (NARUC) и Институтом ядерной энергетики США (NEI).

Таким образом, в настоящий момент, учитывая большое количество реакторов, чей срок службы близится к концу* проблема финансового обеспечения работ по выводу из эксплуатации встала действительно остро как на государственном, так и на региональном уровне. С одной стороны, встает вопрос о том, хватит ли накопленных в фонде средств для реализации всех предусмотренных работ по выводу из эксплуатации. С другой стороны, как при отсутствии государственного пункта захоронения ОЯТ и ВАО осуществлять обращение с ними и имеются ли для этого достаточные средства?

* большая часть АЭС была построена в конце 1970–1980-х гг. и, учитывая 40-летний срок эксплуатации, должна быть остановлена к 2020 г.

Что касается первого вопроса, то собрано довольно много аналитических данных, свидетельствующих о реальной нехватке средств, накопленных к настоящему времени в трастовых фондах. Вот некоторые из них [175]:

- В 2007 году Счетная палата США* проанализировала состояние 222 разных трастовых фондов, принимавших отчисления от 99 различных эксплуатирующих организаций, в ведении которых в общей сложности находилось 122 ядерных реактора. Анализ охватывал данные, полученные за 1998, 2000, 2001 и 2004 годы. В целях определения достаточности средств фондов было проведено моделирование по методу Монте-Карло, что позволило оценить сопутствующие риски, связанные с реализацией проектов. В результате было установлено, что в большинстве случаев на счетах фондов имеются достаточные средства для реализации заявленных обязательств по выводу из эксплуатации. Тем не менее, в 35 % случаев высока вероятность невыполнения заявленных обязательств. Примером такой ситуации является закрытая в 2014 году АЭС Вермонт Янки. Данный реактор был закрыт на 17 лет раньше срока прекращения действия лицензии по экономическим соображениям из-за падения цен на природный газ, вызванного ростом объема добычи сланцевого газа и, как следствие, удешевления электроэнергии, вырабатываемой тепловыми станциями. Согласно разработанному плану проведения работ вывод из эксплуатации в соответствии со стратегией SAFSTOR должен занять около 60 лет, а суммарные затраты на реализацию проекта были оценены в 1,2 млрд долларов США. При этом на конец 2014 года в трастовом фонде было накоплено всего лишь 664,6 млн долларов США.

- В 2012 году Счетная палата США провела переоценку суммарных затрат на вывод из эксплуатации реакторов в сравнении с усредненной величиной затрат на вывод из эксплуатации стандартного реакторного блока. В рамках анализа было рассмотрено 12 реакторных установок. В результате для 5 реакторов отклонение от усредненной величины суммарных затрат, обусловленных спецификой площадки, составило от 57 до 76 %, а для остальных семи – от 84 до 103 %.

- В 2016 году в ходе очередной проверки отчетности регулирующим органом (NRC) было установлено, что формула для расчета минимальных затрат на вывод из эксплуатации, выведенная на основании аналитической работы, проведенной в 1978–1980 годы, не позволяет получить реалистичную оценку затрат и необходима ее корректировка. Так, например, реальные затраты на вывод из эксплуатации конкретной реакторной установки составили 2,2 млрд долларов США, в то время как в результате вычислений было получено значение в 600 млн долларов США.

Вторая проблема, связанная с неисполнением государством обязательств по захоронению ОЯТ, также стоит достаточно остро. Так, несмотря на то, что к январю 1998 года пункт централизованного геологического захоронения ОЯТ и ВАО так и не был открыт, правительство продолжило собирать налог с операторов АЭС, в том числе и с операторов уже выведенных из эксплуатации реакторных установок. В результате за все время своего существования с 1983 по конец 2015 года в Фонде ядерных отходов было накоплено почти 42 млрд долларов США. На финансирование работ по замороженному в настоящему времени проекту Якка-Маунтин ушло всего 7,6 млрд долларов, а значит еще 34,3 млрд долларов США так и остались на балансе фонда. Всего согласно последним оценкам DOE, проведенным в 2008 году, на лицензирование, сооружение,

* англ. U.S. Government Accountability Office, GAO.

эксплуатацию и закрытие пункта глубинного геологического захоронения ОЯТ и ВАО должно было уйти около 96,2 млрд долларов США. В установке планировалось захоронить порядка 122 000 тонн отходов, 80 % из которых по объему должны были занять РАО, образовавшиеся в результате работы энергетических реакторов, а остальные 20 % – на площадках ядерного оружейного комплекса США. Таким образом, из 96,2 млрд всего 77,4 млрд долларов США было бы израсходовано из Фонда ядерных отходов, а оставшиеся 18,8 млрд долларов США – из федерального бюджета.

Из-за того, что проект по созданию пункта централизованного захоронения ОЯТ был заморожен, операторам АЭС пришлось вложить значительные средства в разработку и сооружение независимых установок для хранения ОЯТ. И даже, несмотря на то, что на счетах Фонда остается более 34 млрд долларов США, эти деньги могут быть израсходованы исключительно на работы по программе захоронения ОЯТ. Поэтому в целях компенсации понесенных расходов операторам приходится обращаться в суд. Так, к концу 2015 года общий размер компенсаций, выплаченных операторам АЭС, составил 5,3 млрд долларов США, а в ближайшие 10 лет из-за отсутствия пункта захоронения ОЯТ может быть выплачено еще более 24 млрд долларов США. По некоторым данным совокупный размер финансового ущерба для государственной казны от нереализованных вовремя обязательств по захоронению ОЯТ может составить порядка 50 млрд долларов США. Важно отметить, что объем накопленных к настоящему времени ОЯТ и ВАО уже превысил максимальную вместимость, предусмотренную в рамках реализации проекта Якка-Маунтин. Таким образом, даже если в ближайшие десятилетия такой объект все-таки будет построен в США, DOE все равно придется взять на себя финансовую ответственность за ОЯТ и ВАО, которые в этот пункт захоронения не поместятся.

На официальном уровне работы, направленные на обеспечение долгосрочной безопасности ОЯТ и ВАО, на данный момент основываются на положениях итогового отчета экспертной комиссии по ядерному будущему США. В январе 2012 года в рамках данного отчета был сформулирован целый ряд рекомендаций, касающихся как разработки законодательных актов, так и принятия решений административного характера, направленных на формирование новой стратегии по обращению с ОЯТ и РАО. В январе 2013 года правительством США были одобрены следующие рекомендации:

- разработать новый подход к выбору площадки для строительства установок по обращению с РАО, основанный на общественном одобрении проекта;
- создать новую организацию, которая будет заниматься исключительно реализацией программ по обращению с РАО, наделить ее соответствующими полномочиями и предоставить необходимые ресурсы;
- открыть доступ к фонду, формируемому за счет отчислений операторов ядерных установок;
- незамедлительно приступить к разработке проекта одного или более пунктов геологического захоронения;
- незамедлительно приступить к разработке проекта одного или более пунктов централизованного хранения;
- принять меры по подготовке к крупномасштабной транспортировке ВАО и ОЯТ в централизованные хранилища и пункт (пункты) геологического захоронения;

- способствовать развитию инновационных технологий и трудовых ресурсов в атомной отрасли;
- на международном уровне обеспечить лидирующие позиции США в решении вопросов, связанных с обеспечением ядерной и радиационной безопасности, обращением с РАО и нераспространением ядерного оружия.

В целом на основании приведенных выше рекомендаций в общих чертах была описана новая программа по обращению с ОЯТ и ВАО, в рамках которой можно выделить три основных этапа:

- к 2021 году – завершить строительные работы и приступить к эксплуатации опытной установки, которая в первую очередь примет на захоронение ОЯТ с остановленных реакторов;
- к 2025 году будут определены площадки для сооружения пунктов промежуточного хранения большой вместимости, достаточной для обеспечения гибкости системы обращения с отходами; при этом передача на хранение больших объемов ОЯТ позволит сократить размер государственного долга за невыполнение обязательств по захоронению ОЯТ;
- к 2048 году планируется достигнуть ощутимого прогресса в выборе площадки для строительства пункта геологического захоронения ОЯТ и ее характеризации.

По состоянию на конец 2016 года DOE подготовило официальное предложение о создании отдельного пункта глубинного геологического захоронения для окончательной изоляции военного ОЯТ и ВАО.

Состояние работ на площадках с выводимыми из эксплуатации энергетическими реакторами

Всего по состоянию на середину 2016 года на этапе вывода из эксплуатации в США находилось 19 гражданских реакторных установок. Ниже приведены краткие сведения по текущему состоянию каждой из них [178].

АЭС Кристалл Ривер (блок 3)

Третий блок АЭС Кристалл Ривер (PWR) мощностью 2 609 МВт находился в эксплуатации с декабря 1976 года по 20 февраля 2013 года. 26 сентября 2009 года во время планового останова на перезагрузку топлива были проведены работы по замене парогенераторов, в ходе которых в несущей конструкции защитной оболочки реактора было сделано большое отверстие. После установки парогенераторов отверстие попытались заделать, но полностью восстановить структурную целостность защитной оболочки так и не удалось. По этой причине было принято решение об окончательном останове реактора.

Сейчас на площадке осуществляются работы по приведению объекта в состояние «сохранения под наблюдением» (SAFSTOR). В декабре 2013 года оператор направил на рассмотрение NRC Отчет о запланированных работах по выводу из эксплуатации (PSDAR), включающий оценку суммарных затрат на проведение всех работ. На 2017 год запланированы мероприятия по перегрузке ОЯТ в пункт сухого хранения. Окончание работ по демонтажу установки и снятие площадки с регулирующего контроля намечено на 2074 год.

АЭС Дрезден (блок 1)

Первый блок АЭС Дрезден (рис. 1.112), окончательно остановленный в октябре 1978 года, на данный момент приведен в состояние «сохранения под наблюдением» (SAFSTOR). Эта установка, проработавшая в течение 18 лет с 1960 по 1978 год, стала первым построенным в США ядерным кипящим реактором. В 1978 году АЭС была временно остановлена с целью проведения работ по очистке труб



Рис. 1.112. Первый блок АЭС Дрезден

первого контура от продуктов коррозии. Однако из-за аварии на АЭС Три-Майл-Айленд и вступивших после нее в силу новых законодательных требований так и не была запущена. Результаты выполненных тогда оценок показали, что приведение установки в соответствие с новыми требованиями безопасности может стоить более 300 млн долларов США, а из-за возраста реактора и его относительно небольшого размера эти затраты вряд ли бы окупились. В результате к 1984 году на АЭС были завершены работы по химической дезактивации труб первого контура: было удалено $2,79 \cdot 10^{10}$ кБк активности, обусловленной ^{60}Co , и еще $4,59 \cdot 10^6$ Бк активности, обусловленной ^{137}Cs . После этого на площадке начались работ по подготовке к выводу установки из эксплуатации.

Сейчас никаких масштабных демонтажных работ на площадке первого блока не проводится. На всех трех блоках АЭС выполнены мероприятия по консервации. Топливо из первого блока было перегружено в пункт сухого хранения. На первом блоке этап SAFSTOR продлится до 2027 года. В течение этих десяти лет на площадке будет осуществляться постоянный мониторинг состояния как самого блока и пункта хранения ОЯТ, так и состояния окружающей среды. Также будут проводиться работы по техническому обслуживанию и ремонту вспомогательных систем, обеспечивающих поддержание режима SAFSTOR.

Работы по демонтажу оборудования и сносу первого блока планируется осуществить в течение 3 лет (с 2029 по 2031 гг.): в результате будут демонтированы, дезактивированы и вывезены с площадки паропроизводящая установка и турбогенератор. Также демонтажу, дезактивации и упаковке в целях последующего захоронения будут подвергнуты и другие системы и элементы установок. После чего будут проведены работы по подготовке к сносу всех зданий, находящихся на территории реакторной площадки. Затем приступят к аналогичным работам на реакторных площадках второго и третьего энергоблоков. В 2035–2036 гг. планируется приступить к работам по окончательной ликвидации всех трех блоков АЭС и очистке загрязненных территорий, по окончании которых реакторные площадки будут освобождены от регулирующего контроля.

АЭС Энрико Ферми (блок 1)

Строительство первого блока с реактором на быстрых нейтронах АЭС Энрико Ферми (рис. 1.113), расположенной на озере Эри в штате Мичиган, завершилось в 1957

году. После проведения серии пуско-наладочных работ и испытаний на мощности ниже 1 МВт (тепл.) в декабре 1965 года мощность была поднята до 20 МВт (тепл.), а к июлю 1966 года мощность достигла 100 МВт (тепл.).

5 октября 1966 года в реакторе произошло частичное расплавление двух топливных сборок, обусловленное практически полным отсутствием прохождения



Рис. 1.113. АЭС Энрико Ферми

теплоносителя через них. В одной сборке топливо сместилось на 2 сантиметра, в другой на 4 сантиметра. Еще семь сборок разбухли в результате перегрева. В результате произошла небольшая утечка радиации в форме инертных газов. Всё же выбросов, превышающих установленные нормы, так и не было зафиксировано. Днем 5 октября реактор был остановлен кнопкой аварийной защиты. На выяснение причин аварии ушло много времени, поскольку проводить все необходимые исследования приходилось постепенно и с большой осторожностью. Такой подход позволил исключить дальнейшее повреждение реактора, малейшую возможность образования вторичной критмассы и утраты любых свидетельств, важных для понимания причин случившегося. В ходе расследования было выдвинуто 14 различных гипотез, включая версию блокирования входного отверстия ТВС посторонним предметом. В сентябре 1967 года после выгрузки зоны и полного слива натрия из реактора такой предмет был обнаружен на дне напорной камеры. Позже предмет был идентифицирован как один из сегментов циркониевой облицовки конического обтекателя. После изготовления спецприспособления в конце марта 1968 года сегмент был извлечен, и его происхождение подтвердилось. Было решено удалить все аналогичные сегменты. После изготовления специального инструмента в декабре 1968 года в ходе выполнения данной задачи было обнаружено отсутствие на месте еще одного сегмента. В конце 1968 года он был обнаружен в районе нижней плиты напорного коллектора и также удален. Проведенные в дальнейшем гидравлические испытания подтвердили, что один из оторвавшихся сегментов был причиной блокирования расхода через ТВС, что и привело к плавлению топлива.

Спустя три года и девять месяцев после аварии реактор был снова запущен. В 1972 году в связи с выработкой рабочего ресурса оператор принял решение о снятии первого блока с эксплуатации. Все топливо и сборки зоны воспроизводства реактора были вывезены с территории площадки. Корпус реактора, система трубопроводов первого контура и другое наиболее загрязненное оборудование также было демонтировано и вывезено с площадки. Сейчас реакторная установка находится в состоянии SAFSTOR. Окончание работ по ее ликвидации запланировано на 2032 год.

АЭС Гумбольдт Бей (блок 3)

Третий блок BWR АЭС Гумбольдт Бей мощностью 65 МВт находился в коммерческой эксплуатации в период с 1963 по 1976 год. 2 июля 1976 году реактор был планово остановлен для перезагрузки топлива и проведения работ по увеличению сейсмостой-

кости конструкции установки. В 1983 году результаты последнего исследования экономической эффективности показали, что повторный пуск реактора нецелесообразен. В результате оператор принял решение о его закрытии.

Работы по приведению установки в состояние SAFSTOR стартовали в 1985 году, после получения соответствующей лицензии от регулирующего органа. В ноябре 2005 года NRC также выдал лицензию на эксплуатацию независимого пункта сухого хранения ОЯТ. Спустя три года были завершены работы по перегрузке ОЯТ в данную установку, после чего стартовала программа работ по дезактивации и демонтажу оборудования третьего блока. К сентябрю 2013 года завершились работы по демонтажу внутрикорпусного оборудования реактора, а через два месяца все ВАО с реакторной площадки были транспортированы в пункт хранения. К настоящему времени завершены работы по демонтажу привода стержневой системы управления и защиты, систем трубопроводов и элементов системы газоотводных тоннелей, трубопровода опускной части контура и бака-хранилища отработавшей ионообменной смолы, здание машзала – снесено.

АЭС Индиан-Пойнт (блок 1)

Первый блок АЭС Индиан-Пойнт, расположенной на восточном берегу реки Гудзон, в 40 километрах от многомиллионного Нью-Йорка, находился в коммерческой эксплуатации в период с августа 1962 по октябрь 1974 года. Строительство Индиан-Пойнт началось в далеком 1956 году и с тех пор на станции были построены три реактора. Все они относятся к типу реакторов с водой под давлением, мощностью 277, 1062 и 1065 МВт соответственно. Первый реактор был закрыт еще в 1974 году. Причиной тому послужило нежелание оператора провести дорогостоящие работы по приведению системы аварийного охлаждения реактора в соответствие с новыми требованиями безопасности. В результате реакторная установка была окончательно остановлена, а работы по выгрузке топлива завершились в январе 1976 года. Сейчас реактор находится в режиме SAFSTOR. Согласно текущим планам, оператор площадки приступит к работам по ликвидации установки только после окончательного останова второго блока.

Между тем, оператором был зафиксирован факт загрязнения грунтовых вод на площадке, источником которого стало старое здание хранилища ОЯТ. Загрязнение было преимущественно обусловлено ^{90}Sr и тритием. Для устранения утечки загрязняющих веществ была выполнена перегрузка топлива в новый пункт сухого хранения, проведены осушение и очистка старого бассейна-хранилища. На сегодняшний день на площадке продолжается осуществление программы долгосрочного мониторинга состояния грунтовых вод.

АЭС Кевони

Строительство АЭС Кевони (рис. 1.114) началось в 1968 году, а в 1974 году станция дала первый ток в энергосистему США. Кевони стала четвертой атомной электростанцией в штате Висконсин и 44 в США. Всего на станции был построен единственный энергоблок с реактором с водой под давлением PWR мощностью 581 МВт. В 2008 году в соответствии с решением Комиссии по ядерному регулированию США срок службы реактора был продлен еще на 20 лет, однако 20 февраля 2013 года станция была закрыта и начались работы по демонтажу оборудования. Причиной закрытия АЭС Кевони стала высокая конкуренция на энергетическом рынке США после «сланцевого бума» и переизбыток «дорогой» энергии в стране. По этой причине были закрыты и несколько других АЭС, например, Вермонт Янки.

На территории АЭС находятся два хранилища ОЯТ. В конце 2016 года завершились работы по перегрузке всего объема топлива из мокрого хранилища в новую установку для сухого хранения (независимая установка для сухого хранения ОЯТ). В январе 2017 года реакторная установка была переведена в режим SAFSTOR. Начало работ по демонтажу и ликвидации АЭС запланировано на 2069 год, а к 2073 году площадка будет снята с регулирующего контроля.



Рис. 1.114. АЭС Кевони

АЭС Ла-Кросс

Реактор BWR АЭС Ла-Кросс номинальной мощностью 50 МВт (эл.) был построен в 1967 году в рамках государственной программы, призванной продемонстрировать целесообразность широкомасштабного внедрения и дальнейшего развития атомноэнергетических технологий. В апреле 1987 года реактор был окончательно остановлен, так как дальнейшая эксплуатация такого небольшого реактора была признана экономически нецелесообразной. В 2012 году все ОЯТ, выгруженное из реактора, было размещено в независимой установке для сухого хранения топлива. До середины 2014 года на площадке продолжались работы по демонтажу оборудования и сносу построек. Затем для продолжения работы потребовалось привлечь дополнительные кадровые ресурсы, и в ожидании удовлетворения возникших кадровых потребностей было принято решение о временном переводе установки в состояние «сохранения под наблюдением». Окончание работ по ликвидации АЭС Ла-Кросс запланировано на 2019 год.

АЭС Майлстоун

Первый блок АЭС Майлстоун (PWR) мощностью 660 МВт (эл.) был введен в эксплуатацию в 1970 году. На площадке АЭС в настоящее время действуют еще два реакторных блока типа PWR. Первый блок был окончательно закрыт в 1998 году. Согласно текущим планам, установка будет находиться в режиме SAFSTOR до 2048 года, после чего объект будет полностью ликвидирован к 2056 году. Хранение ОЯТ осуществляется в бассейне выдержки, являющемся частью всего объекта, находящегося в состоянии SAFSTOR. В соответствии с утвержденным планом работ, хранение ОЯТ в бассейне выдержки предусмотрено до 2048 года.

Корабль с ядерной энергетической установкой «Саванна»

«Саванна» (рис. 1.115) – первый грузопассажирский атомолод, построенный в США в конце 1950-х годов и названный в честь парохода «Саванна» – первого парохода, пересёкшего Атлантику. Идея создания судна принадлежит президенту США Дуайту Эйзенхауэру, предложившему построить торговое судно с ядерной энергетической установкой как показательный образец возможных применений ядерной энергии в рамках



Рис. 1.115. Атомоход «Саванна»

программы «мирный атом» (англ. *Peaceful Atomic Energy*), призванной продемонстрировать целесообразность внедрения и дальнейшего развития атомноэнергетических технологий. В следующем году Конгресс утвердил «Саванну» как совместный проект NRC, Управления торгового флота США и Министерства торговли США. Стоимость судна составила 46,9 миллионов долларов США, из них 28,3 миллиона

– стоимость реактора и топлива. Строительство финансировало правительство США. Судно было спущено на воду 21 июля 1959 года и находилось в эксплуатации с 1962 по 1972 годы, став одним из четырех когда-либо построенных торговых судов с ядерной энергетической установкой.

В целом, несмотря на большое количество преимуществ из-за некоторых своих особенностей, дальнейшая эксплуатация такого типа судов была признана экономически нецелесообразной. Во-первых, грузоподъемность «Саванны» была ограничена 8 500 тоннами по массе (или 18 000 кубометрами по объёму) при том, что очень многие грузопассажирские теплоходы могли принять на борт грузы, весом в несколько раз больше. Во-вторых, из-за обтекаемого корпуса судна процесс загрузки передних трюмов оказался достаточно трудоёмким, что стало серьёзным препятствием на пути успешной эксплуатации судна в свете все большей автоматизации работы портов. В-третьих, для обеспечения работы атомохода требовалось на треть больше людей, чем на обычных теплоходах с сопоставимыми характеристиками. Кроме того, персонал атомохода должен был проходить дополнительное обучение, чего не требовалось в случае обычных теплоходов. И, наконец, последний фактор – дополнительные затраты на эксплуатацию специальной береговой базы, которая согласовывала визиты атомохода «Саванна» в порты, а также особого оборудования на верфи для выполнения текущих ремонтных работ. В результате в 1970 году эксплуатация судна была прекращена в целях экономии средств, а в 1971 году на судне завершились работы по выгрузке ОЯТ. С 2008 года «Саванна» находится в режиме SAFSTOR на стоянке у 13-го пирса морского терминала Кэнтона, Балтимор (штат Мэриленд). Окончание работ по демонтажу установки намечено на 2031 год.

АЭС Пич-Боттом (блок 1)

Первый блок АЭС Пич-Боттом (высокотемпературный газоохлаждаемый реактор, HTGR) мощностью 200 МВт был введен в эксплуатацию в июне 1967 года и закрыт всего спустя семь лет службы – 31 октября 1974 года. Отработавшее топливо первого блока было вывезено с территории площадки, приреакторные бассейны выдержки – осушены и дезактивированы. Сама установка приведена в состояние «безопасного сохранения под наблюдением», при этом корпус реактора, трубопроводы первого контура и парогенераторы так и не были демонтированы.

Сегодня на АЭС «Пич-Боттом» работают два энергоблока – № 2 и № 3 – с водяными кипящими реакторами BWR с форсированной мощностью 1 308 МВт каждый. Срок действия лицензии на эксплуатацию второго блока завершится 8 августа 2033 года, третьего – 2 июля 2034 года. Работы по окончательной ликвидации первого блока планируется начать сразу после окончательного останова третьего реакторного блока АЭС в 2034 году.

АЭС Сан-Онофре

АЭС Сан-Онофре, расположенная в 100 км от Лос-Анджелеса, состоит из трех энергоблоков типа PWR: одного мощностью 456 МВт и еще двух мощностью 1 127 МВт каждый. Все три реакторных блока к настоящему времени окончательно остановлены. Первый блок АЭС был введен в эксплуатацию в 1968 году и после выработки своего эксплуатационного ресурса окончательно остановлен в 1992 году. Операции по выгрузке топлива из первого блока были завершены в марте 1993 года. В ноябре следующего года оператор площадки направил Отчет о запланированных работах по выводу из эксплуатации (PSDAR) на рассмотрение регулирующему органу, предложив проведение работ по выводу из эксплуатации в соответствии со стратегией SAFSTOR. Однако в 1998 году в связи с изменением требований NRC в области вывода из эксплуатации ядерных установок оператором стратегия вывода из эксплуатации была скорректирована. В соответствии новым планом работ в 2000 году был запущен проект по немедленному выводу из эксплуатации реактора в соответствии со стратегией DECON. В результате работ, проведенных в течение следующих нескольких лет, большая часть оборудования и строительных конструкций была демонтирована и отправлена на захоронение. Часть реакторной площадки была использована для сооружения первой очереди независимой установки для сухого хранения ОЯТ, куда было помещено как ОЯТ, выгруженное из первого блока, так и ОЯТ двух других блоков АЭС Сан-Онофре.

Остальные два энергоблока АЭС были окончательно остановлены в январе 2012 года после обнаружения дефектов в теплообменных трубках парогенератора производства «Mitsubishi Heavy Industries» (МНН), установленных на второй и третий блоки в 2009 и 2010 гг. соответственно. При осмотре на обоих блоках был обнаружен преждевременный износ более чем 3 тысяч теплообменных трубок внутри новых парогенераторов. Оператор станции заявил, что реакторы будут оставаться заглушенными до тех пор, пока не будут установлены причины износа трубок. В 2013 году представители NRC выступили с заявлением о том, что при проектировании и расчете парогенераторов МНН допустила множество ошибок. Например, при расчетах теплогидравлического режима с помощью программы FIT-III использовались неверные входные параметры. Кроме того, в ходе инспекции были выявлены многочисленные дефекты сварных швов.

В результате 7 июня 2013 года оператор площадки принял решение об окончательном закрытии обоих энергоблоков. В опубликованных в ноябре 2013 года подробных пояснениях оценки экономической эффективности говорится, что решению о закрытии блоков предшествовал экономический анализ, в котором рассматривались различные сценарии. В расчётах затрат принимались во внимание такие позиции, как расходы на эксплуатацию блоков, стоимость закупки электроэнергии на стороне на время простоя, цена поддержания блоков в состоянии готовности к пуску и в безопасном состоянии после закрытия, амортизация стоимости ядерного топлива, влияние закрытия блоков на рыночные цены на электроэнергию и многое другое.

В ходе оценки были проанализированы три основных сценария:

- закрытие обоих блоков;
- эксплуатация блока № 2 на мощности 70 % и закрытие третьего блока;
- эксплуатация блока № 2 на мощности 70 % и блока № 3 на мощности 60 % (данный сценарий вызывал большие вопросы, так как отсутствовала уверенность в способности блока № 3 работать хотя бы на 60 %).

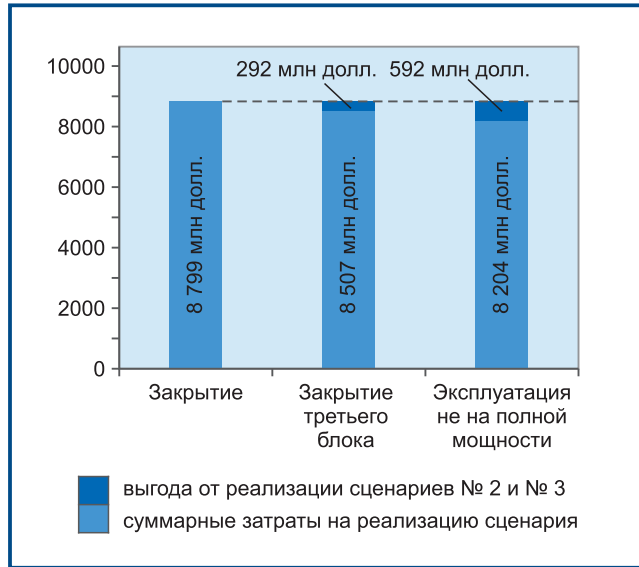


Рис. 1.116. Общие затраты до 2022 года на реализацию трех сценариев по второму и третьему блокам АЭС Сан-Онофре

Расчёт затрат был проведен для периода до 2022 года (т. е. до даты окончания срока действия текущей лицензии на эксплуатацию блоков АЭС Сан-Онофре), так как для дальнейшей эксплуатации потребовалось бы получать одобрение от регуляторов, что ввиду проблем с парогенераторами было крайне проблематично. Общие затраты до 2022 года, рассчитанные по каждому из трёх сценариев показаны на рис. 1.116. В итоге оператор остановил свой выбор на самом затратном с первого взгляда варианте. С другой стороны, учитывая даты пусков блоков, реализация именно этого ва-

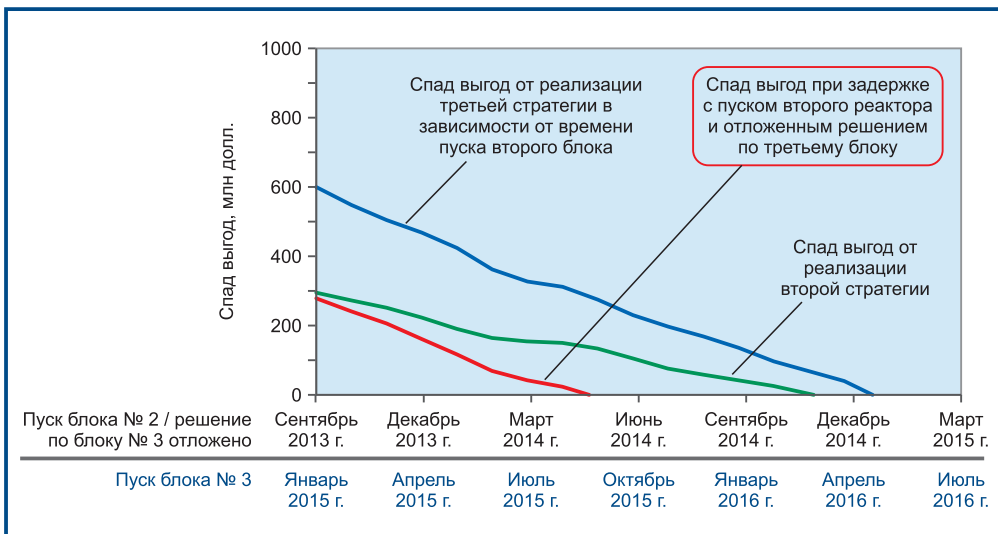


Рис. 1.117. Скорость исчезновения выгоды от повторных пусков блоков в зависимости от их времени

рианта оказалась действительно наиболее целесообразной. Графики, представленные на рис. 1.117, показывают, с какой скоростью исчезали бы выгоды от повторных пусков блоков в зависимости от их времени.

Красная линия, достигающая нуля в апреле-мае 2014 года – выгода от повторного пуска блока № 2 по сравнению с немедленным закрытием блока. Иными словами, если бы вопрос с пуском блока затянулся до апреля или мая 2014 года, то экономический смысл в его пуске уже был бы потерян.

Особенность красного графика – задержка по времени с пуском второго блока в сочетании с отложенным решением по судьбе третьего блока. Фактически, красный график отражал сложившуюся на станции ситуацию – блоки простаивали, а решение так и не было принято.

Зеленая линия демонстрирует спад выгоды от пуска блока № 2 в зависимости от времени его пуска при условии, что в сентябре 2013 года третий блок будет закрыт. Закрытие вопроса с пуском третьего блока обеспечило бы лицам, ответственными за принятие решений, ещё примерно полгода на размышления. Для случая зеленой линии смысл в пуске второго блока терялся бы в ноябре-декабре 2014 года.

Наконец, голубая линия показывает спад выгоды от пусков обоих блоков в зависимости от времени пуска второго блока. По сравнению с зеленой линией, время для принятия решения увеличилось на пару месяцев. Что неудивительно, учитывая принятое в расчётах предположение о том, что третий блок может быть запущен в эксплуатацию спустя 15 месяцев после запуска второго.

На данный момент оператор завершил работу над подготовкой Отчета о запланированных работах по выводу из эксплуатации (PSDAR) для обоих энергоблоков, которые будут проведены в соответствии со стратегией DECON. Основные работы по сносу построек и демонтажу оборудования планируется завершить к 2032 году. Завершение работ по реабилитации территории реакторных площадок и снятие с регулирующего контроля намечено на 2051 год.

АЭС Три-Майл-Айленд (блок 2)

Строительство станции Три-Майл-Айленд (рис. 1.118), печально известной как место одной из крупнейших в истории атомной энергетики аварии, началось в 1968 году. В 1974 году был введен в эксплуатацию первый из двух реакторов АЭС. Всего на станции были запущены два реактора, мощностью 802 и 906 МВт соответственно. Мощность первого позднее была увеличена до 852 МВт. Тип обоих реакторов – водяной с водой под давлением (PWR). Срок эксплуатации первого реактора на текущий момент ограничен 2034 годом.



Рис. 1.118. АЭС Три-Майл-Айленд

Авария на втором блоке АЭС началась утром 28 марта 1979 года. Борьба за реактор велась до самого вечера, а полностью устранить опасность удалось лишь ко 2 апреля. Все началось с остановки питательного насоса второго контура, в результате чего циркуляция воды прекратилась, и реактор начал перегреваться. Далее из-за грубой ошибки, допущенной во время ремонта, не запустились аварийные насосы второго контура. Как выяснилось позже, проводившие ремонт техники не открыли задвижки на напоре, но операторы не могли видеть этого, так как индикаторы состояния насосов на пульте управления оказались закрыты ремонтными табличками. Повышение температуры и давления в реакторе запустило систему аварийной защиты, которая заглушила атомный котел. Чуть ранее сработал предохранительный клапан, который начал выпускать из реактора пар и воду. Однако при достижении нормального давления клапан по какой-то причине не закрылся. Заметить это удалось только спустя 2,5 часа – за это время барботер переполнился, из-за критического уровня давления лопнули расположенные на нем предохранительные мембраны, и помещения гермооболочки начали заполняться перегретым паром и горячей радиоактивной водой. Приблизительно через две минуты после начала аварии сработала система аварийного охлаждения реактора – в активную зону начала подаваться вода, которая из-за не закрывшегося клапана также поступала в гермооболочку через барботер. Далее операторы допустили первую грубую ошибку: несмотря на то, что реактор был практически пуст, приборы показывали, что в нем слишком много воды, а поэтому постепенно были отключены все аварийные насосы, закачивающие воду в первый контур. Лишь спустя три минуты после начала отключения насосов операторы обнаружили, что аварийные насосы второго контура не работают, но их запуск не помог исправить ситуацию. На протяжении еще около 2 часов операторами были предприняты безуспешные попытки остановить развитие аварии, но из-за неверных показаний приборов и непонимания ситуации их действия лишь усугубили положение. В результате, хотя цепные ядерные реакции уже были остановлены, активная зона реактора, лишенная охлаждения, начала плавиться под действием распада высокоактивных продуктов деления урана. Температура в реакторе во время аварии достигала 2 200°C, в результате расплавилось около половины всех компонентов активной зоны (т. е. около 62 тонн). К 6.18 часам утра прибывший на место инженер определил истинную причину аварии, и слив воды из активной зоны реактора был прекращен. Однако насосы аварийного охлаждения, остановленные двумя часами ранее, по разным причинам удалось запустить лишь в 7.20, что и предотвратило катастрофу – специальная борированная вода, закачанная в активную зону, остановила ее нагрев и дальнейшее разрушение.

Уже днем 28 марта выяснилось, что из-за реакции раскаленного циркония с перегретым водяным паром в корпусе реактора образовался огромный водородный пузырь, который мог в любую секунду вспыхнуть и взорваться – такой взрыв на АЭС привел бы к страшной катастрофе. Уровень радиации внутри защитной оболочки к тому времени достиг 30 тысяч бэр в час, что в 600 раз превышало смертельную дозу. Вечером того же дня удалось восстановить работу одного из насосов первого контура, который проработав всего 15 секунд позволил вскоре запустить остальные насосы и восстановить более или менее нормальную работу первого контура системы охлаждения реактора.

Вплоть до 2 апреля операторы работали над удалением из-под крышки реактора водорода – эта операция увенчалась успехом, и опасность неуправляемого развития ава-

рии была полностью устранена. В результате аварии пострадавших не было, а попавшее в окружающую среду количество радиоактивных веществ оказалось весьма незначительным.

Работы по устранению последствий аварии начались в августе 1979 года и были официально завершены в декабре 1993 года. Суммарные затраты на их реализацию составили порядка 975 миллионов долларов США. Территория станции была дезактивирована, топливо – выгружено из реактора и передано на хранение в Национальную лабораторию в Айдахо. В 2010 году компания Progress Energy Inc. выкупила турбогенератор второго блока, используя его при строительстве нового энергоблока АЭС Широн Харрис в штате Северная Каролина. На данный момент активных работ по демонтажу на территории реакторной площадки не осуществляется, а завершение всех мероприятий по ликвидации установки намечено на 2036 год.

Реакторы EVESR и VBWR

Оба реактора EVESR (экспериментальный ядерный реактор с перегревом пара) и ядерный реактор кипящего типа VBWR расположены на территории Исследовательского центра Веллеситос в штате Калифорния в 48 км к востоку от города Сан-Франциско (рис. 1.119). Первый реактор, использовавшийся в целях проведения различных научных исследований и испытаний, был закрыт еще в



Рис. 1.119. Исследовательский центр Веллеситос

1970 году и к настоящему времени находится в состоянии «сохранения под наблюдением». Второй реактор, эксплуатировавшийся с октября 1957 по декабрь 1963 года как в целях производства электроэнергии, так и проведения различных испытаний в рамках научно-исследовательского проекта Арагонской лаборатории, также находится в режиме SAFSTOR. Ожидается, что работы по ликвидации всех ядерных установок и реабилитации территории завершатся к 2025 году, и вся территория центра будет выведена из-под регулирующего контроля.

АЭС Вермонт Янки

Станция состоит из одного энергоблока с кипящим водяным реактором (BWR) фирмы General Electric, мощностью 620 МВт. Строительство АЭС началось в 1967 году, а в 1972 году АЭС была введена в эксплуатацию. Срок службы станции согласно проекту должен был составить 40 лет. По состоянию на 2008 год электростанция мощностью 620 МВт вырабатывала 35 % всей потребляемой штатом электроэнергии. В 2010 году сенат Вермонта проголосовал за закрытие станции по истечении проектного срока эксплуатации. Решение было продиктовано сомнениями в безопасности объекта – за последние годы на нем произошла целая серия инцидентов. В частности, в 2007 году обрушились конструкции градирни, кроме того, несколько раз фиксировались утечки радиации. Однако 21 марта, в последний день срока эксплуатации АЭС, Комиссия по

ядерному регулированию США продлила срок эксплуатации реактора еще на 20 лет. Власти Вермонта попытались воспрепятствовать этому, обратившись в суд штата. Все же 29 декабря 2014 года энергоблок АЭС был окончательно остановлен по желанию эксплуатирующей организации. Принять такое решение оператора побудило падение цен на природный газ за счет роста объема добычи сланцевого газа и, как следствие, удешевления электроэнергии, вырабатываемой тепловыми станциями. Оператором площадки уже подготовлен Отчет о запланированных работах по выводу из эксплуатации (PSDAR), согласно которому к 2020 году установку планируется перевести в состояние «сохранения под наблюдением» после того, как все топливо будет размещено в пункте сухого хранения. Снятие площадки с регулирующего контроля и окончание действия ядерной лицензии намечено на 2073 год.

АЭС Зион (блоки 1 и 2)

Закрытая АЭС Зион, состоящая из двух блоков с реакторами PWR мощностью 1 040 МВт каждый, расположена на берегу озера Мичиган на севере штата Иллинойс (рис. 1.120). Строительство атомной электростанции Зион завершилось в 1973 году. Основные генерирующие мощности станции должны были обеспечивать многомиллионный Чикаго, в 60 километрах от которого расположена АЭС. Работа АЭС Зион была официально остановлена в январе 1998 года, несмотря на то, что срок действия лицензии на эксплуатацию блоков должен был завершиться только в 2013 году.



Рис. 1.120. АЭС Зион

Еще в феврале 1997 года реакторы станции были остановлены после появившихся незадолго до этого проблем с топливными сборками на первом реакторе, возникшими из-за ошибок персонала. Основной же причиной остановки стали экономические проблемы: затраты на требовавшуюся в скором времени замену парогенераторов не окупались бы до окончания срока действия лицензии на эксплуатацию. В результате энергоблоки были окончательно остановлены в феврале 1998 года. Выгруженное топливо было размещено в бассейнах выдержки. К февралю 2000 года оператор площадки представил на рассмотрение NRC Отчет о запланированных работах по выводу из эксплуатации (PSDAR). В отношении обоих энергоблоков была определена стратегия немедленного вывода из эксплуатации: к работам по демонтажу оборудования и сносу построек приступили в 2011 году. Окончание работ намечено на 2019–2020 гг., а к 2020 году действие ядерной лицензии будет распространяться только на площадку независимой установки для сухого хранения ОЯТ.

1.3.8. Материалы реестра

Четвертый компонент ядерного наследия США – материалы реестра – представляют собой огромные количества различных неиспользуемых химических и радиоактивных материалов, а также металлолома, образовавшиеся за полвека эксплуатации Министерством энергетики США и его предшественниками крупных промышленных объектов и многочисленных научно-исследовательских лабораторий ЯОК. С окончанием холодной войны и после принятия Правительством США решений о сокращении ядерного арсенала эти материалы, а также множество единиц оборудования и установок оказались невостребованными.

В 1996 году DOE была завершена разработка базы данных по материалам реестра, созданной на основе анализа сведений, собранных со всех площадок Министерства энергетики США в период с 1993 по 1995 гг. Параллельно DOE опубликовало отчет, в котором были представлены сведения об объемах и источниках образования материалов реестра, а также проанализированы основные проблемы и потенциальные решения в этой области [136, 179].

Следует отметить, что с тех пор Министерством энергетики не предпринималось попыток оценить достигнутый прогресс по внедрению разработанных решений или обновить имеющуюся базу данных [180]. Поэтому в этом разделе лишь кратко охарактеризуем объемы и состав материалов реестра, находившихся в ведении DOE на момент публикации отчета [179], а также потенциальные меры по снижению затрат на содержание таких материалов и риски, ими обуславливаемые.

Объемы и источники образования материалов реестра

Согласно терминологии DOE, материалы реестра – это любые неиспользуемые материалы, хранящиеся в установках DOE, которые не были отнесены к категории отходов или к «материалам запаса», необходимым для обеспечения национальной безопасности. Под словом «неиспользуемый» понимается то, что такие материалы не нашли применения в текущих программах DOE, график использования ресурсов для которых рассчитывается на два года вперед. Таким образом, «неиспользуемым» материал становится в том случае, если он по крайней мере в течение одного года не нашел применения при реализации программ DOE и его не планируется использовать в следующем году.

В целом, если сравнивать с другими элементами ядерного наследия, объем материалов реестра совсем незначительный, а основная сложность заключается в необходимости применения особых методик при обращении с ними. Некоторые материалы могут содержать особо ценные компоненты, другие обуславливают чрезвычайно высокие уровни опасности для здоровья человека и окружающей среды или требуют применения особых технологий захоронения. Для простоты DOE разделяет материалы реестра на десять категорий. Понятно, что они не позволяют охватить весь перечень материалов, хранящихся на площадках DOE, однако именно к этим десяти категориям можно отнести большую часть имеющихся материалов по массе. Кроме того, обращение с материалами, отнесенными к этим категориям, связано с определенными трудностями.

Всего на 44 площадках, расположенных в 19 различных штатах, хранится свыше 820 млн кг ядерных и неядерных материалов реестра, свыше 400 млн кг из которых было произведено в ходе осуществления программы по созданию ядерного оружия [136].

К группе ядерных материалов реестра относят [180]:

- Отработавшее ядерное топливо – это ядерное топливо, извлеченное из реактора после его облучения, составляющие элементы которого не были разделены. К этой категории также относят материалы мишеней, содержащие уран и нептуний, сборки зоны воспроизводства ядерного реактора, части и обломки ТВЭЛов. ОЯТ относится к категории материалов реестра только в том случае, если его облучение было произведено в промышленных реакторах, использовавшихся для наработки плутония, в реакторах, конструкция которых предусматривала особые мишени, использовавшиеся для получения плутония и трития, а также в некоторых экспериментальных и исследовательских реакторах.

- Особые материалы, включая ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu при чистоте содержания выше 10%, ^2Pu и ^{233}U при чистоте содержания выше 20 %, а также кюрий, дейтерий, торий, америций, нептуний, калифорний, берклий.

- Все имеющиеся и неиспользуемые объемы лития и литийсодержащих соединений, независимо от их изотопного состава и химической формы.

- Природный (содержание ^{235}U – 0,711 %) и обогащенный уран (уран высокого и низкого обогащения).

- Весь объем неиспользуемого обедненного урана (т. е. с содержанием ^{235}U менее 0,711 %), находящийся на объектах Министерства энергетики или принадлежащий DOE, но размещенный на площадках других организаций или ведомств, вне зависимости от его химического состава и физических характеристик.

К категории неядерных материалов реестра относят:

- Металлолом и неиспользуемое оборудование. Металлолом представляет собой изношенные и резервные металлические элементы и конструкции, извлеченные при демонтаже конструкций старых зданий, образовавшиеся в результате проведения работ по техническому обслуживанию или ремонту и т. п. Различают радиоактивно загрязненный или активированный металлолом; металлолом, загрязненный опасными химическими веществами и чистый металлолом. Неиспользуемое оборудование – это установки и инструменты, в прошлом использовавшиеся в строительстве или в технологических процессах, включая запчасти и ручной инструмент.

- Конструкции свинцовых противорадиационных экранов, в прошлом использовавшиеся для защиты персонала от воздействия радиации.

- Натрий, представляющий собой либо металлический натрий, либо калиевые сплавы (NaK), в прошлом использовавшийся в качестве теплоносителя в реакторах на быстрых нейтронах.

- Различные химикаты (кислоты, основания, растворители, газы, в прошлом использовавшиеся при проведении НИОКР, в химическом производстве, при очистке воды, а также при дезактивации и очистке зданий и оборудования).

- Оружейные компоненты – это элементы конструкции оружия и оружейные сборки, а также инструментальная оснастка, экспериментальное и подъемно-транспортное оборудование, использовавшиеся для производства ядерного оружия.

По массе большая часть материалов приходится на три группы (рис. 1.121): обедненный уран – 585 млн кг, металлолом – 155 млн кг, литий и литийсодержащие соединения – 41,1 млн кг.

Оставшиеся 5 % распределены следующим образом: уран – 3 % (25 млн кг), ОЯТ – менее 1 % (4,6 млн кг), свинец – менее 1 % (4,1 млн кг), натрий – менее 1 % (37 000 кг), плутоний – менее 1 % (26 000 кг).

По массе 85 % материалов реестра приходится на три площадки: Падьюкский газодиффузионный завод в Кентукки, Портсмутский газодиффузионный завод в Огайо и площадку К-25 в Ок-Ридже (штат Теннесси) (табл. 1.53).

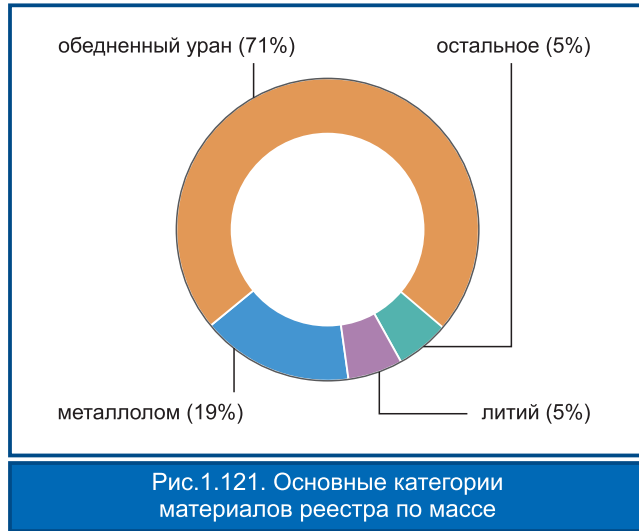


Табл. 1.53. Масса материалов реестра на площадках DOE, кг

Площадка	Штат	Связано с производством ядерного оружия	Не связано с производством ядерного оружия
Падьюкский газодиффузионный завод	Кентукки	170 000 000	250 000 000
Портсмутский газодиффузионный завод	Огайо	89 000 000	110 000 000
К-25 (Ок-Ридж)	Теннесси	60 000 000	42 000 000
Саванна-Ривер	Южная Каролина	40 000 000	360 000
Завод Y-12 (Ок-Ридж)	Теннесси	11 000 000	–
Ферналд	Огайо	11 000 000	–
Хэнфорд	Вашингтон	7 000 000	2 900 000
Испытательный полигон в штате Невада	Невада	810 000	–
Национальная техническая лаборатория в Айдахо	Айдахо	610 000	3 000 000
Ливерморская национальная лаборатория им. Лоуренса	Калифорния	500 000	–
Завод Пантекс	Техас	330 000	–
Лос-Аламосская национальная лаборатория	Нью-Мексико	110 000	–
Сандийские национальные лаборатории	Нью-Мексико	110 000	70
	Нью-Мексико	100 000	–
Роки Флэтс	Колорадо	77 000	–
Окридгская национальная лаборатория	Теннесси	76 000	2 500 000

Площадка	Штат	Связано с производством ядерного оружия	Не связано с производством ядерного оружия
Риэктив Металз Инкорпорейтед*	Нью-Джерси	71 000	–
Гранд Джакшен	Колорадо	21 000	–
Сандийские национальные лаборатории	Калифорния	330	–
Завод Пинеллас	Флорида	150	–
Завод в Канзас Сити	Миссури	83	
Маунд Сайт	Огайо	57	25
Другие площадки, не связанные с производством ядерного оружия	–	–	10 000 000
ВСЕГО		400 000 000	420 000 000

Почти 80 % этого материала представлено обедненным ураном. Что касается источников образования, то по массе около 38 % материалов реестра было получено в процессе обогащения урана и литья в целях производства ядерного оружия (рис. 1.122).

Также следует отметить, что по массе на ОЯТ приходится менее 1 % материалов реестра, однако именно в нем сосредоточена практически вся радиоактивность материалов.

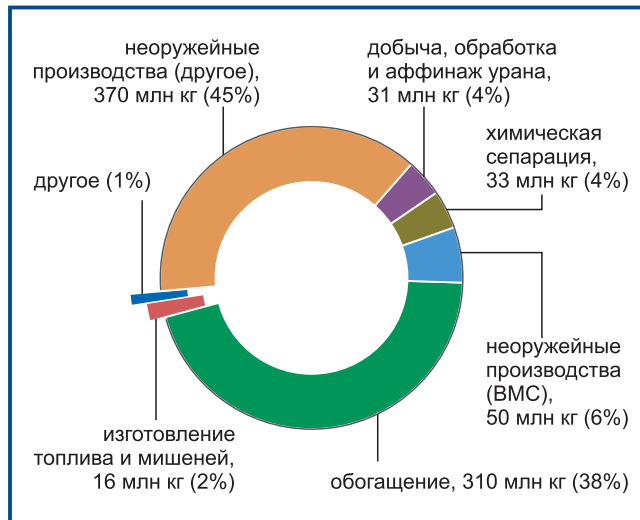


Рис.1.122. Основные источники образования материалов реестра по массе

При этом ОЯТ содержит целый ряд различных радионуклидов с разными периодами полураспада, в то время как на другие материалы, такие как плутоний, природный обогащенный, обедненный уран приходится значительно меньшие уровни радиоактивности, а их радионуклидный состав не так разнообразен. Кроме того, из-за радиоактивного загрязнения или активации часть неядерных материалов реестра также излучает радиацию. Например, некоторые литиевые экраны, использовавшиеся в Окриджской национальной лаборатории, подверглись радиоактивному загрязнению в результате нейтронного облучения.

* англ. Reactive Metals Incorporated.

Обращение с материалами реестра

Очевидно, что ввиду уникальности физических, химических и радиологических характеристик обращение с материалами реестра представляет определенные сложности. В отчете DOE от 1996 года были рассмотрены основные методы обращения с материалами реестра [136, 180]: как планируемые к реализации, так и уже применяемые на практике. Вкратце рассмотрим некоторые из них.

Металлолом

К середине 1990-х гг. на 18 площадках DOE было накоплено около 155 000 тонн металлолома, не содержащего особо ценных металлов, 90 % которого приходилось всего на три площадки: Саванна-Ривер, Портсмут и Падьюку. Эта категория материалов реестра более чем на 77 % состояла из углеродистой стали, а также никеля (6,2 %) и нержавеющей стали (5,6 %). Что касается металлолома, содержащего ценные металлы, то его объемы оказались почти в 400 000 раз меньше накопленных объемов обычного металлолома. Зато его ценность в денежном эквиваленте (2,5 млн долларов) в 32 раза уступает ценности запасов обычного металлолома (80 млн долларов), т. е. около 240 долларов за унцию против менее чем 0,01 доллара за унцию. Следует сразу оговориться, что данные по объемам металлолома представлены за 1996 год. Понятно, что за последние 20 лет после осуществления масштабных проектов по выводу из эксплуатации и ликвидации многих ядерных объектов этот реестр существенно пополнился [180].

В середине 1990-х гг. DOE планировало осуществить переработку чистого металлолома, в котором содержание химических и радиоактивных веществ не превышало установленных норм, и полученный материал продавать промышленным предприятиям. При этом ответственность за определение того, является ли направляемый на переработку металлолом чистым или нет, возлагалась на оператора площадки. Такая практика вызвала широкий резонанс в СМИ: общественность всерьез обеспокоилась, не будет ли радиоактивный металлолом с площадок DOE переработан и использован при изготовлении товаров потребления.

В июле 2000 года DOE ввело временный мораторий на безусловное освобождение металлолома, поступающего из радиологических зон, потенциально подвергшегося поверхностному, необъемному радиоактивному загрязнению, в целях его дальнейшей переработки и использования для изготовления товаров потребления. Действие моратория должно было завершиться лишь после того, как Министерством энергетики будут разработаны соответствующие критерии освобождения для металлолома из радиологических зон. Изначально на эту работу было отведено всего полгода. Однако мораторий остается в силе и по сей день. За эти годы объем накопленного на площадках DOE металлолома увеличился в разы, а операторам площадок пришлось выбирать между двумя альтернативами: бессрочным хранением или захоронением совместно с низкоактивными промышленными отходами.

Так, например, Национальная лаборатория в Айдахо направила весь объем металлолома на окончательную изоляцию в находящийся на площадке полигон захоронения. На некоторых площадках, где бюджет не позволяет создавать подобные пункты захоронения, были организованы контролируемые и неконтролируемые свалки. В 2013 году эксперты оценили потери для бюджета DOE: в случае захоронения металлолома вместо его переработки и продажи промышленным предприятиям Министерство энергетики может потерять от 67,4 до 191,6 млн долларов.

В 2011 году DOE начало разработку проекта программной оценки воздействия на окружающую среду переработки и повторного использования металлолома из радиологических зон [181], а в 2012 году этот документ был вынесен на общественные слушания. В проекте рассматривались три возможные альтернативы:

- изменение текущей политики, благодаря чему запрет на переработку незагрязненного металлолома из радиологических зон будет снят. При этом металлолом, удовлетворяющий требованиям Постановления DOE 458.1, может быть признан потенциально пригодным для переработки и продажи промышленным предприятиям, занимающимся производством товаров потребления. В противном случае металлолом будет признан загрязненным и будет направляться на установки хранения или захоронения, находящиеся в ведении Министерства энергетики;
- захоронение всего объема металлолома, образовавшегося с момента вступления моратория в силу;
- бездействие – мораторий на безусловное освобождение металлолома, образующегося в радиологических зонах, остается в силе.

Работа над этим проектом до сих пор не завершена. Однако, вероятнее всего DOE будет принято решение о снятии запрета на переработку незагрязненного металлолома из радиологических зон. В этом случае, по оценкам Министерства энергетики, на переработку будет направлено всего лишь 14 тонн металлолома, при том что, по некоторым оценкам, к настоящему моменту на площадках DOE и NRC накоплено свыше 1 млн тонн металлолома.

Обедненный уран

Согласно официальным данным 1996 года на 23 площадках DOE хранилось в общей сложности 585 млн кг обедненного урана. Спустя десять лет реестр обедненного урана пополнился до 742 т, 95 % из которых в форме твердого гексафторида урана размещено всего на трех площадках: на территории завода К-25 в Ок-Ридже (450 000 тонн), а также на Падьюкском и Портсмутском газодиффузионных заводах (198 000 и 56 000 тонн соответственно). Гексафторид урана хранят на открытом воздухе в десяти- и четырнадцатитонных стальных баллонах, штабелируемых в два уровня (рис. 1.123) [182]. Всего на площадках DOE хранится свыше 57 000 таких баллонов.



Рис. 1.123. Баллоны с гексафторидом урана на полигонах DOE (слева) и баллон, потерявший герметичность вследствие процессов коррозии (справа)

При нормальном атмосферном давлении и температуре не выше 52°C гексафторид урана находится в твердом состоянии, однако при повышении температуры выше данного значения, например, в результате нагрева баллонов солнечными лучами, твердый материал превращается в газ. Поэтому в целях обеспечения безопасности баллоны никогда не заполняют до предела и всегда оставляют свободный объем на случай возникновения экстремальных температурных условий, вызывающих такие фазовые переходы.

Основные риски при хранении гексафторида урана связаны с потенциальной опасностью образования фторида водорода, являющегося коррозионно активным и высокотоксичным газом, и токсичного растворимого уранилфторида при реакции DUF_6 с атмосферной влагой.

В Ок-Ридже хранятся самые старые баллоны с обедненным ураном, произведенные еще на ранних этапах реализации Манхэттенского проекта. В ходе мониторинга пунктов хранения время от времени фиксируют случаи нарушения целостности баллонов и утечки гексафторида урана. Такие утечки всегда удавалось выявлять достаточно оперативно, т. к. они, как правило, не возникают спонтанно, а отверстия самостоятельно затягиваются благодаря разрастанию ураниловых соединений из-за реакции DUF_6 с атмосферной влагой. В случае обнаружения утечек герметичность баллонов восстанавливается после проведения сварочных работ. DOE считает такую практику обращения с обедненным ураном безопасной, но рассматривает ее лишь в качестве временной меры.

На данный момент в целях обеспечения безопасного обращения с гексафторидом урана DOE [183]:

- осуществляет постоянное наблюдение за состоянием баллонов, а также их техническое обслуживание и ремонт;
- готовится к пуску промышленных мощностей по конверсии гексафторида урана в более стабильную форму, пригодную для его захоронения или повторного использования (UO_2 или U_3O_8);
- осуществляет серию НИОКР по разработке новых областей применения обедненного урана.

Заводы по переработке гексафторида урана в стабильные соединения уже построены в Портсмуте и Падьюке. На данный момент DOE ищет подрядчика, который бы занялся их эксплуатацией. Ожидается, что на переработку всего объема обедненного урана, хранящегося сейчас на территории газодиффузионного завода в Портсмуте, может уйти около 18 лет, а в Падьюке – около 30 лет.

29 сентября 2016 года пятилетний контракт на эксплуатацию установок в Портсмуте и Падьюке был подписан с Mid-America Conversion Services, находящейся под управлением компании Atkins Global. Mid-America Conversion Services займется переработкой 765 000 тонн DUF_6 , а также будет отвечать за организацию продаж образующейся в результате переработки фтористоводородной кислоты, повторное использование или транспортировку и захоронение всех вторичных продуктов переработки и отходов, а также заниматься техническим обслуживанием и ремонтом баллонов с DUF_6 , находящихся на хранении [184].

Пока производственные мощности по переработке не вышли на проектную мощность наиболее приоритетными задачами для DOE в области обращения с обедненным ураном остается:

- регулярное инспектирование и техническое обслуживание баллонов и полигонов хранения;
- изменение схем размещения баллонов в целях обеспечения более эффективного отвода атмосферных осадков и более тщательного инспектирования;
- регулярная покраска баллонов в целях предотвращения развития коррозионных процессов;
- создание новых площадок для хранения баллонов с бетонным покрытием вместо гравийного.

Выполнение всех этих задач связано с достаточно серьезными затратами. Так, например, согласно отчетности 1996 года, на эти цели в Ок-Ридже ежегодно расходовалось 3 млн долларов, в Портсмуте – 4 млн долларов, в Падьюке – 7 млн долларов [180].

Столь высокие затраты на обращение с обедненным ураном послужили дополнительным толчком для изучения возможных способов повторного использования данного материала. Ведь реализация второй альтернативы – захоронения обедненного урана после его конверсии в более стабильную форму – связана с целым рядом потенциальных проблем и огромными затратами.

По оценкам экспертов, суммарные затраты на захоронение накопленных объемов обедненного урана могут превысить 10 млрд долларов [184]. Сложности с захоронением обедненного урана в первую очередь обусловлены его высокой удельной активностью – в среднем $7,4 \cdot 10^3$ – $1,11 \cdot 10^4$ Бк/г, а материалы с активностью альфа-излучаителей выше $3,7 \cdot 10^3$ Бк/г требуется окончательно изолировать в пунктах геологического захоронения. Так, если бы уран был трансурановым элементом, то, исходя из его уровня удельной активности, он мог бы быть захоронен в WIPP (Нью-Мексико).

Еще одна проблема связана с химической токсичностью достаточно больших объемов обедненного урана. В начале 2000-х гг. NRC был представлен проект захоронения обедненного урана в горных выработках или в старых урановых шахтах. Однако в случае принятия именно этой стратегии DOE потребовалось бы скрупулезно изучить и понять фундаментальные различия между размещением в подземных выработках урановой руды и порошка из оксида урана [182].

С другой стороны, куда более перспективным считается направление повторного использования обедненного урана (рис. 1.124). Однако, основными препятствиями на пути разработки новых способов применения обедненного урана, становится малая изученность потенциальных воздействий этого материала на здоровье человека и общественная обеспокоенность. Также следует понимать, что экономическую пользу может принести лишь внедрение таких технологий, которые потребовали бы использования действительно больших объемов обедненного урана. Среди таких технологий наиболее перспективными считаются следующие:

- Отливка высокоплотного бетона, используемого при изготовлении контейнеров для хранения радиоактивных материалов. Обедненный уран уже давно используется в промышленности для изготовления высокоплотных противорадиационных экранов, но из-за очень высокой стоимости изготовления находит применение лишь в редких случаях, когда такие большие затраты действительно оправданы необходимостью получения сверхвысокоплотного материала.

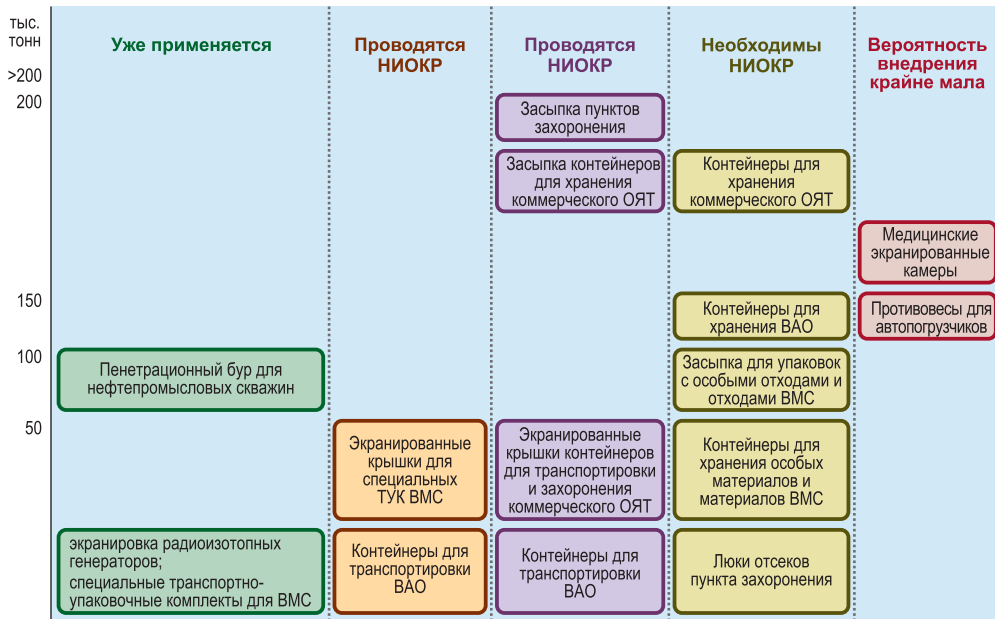


Рис. 1.124. Использование обедненного урана в промышленных целях

Однако в случае запуска производственных мощностей по конверсии обедненного урана в более стабильную форму (оксиды, карбиды урана), он может быть использован как компонент для изготовления первичной оболочки контейнеров, предназначенных для хранения, а в некоторых случаях и для захоронения ОЯТ, НАО и САО. Ведь высокая плотность соединений урана обеспечивает отличную экранировку от фотонного излучения.

Одна из уже разработанных концепций предусматривает создание особого «тяжелого» бетона, в состав которого входили бы соединения урана. Благодаря использованию такого бетона толщина стенок контейнеров может быть уменьшена до двух раз при сохранении той же экранирующей способности. Причем такое применение позволит утилизировать весь имеющийся у DOE объем обедненного урана.

- Размещение оксида обедненного урана в пространстве между упаковками с ОЯТ в пункте геологического захоронения в целях уменьшения вероятности возникновения ядерной критичности, обеспечения экранирования от радиации, а также улучшения химической изоляции в пункте захоронения после его закрытия.

- Использование в авиации и космонавтике при изготовлении противовесов для самолетов и ракет, а также в конструкции автопогрузчиков. При этом высокая плотность урановых соединений (20 г/см^3) позволит значительно уменьшить размеры противовесов. Тем не менее, для успешной реализации данной стратегии придется преодолеть целый ряд проблем законодательного и нормативно-правового характера. Кроме того, общественная обеспокоенность по поводу потенциального негативного воздействия обедненного урана на здоровье человека также является серьезной преградой для претворения подобных планов в жизнь.

Плутоний

В период с конца 1940-х по 1988 год на территории Саванна Ривер и Хэнфорда работал целый ряд промышленных реакторов и перерабатывающих установок, производивших плутоний. В Роки-Флэтс (штат Колорадо) из прошедшего обработки плутония формировались элементы ядерных боеголовок, а на заводе Пантекс в Техасе осуществлялась их сборка. На площадке испытательного полигона в Неваде собирали экспериментальные ядерные заряды. Производство плутония в США было прекращено в 1988 году, и согласно последним данным, на восьми площадках Министерства энергетики США находится около 94,5 тонн плутония, 81,3 тонны из которого – плутоний оружейного качества. Около 45 % материалов из этого реестра были признаны избыточными для использования в целях обеспечения национальной безопасности страны [185]. Материалы реестра, содержащие плутоний, представлены чистым металлически-ми конструкциями от разборки ядерных боеголовок, оксидами, а также соединениями плутония с другими материалами из реакторного топлива, мишеней, находящимися в самых разных формах (рис. 1.125) [182].



С начала 1990-х гг. США был предпринят ряд исследований, направленных на разработку наиболее эффективных стратегий утилизации избыточных количеств оружейного плутония. К январю 1997 года, изучив 37 различных технологий утилизации плутония, DOE решило придерживаться гибридного подхода: иммобилизация и захоронение плутония совместно с ВАО и облучение МОКС-топлива в существующих легководных реакторных установках.

В январе 2000 года после завершения работы над ОВОС DOE официально заявило о своем намерении иммобилизовать часть плутония с использованием технологии захоронения «емкость в канистре». Плутоний планировалось заключать в керамическую матрицу, а весь процесс отверждения проходил бы в емкостях, которые затем поместили бы в канистры. При этом каждая емкость внутри канистры была бы окружена остеклованными ВАО, выполняющими функции радиологических барьеров, а также преграды для злоумышленников при попытке кражи или диверсии. Остальную часть плутония было решено использовать в качестве МОКС-топлива, для изготовления которого планировалось построить специальный комплекс установок на территории Саванна-Ривер [171].

В сентябре 2000 года США и Российская Федерация подписали соглашение об утилизации избыточных количеств оружейного плутония. Соглашением обеспечивалась паритетность как в общем количестве утилизируемого плутония оружейного качества (по 34 метрические тонны с каждой стороны), так и в количестве утилизируемого плутония в виде чистого металла (по 25 метрических тонн с каждой стороны), изъятых

непосредственно из ядерных боеприпасов. Согласно положениям соглашения, Российская Федерация обязалась произвести облучение заявленных количеств плутония в легководных реакторах, а США, помимо облучения в реакторах, планировали осуществить утилизацию части запасов плутония путем иммобилизации и захоронения иммобилизованной формы отходов.

Однако в 2002 году после проведенного анализа различных стратегий DOE заявило о своем решении отказаться от варианта захоронения иммобилизованной формы отходов из-за высокой стоимости. Отказ от стратегии захоронения позволил сэкономить время и средства на разработку технологий утилизации плутония в качестве топлива в ядерных реакторах. В то время затраты на реализацию этого подхода оценивались на уровне 3,8 млрд долларов, при старте промышленной утилизации к началу 2020-х гг. Кроме того, с 1998 по 2002 гг. DOE был принят ряд решений о захоронении некоторых количеств плутония с площадки Роки-Флэтс в WIPP в качестве трансурановых РАО. Впоследствии в WIPP было решено захоронить и некоторые количества плутония из Хэнфорда, Саванна-Ривер, а также национальных лабораторий в Лос-Аламосе, Айдахо и Ливерморе. На тот момент к категории избыточных оружейных материалов было отнесено 34 тонны плутония, которые планировалось сжечь в ядерных реакторах, а также еще 6,5 тонн плутония, которые изначально собирались захоронить в иммобилизованной форме.

В 2007 году DOE приняло решение о консолидации всех избыточных объемов плутония, кроме топливных сердечников, на территории Саванна-Ривер, где в будущем планировалось разместить комплекс установок, необходимых для реализации поставленных задач в области утилизации. Таким образом, DOE могло сэкономить миллионы долларов на эксплуатации и техническом обслуживании многочисленных установок в Хэнфорде, национальных лабораториях в Лос-Аламосе и Ливерморе, содержащих плутоний. Также знаковым событием 2007 года стало пополнение реестра избыточных объемов оружейных материалов еще 9 тоннами плутония, которые должны были образоваться в течение следующих десятилетий в результате демонтажа старых ядерных боеголовок. Эти 9 тонн материалов также планировалось утилизировать в коммерческих энергетических реакторах.

Таким образом, с 2000 года программа по утилизации избыточных объемов плутония, реализуемая США, претерпела серьезные изменения. К 2010 году стратегия утилизация предусматривала выполнение следующих работ:

- строительство и эксплуатация МОКС-установки и комплекса по отверждению отходов, образующихся в результате производства МОКС-топлива;
- создание мощностей по разборке плутониевых сердечников и переработке металлического плутония в оксид плутония;
- осуществление мероприятий по оценке качества топлива;
- усовершенствование конструкций реакторов операторами, желающими участвовать в программе утилизации излишков плутония, а также создание необходимой инфраструктуры по упаковке и транспортировке МОКС-топлива.

В 2008 году была проведена повторная оценка стоимости и примерного графика работ по созданию комплекса для изготовления МОКС-топлива. Тогда затраты на проектирование, строительство и пусконаладочные работы были оценены в 4,8 млрд

долларов, а саму установку планировалось ввести в эксплуатацию в ноябре 2016 года. В августе 2012 года аналогичная оценка была подготовлена строительным подрядчиком DOE – суммарные затраты составили 7,7 млрд долларов с пуском мощностей не ранее ноября 2019 года. К настоящему моменту в проект уже вложено около 5 млрд долларов, а его готовность оценивается всего лишь в 70 %.

На сегодняшний день эксперты DOE сходятся во мнении, что и все прошлые оценки являются слишком оптимистичными, и реальные затраты могут оказаться намного выше. Заниженной они считают и приведенные ранее оценки стоимости эксплуатации установки – 500 млн долларов/год. Реальные затраты могут составить порядка 700–800 млн долларов/год, а суммарные затраты на переработку всего объема плутония в МОКС-топливо оцениваются в более чем 30 млрд долларов.

Между тем в течение последних двух лет работы на площадке были фактически заморожены, а финансирование проекта было практически полностью прекращено после того, как в 2014 году министр энергетики США Эрнест Монис впервые публично заявил о том, что правительство США рассматривает возможность захоронения плутония как альтернативу сжиганию в составе МОКС-топлива. Опубликованная в апреле 2016 года стратегия Национального управления по ядерной безопасности США фактически лоббирует этот проект, несмотря на то что российская и американская стороны пришли к обоюдному соглашению утилизировать плутоний в качестве топлива для ядерных реакторов.

Официально еще в январе 2012 года DOE отказалось от идеи использования комплекса в Саванна-Ривер в качестве единственного в стране объекта по демонтажу плутониевых сердечников и производства оксидного топлива. Вместо этого было решено сосредоточить эту деятельность среди разных уже имеющихся в ведении DOE площадок. Тем самым Министерство энергетики стремится сократить затраты на реализацию программы, хотя по всей видимости в условиях наблюдаемого роста цен и текущей бюджетной политики США это вряд ли поможет DOE снизить суммарные затраты до желаемого уровня. По этой причине в апреле 2013 года Министерством был запущен новый этап исследований по оценке альтернативных вариантов утилизации избыточных объемов плутония.

Среди основных рассматриваются пять различных альтернатив:

- облучение МОКС-топлива в легководных реакторах;
- облучение уран-плутониевого топлива в быстрых реакторах;
- иммобилизация в стеклянной или керамической форме и захоронение вместе с высокоактивными отходами;
- разбавление с последующим захоронением;
- захоронение в глубинных скважинах.

Альтернатива № 1: облучение МОКС-топлива в легководных реакторах

Согласно данной концепции, МОКС-топливо будет облучаться в американских коммерческих энергетических реакторах, в том числе в реакторах с водой под давлением (PWR) и в ядерных реакторах кипящего типа (BWR), а полученное в результате МОКС ОЯТ будет помещено на хранение совместно с обычным топливом коммерческих реакторов (табл. 1.54) [186].

Табл. 1.54. Затраты и приблизительные сроки реализации альтернативы № 1, млрд долларов

Капитальные вложения	Затраты на эксплуатацию	Прочие затраты	Затраты в течение всего срока службы	Срок запуска проекта
6,46	10,26	8,40	25,12	2043 год

На данный момент в целях реализации этой концепции в Саванна-Ривер ведется строительство двух установок: комплекса по производству МОКС-топлива и комплекса по отверждению отходов, образующихся в результате работы первой установки. Американская технология производства МОКС-топлива аналогична применяемой во Франции на установках в Ла Аг и Мэлокс.

Альтернатива № 2: облучение МОКС-топлива в быстрых реакторах

Концепция сжигания оружейного плутония в быстрых реакторах предусматривает сооружение Усовершенствованного быстрого реактора (Advanced Disposition Reactor, ADR), работающего на металлическом топливе (табл.1.55).

Табл. 1.55. Затраты и приблизительные сроки реализации альтернативы № 2, млрд долларов

Капитальные вложения	Затраты на эксплуатацию	Прочие затраты	Затраты в течение всего срока службы	Срок запуска проекта
9,42	33,41	7,62	50,45	2075 год

В случае утверждения этой концепции одномодульный реактор-прототип планируется построить в Саванна-Ривер, где в зоне К также будет сооружен завод по изготовлению металлического топлива (KAFF). Стандартная сборка такого топлива будет содержать около 40 кг тяжелого металла, из них 8 кг будут приходиться на плутоний.

Проект по сжиганию МОКС-топлива в промышленных масштабах может быть реализован на одной из двух площадок:

- в Саванна-Ривер (двухмодульный быстрый реактор);
- в Хэнфорде (реконструкция остановленной экспериментальной установки на быстрых нейтронах с целью реализации двухмодульной или одномодульной ADR концепции).

Альтернатива № 3: иммобилизация в стеклянной или керамической матрице и захоронение вместе с высокоактивными отходами

Третья альтернатива – иммобилизация оружейного плутония совместно с долгоживущими высокоактивными радиоактивными отходами и размещение полученной иммобилизованной формы отходов в особых контейнерах с использованием технологии can-in-canister (дословно «емкость в канистре») (табл. 1.56; рис. 1.126, стр. 274).

Табл. 1.56. Затраты и приблизительные сроки реализации альтернативы № 3, млрд долларов

Капитальные вложения	Затраты на эксплуатацию	Прочие затраты	Затраты в течение всего срока службы	Срок запуска проекта
10,67	11,58	6,39	28,65	2060 год

Вначале плутониевый порошок иммобилизуют в малогабаритных емкостях (банках). Эти емкости помещают в специальные канистры общей вместимостью до 28 кг каждая, в которые заливается расплавленное стекло, смешанное с радиоактивными отходами.

Наиболее перспективной площадкой для реализации данной стратегии считается Саванна-Ривер. С 1996 года здесь работает установка по остекловыванию ВАО (Defense Waste Processing Facility, DWPF). К настоящему времени в Саванна-Ривер удалось переработать практически половину всех ВАО, и оставшихся объемов высокоактивных отходов может не хватить для утилизации 34 тонн излишков оружейного плутония.

Кроме того, DWPF планируется закрыть уже к 2032 году, т. е. до момента завершения работ по созданию новой установки для иммобилизации плутония.



Рис. 1.126. Технология захоронения «can-in-canister»

Другой потенциальной площадкой для реализации третьей альтернативы является Хэнфорд, где также накоплены значительные объемы ВАО. Однако в этом случае потребуются либо построить новое хранилище для плутония, либо перепрофилировать одну из уже имеющихся установок, что связано со значительными затратами. Кроме того, существенные изменения придется внести и в проект уже строящегося завода по иммобилизации отходов, предназначенного для отверждения свыше 200 000 л ВАО. В противном случае пришлось бы строить совершенно новую установку для иммобилизации. Понятно, что в обоих случаях затраты окажутся непомерными. Поэтому реализация концепции иммобилизации в Хэнфорде крайне маловероятна.

Альтернатива № 4: разбавление и захоронение

В случае реализации четвертой альтернативы плутониевые сердечники будут разобраны, плутоний переведён в металлическую форму и после разбавления захоронен в глубинных геологических формациях (табл. 1.57).

Табл. 1.57. Затраты и приблизительные сроки реализации альтернативы № 4, млрд долларов

Капитальные вложения	Затраты на эксплуатацию	Прочие затраты	Затраты в течение всего срока службы	Срок запуска проекта
0,29	3,0	5,49	8,78	2046 год

В целях разбавления оксид плутония планируется смешивать с материалами, подавляющими его восстановление, при этом содержание плутония должно снизиться до менее чем 10 %. Технологический процесс разбавления планируется осуществлять

в Саванна-Ривер: для этих целей будут построены две дополнительные горячие камеры. После характеристики и доставки в пункт захоронения упаковки с отходами будут размещены в соляном пласте. Со временем под действием высокого давления во вмещающей соляной формации соль будет оползать и заполнять пустоты внутри отсека захоронения, сковывая упаковки с отходами. Эта методика захоронения уже отработана и неоднократно применялась для захоронения излишков плутония с различных площадок Министерства энергетики: около 4,8 тонн разбавленного плутония было доставлено на захоронение в WIPP, в том числе из Хэнфорда, Саванна-Ривер и Лос-Аламосской национальной лаборатории.

Альтернатива № 5: захоронение в глубинных геологических формациях

Данная альтернатива предусматривает захоронение излишков плутония либо в виде металлического плутония, либо в форме оксида плутония в специальных контейнерах, размещаемых в глубинных геологических скважинах. Скважины планируется пробурить в кристаллических породах при глубине заложения до 5 000 м.

Канистры с отходами будут размещены в нижней части скважин на глубине от 3 000 до 5 000 м. Верхняя часть скважины будет герметизирована с помощью спрессованной глины или цемента. Из всех рассматриваемых альтернатив этот вариант наименее проработан и предусматривает проведение большого объема НИОКР, а приблизительные затраты на его реализацию еще не были оценены.

Свинец

Благодаря таким свойствам свинца, как высокая плотность, химическая стабильность и пластичность, этот материал нашел множество применений в рамках различных программ DOE, однако чаще всего использовался для изготовления экранирующих конструкций, обеспечивающих защиту от радиоактивного излучения. В последний раз результаты оценки объемов материалов реестра, проведенной в 1996 году, показали, что на 29 площадках DOE хранится свыше 4 млн кг свинца, что составляет примерно восьмую часть от общего объема свинца, накопленного в целом на всех площадках DOE. 75 % от объема свинца, относящегося к категории материалов реестра, хранится на 5 площадках: Хэнфорд, Ок-Ридж, Ливерморская, Брукхэйвенская и Аргоннская национальные лаборатории. Причем на долю радиоактивно загрязненного свинца приходилось свыше 51 % [180]. Согласно более поздним исследованиям, проведенным в начале 2000 годов, радиологическому загрязнению подверглось около 2 100 тонн свинца, накопленного на площадках DOE. К этому объему также следует прибавить от 4 000 до 24 000 тонн отходов, содержащих свинец, которые также подверглись радиоактивному загрязнению [187].

Активная разработка стратегий по повторному использованию и утилизации свинца началась в 2000 году после введения DOE временного моратория на переработку и повторное использование металлолома из радиологических зон. Вообще потребность DOE в свинце достаточно велика, так как этот материал повсеместно используется в ядерных реакторах, ускорителях и других радиологических установках. DOE регулярно покупает чистые материалы, содержащие свинец (брикеты, листы и т. п.), по цене более 2 долларов/кг. Согласно требованиям законодательства, незагрязненный материал, содержащий свинец, по окончании срока службы может быть переработан или захоронен с другими опасными отходами в соответствии с положениями RCRA. Если же материал, содержащий свинец, подвергся радиоактивному загрязнению, то он должен



Рис.1.127. Примеры использования свинца в качестве экранирующего материала при изготовлении контейнеров и канистр для нужд DOE

быть захоронен совместно со смешанными отходами: данный случай подпадает как под действие RCRA, так и под действие требований по контролю над радиологическими материалами. В США имеется три пункта захоронения, пригодных для окончательной изоляции радиоактивно загрязненного свинца: испытательный полигон в штате Невада, Хэнфорд и полигон Envirocare. Стоимость упаковки (макроинкапсуляция) и захоронения таких отходов варьируется от 3 до 6 долларов/кг [187].

Среди целого ряда перспективных подходов повторного использования этого материала наиболее экономически целесообразным считается вариант переработки свинца с целью его дальнейшего использования при изготовлении контейнеров для хранения и захоронения радиоактивных отходов. Для этих целей DOE, основываясь на положениях Постановления 5400.5 «Радиационная защита населения»*, были разработаны специальные критерии освобождения материалов, содержащих свинец, для их переработки и повторного использования в ядерной отрасли в качестве экранирующей защиты от радиоактивного излучения [187, 188]. Эти критерии освобождения устанавливали предельные концентрации радионуклидов, распределенных по всему объему материала, при которых санкционировано повторное использование свинца в ядерной отрасли. Применение этих норм позволило расширить реестр свинца, пригодного для переработки и повторного использования (рис.1.127).

Эта стратегия принесла свои плоды – всего за четыре года с момента запуска программы DOE смогло сэкономить более 4 млн долларов и утилизировать свыше 780 тонн радиоактивно загрязненного свинца.

Природный и обогащенный уран

Впервые официальная отчетность по реестру урана, в том числе объемам избыточных запасов BOU, NOU и природного урана, была опубликована в 1996 году [180]. Тогда около 25 000 метрических тонн материалов, содержащих ^{235}U со степенью обогащения 0,7 % и выше были признаны избыточными для нужд обеспечения национальной

* DOE Order 5400.5 Radiation Protection of the Public.

безопасности страны и отнесены к категории материалов реестра, в том числе 175 тонн высокообогащенного урана, 7 379 тонн низкообогащенного урана и 17 204 тонн природного урана [180].

Более 96 % объемов природного урана было размещено на территории газодиффузионного завода в Падьюке, в то время как оставшиеся 770 тонн были распределены среди других 25 площадок DOE. При этом 97 % природного урана находилось в форме гексафторида.

Что касается низкообогащенного урана, то 96 % его запасов хранилось на территории трех площадок: Хэнфорд, Падьюкский газодиффузионный завод и Ферналд, а остальная часть (285 тонн) была размещена еще на 26 площадках DOE.

ВОУ по массе представлял собой менее 1 % материалов реестра, содержащих ^{235}U со степенью обогащения 0,7 % и выше.

Высокообогащенный уран

В 1996 году Министерство энергетики США официально заявило о своих планах по уменьшению избыточных объемов ВОУ путем его конверсии в низкообогащенный уран. К настоящему времени США удалось добиться значительного прогресса в реализации поставленных задач.

К середине 2012 года 11 тонн ВОУ было направлено на переработку с целью получения НОУ, а еще 127 метрических тонн оружейного урана – уже конвертировано в низкообогащенный, предназначенный для изготовления топлива энергетических и исследовательских реакторов в США и за рубежом [189]. К концу 2012 года избыточные объемы ВОУ сократились до 29 метрических тонн (рис. 1.128, стр. 278) [190].

Согласно официальным данным, к концу 2004 года в ведении DOE оставалось более 686,6 метрических тонн ВОУ (табл. 1.58) [191].

Табл. 1.58. Сравнение накопленных объемов ВОУ, м.т.

Площадка	3	3
У-12, завод Пантекс, Министерство обороны	651,6	621,2
Национальная лаборатория в Айдахо	27,4	26,8
Саванна-Ривер	22,2	18,7
Портсмутский газодиффузионный завод	21,7	0,9
Роки-Флэтс	6,0	0,1
Лос-Аламосская национальная лаборатория	3,5	2,4
Окриджская национальная лаборатория	1,6	1,6
К-25	1,5	1,5
Сандийские национальные лаборатории	0,7	0,7
Хэнфорд	0,5	0,5
Брукхэвенская национальная лаборатория	0,3	0,0
Др. площадки	3,7	12,2
ВСЕГО		

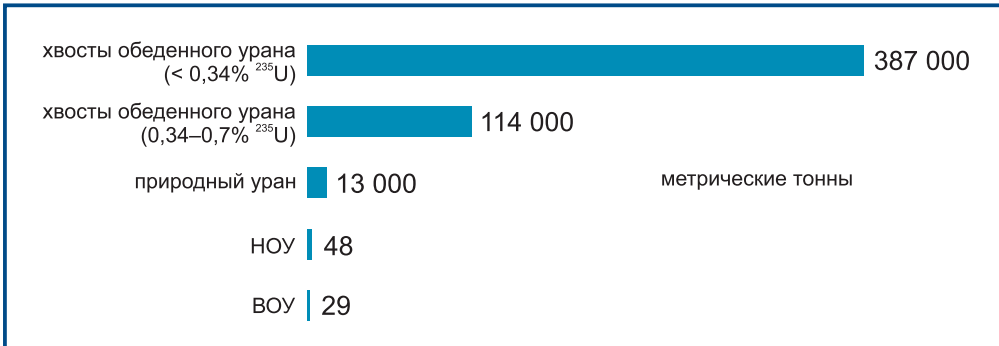


Рис. 1.128. Данные по реестру избыточных запасов материалов DOE, содержащих уран (2006 г.), метрические тонны

7 ноября 2005 года Министерство энергетики объявило о том, что в ближайшие десятилетия еще 200 метрических тонн ВОУ будут отнесены к материалам реестра, считающимися избыточными для целей обеспечения национальной безопасности [191]:

- 160 метрических тонн ВОУ обеспечат работу судовых ядерных установок, благодаря чему еще по крайней мере на 50 лет отпадет необходимость в запуске новых мощностей по производству высокообогащенного урана;
- 20 метрических тонн ВОУ будет конвертировано в НОУ для изготовления топлива энергетических и исследовательских реакторов и проведения ядерных НИОКР;
- 20 метрических тонн ВОУ будет передано для нужд космической отрасли и эксплуатации исследовательских реакторов, работающих на ВОУ.

§ 1.4. Закрытие и перепрофилирование площадок ЯОК США

В 1991 году в связи с окончанием холодной войны и подписанием ряда международных соглашений Министерство энергетики приняло решение о перестройке производственных мощностей ядерного оружейного комплекса США. В феврале 1992 года министр энергетики, выступая с ежегодным обращением к Конгрессу, заявил, что в рамках данной инициативы несколько площадок Министерства энергетики больше не будут использоваться для производства компонентов ядерного оружия, и для них будут разработаны и реализованы программы по дезактивации и выводу из эксплуатации ядерных установок, сносу зданий и сооружений, а также очистке и рекультивации территории [96].

На данный момент реализация подобных программ завершена на трех бывших военных объектах (их прошлое кратко изложено в § 1.1), каждый из которых теперь используется по иному целевому назначению.

Так, производственная площадка и санитарно-защитная зона завода Ферналд, на котором раньше изготавливали продукцию из высококачественного металлического урана, превратилась в национальный заповедник, где также расположен пункт захоронения НАО, образовавшихся при проведении работ по очистке территории.

Роки-Флэтс – некогда один из самых секретных объектов ядерного оружейного комплекса США, миссия которого заключалась в производстве плутониевых детонаторов для ядерных боеголовок, также получил статус национального заповедника.

Лаборатория Маунд Сайт была трансформирована в неядерный инновационный технопарк Mound Advanced Technology Center, где располагаются офисы компаний, занимающихся разработкой перспективных технологий в области энергетики, обработки материалов и защиты окружающей среды.

Все три проекта включали проведение масштабных работ по очистке территории и выводу из эксплуатации ядерных установок, а общие затраты на их осуществление превысили несколько миллиардов долларов. Для достижения успеха в реализации поставленных задач и своевременного выполнения работ Министерством энергетики США были разработаны специальные программы по реабилитации каждой площадки. При их разработке специалистам приходилось постоянно взвешивать все «за» и «против», принимая решения, например, о том будут ли РАО, образующиеся в результате проведения работ по очистке, захораниваться в пределах реабилитируемой площадки или же вывозиться с территории предприятия. Еще один важный вопрос состоял в определении того, какая именно конечная категория землепользования должна быть присвоена той или иной площадке. Следовательно, требовалось определить, каких уровней очистки территории целесообразно достичь в итоге. Реализация каждого из этих трех проектов включала пять основных этапов [96]:

- Определение размера ущерба, причиненного окружающей среде как непосредственно на самой площадке, так и на прилегающих территориях.
- Подбор подходящих критериев очистки окружающей среды на основании той конечной категории землепользования и состояния окружающей среды, которые бы гарантировали адекватную защиту здоровья человека и окружающей среды.
- Выбор перечня мероприятий по реабилитации площадки, которые бы обеспечили соблюдение критериев очистки и позволили в конечном итоге присвоить данному участку соответствующую категорию землепользования.
- Проведение восстановительных работ на площадке, в том числе захоронение сотен тысяч кубических метров радиоактивно и химически загрязненных материалов в соответствии со всеми критериями и требованиями при минимальном уровне затрат.
- Согласование с регулирующими органами перечня мероприятий, реализуемых в рамках ведомственного контроля, и вопросов, касающихся закрытия площадки.

За основу при разработке программ по реабилитации были приняты положения двух законодательных актов США: *Закона о всеобъемлющих мерах по защите окружающей среды, компенсации ущерба и ответственности** и *Закона о сохранении и восстановлении ресурсов***.

При этом одним из решающих факторов, повлиявших на выбор мер, включенных в план по реабилитации той или иной площадки, стала конечная категория землепользования. Это означает, что цели реализации программ по реабилитации, определяемые в ходе проведения исследований и ТЭО на основании требований CERCLA, должны соответствовать будущей категории землепользования (или категориям землепользования), которую (которые) в конечном итоге целесообразно присвоить площадке. В ре-

* CERCLA – Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act – закон Агентства по защите окружающей среды.

** RCRA – Resource Conservation and Recovery Act – федеральный закон США.

зультате при проведении базовой оценки рисков и подготовке технико-экономического обоснования подобные исходные предположения относительно будущей категории землепользования позволяют сформировать перечень наиболее целесообразных и экономически эффективных мероприятий, которые потенциально могут быть включены в программу проведения работ по реабилитации. Различные альтернативные варианты должны учитывать тот характер деятельности, который в будущем планируется осуществлять на данной территории в соответствии с наиболее целесообразной конечной категорией землепользования, утвержденной для данной площадки.

В законе CERCLA процедура выбора мероприятий по реабилитации, завершающаяся утверждением протокола о принятии решения* по конкретной площадке в целом либо по отдельным ее участкам, разбита на несколько этапов с учетом девяти основных критериев (рис. 1.129).

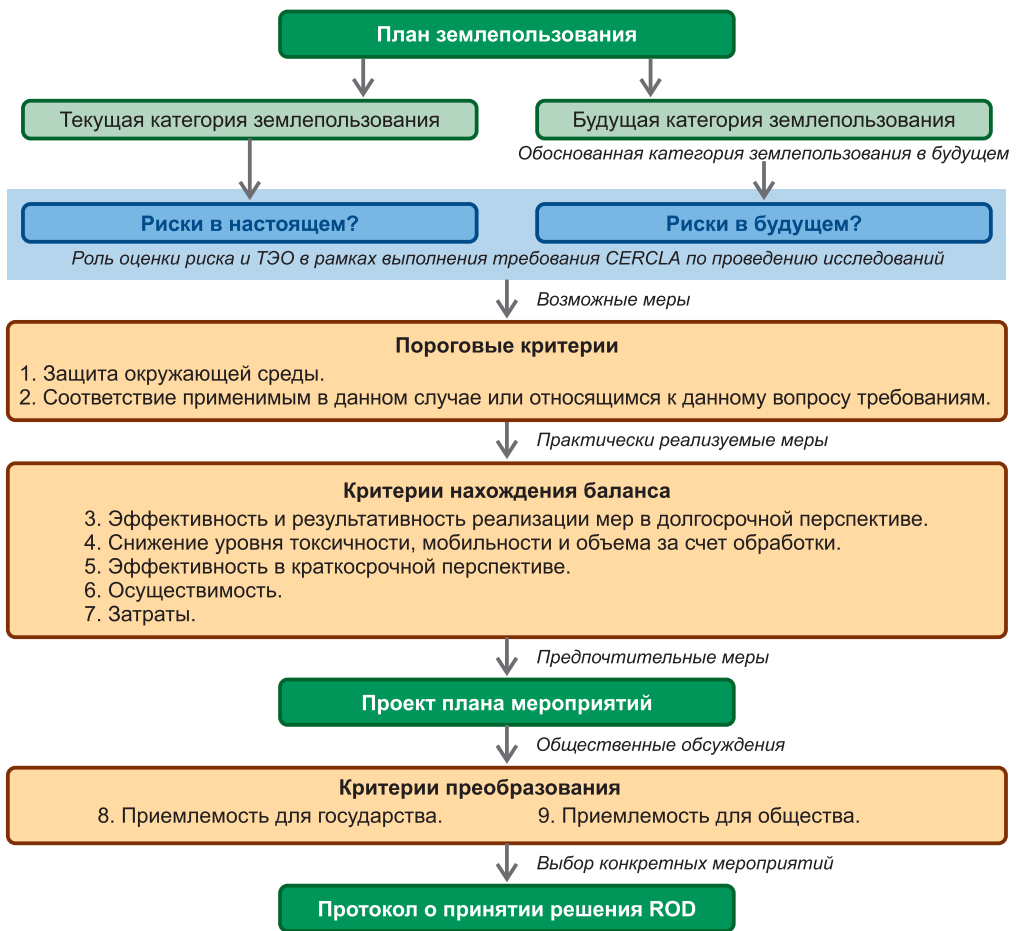


Рис. 1.129. Категория землепользования и процедура выбора перечня мероприятий в соответствии с положениями CERCLA

* ROD – Record of Decision.

Первые два критерия называют *пороговыми критериями*. Они помогают сразу же отсеять абсолютно нежизнеспособные варианты, т. е. те, которые не позволяют соблюсти нормативные требования. Таким образом, на этом этапе можно отбросить меры, не обеспечивающие надлежащего уровня защиты окружающей среды и здоровья человека, что частично определяется выбранной конечной категорией землепользования. С помощью следующих пяти критериев, так называемых *критериев нахождения баланса*, можно сопоставить между собой различные жизнеспособные варианты на основании наиболее значимых факторов. На последнем этапе к участию в процессе принятия решений привлекается общественность и другие заинтересованные стороны, представляющие интересы различных государственных агентств. При этом разработанный проект плана мероприятий оценивается на основании двух критериев, определяющих его приемлемость для государства и общественности – *критериев преобразования*. Своё название они получили в связи с тем, что на последнем этапе в проект программы мероприятий могут быть внесены некоторые изменения в целях повышения его общественной приемлемости. В итоге после внесения в проект всех изменений формируется протокол о принятии решения, в котором детально описывается выбранная стратегия по проведению восстановительных мероприятий [96, 192].

В процессе принятия решений по очистке площадки (или по очистке отдельного участка площадки) выбор, сделанный в пользу той или иной конечной категории землепользования, влияет на то, какими именно будут количественные показатели, определяющие необходимую степень очистки загрязненной почвы и объемы отходов, подлежащих удалению – они должны гарантировать эффективную радиологическую защиту людей, потенциально подверженных непосредственному воздействию почвенного загрязнения. Также при составлении перечня мероприятий и в рамках общей оценки уровня защиты, обеспечиваемого реализацией той или иной стратегии, следует учесть еще один важный фактор – степень очистки почвы должна обеспечивать эффективную защиту как поверхностных и грунтовых вод на данной территории, так и других объектов окружающей среды, подверженных опосредованному воздействию радиоактивного загрязнения почвы. Как правило, наименьшее значение концентрации того или иного загрязняющего вещества в почве (с учетом требований по защите здоровья человека в случае непосредственного контакта с загрязненным объектом, защите грунтовых/поверхностных вод и других объектов окружающей среды) принимается в качестве целевого показателя при проведении работ по очистке территории. Таким образом, конечная категория землепользования является неотъемлемым, но далеко не единственным показателем, принимаемым во внимание при установлении целевых уровней очистки почвы и удаления отходов [96].

В следующих разделах содержится более подробное описание трех уже завершенных проектов по очистке территории бывших производственных объектов ядерного оружейного комплекса США – Ферналд, Роки-Флэтс и Маунд Сайт (см. § 1.1.).

1.4.1. Ферналд

История создания площадки Ферналд, как Центра по производству ядерных сырьевых материалов, и связанное с этим радиоактивное загрязнение окружающей среды кратко описаны в § 1.1.

В 1986 году штат Огайо подал иск против Министерства энергетики о нарушении ряда положений нормативно-правовых актов, повлекших за собой нанесение ущер-

ба окружающей среде. В том же году между DOE и Агентством по охране окружающей среды США было заключено Соглашение, инициировавшее проведение исследований по оценке ущерба, нанесенного окружающей среде в результате работы завода в Ферналде.

Переход от производственной деятельности к реализации проекта по реабилитации

Геополитические изменения, ознаменовавшие окончание холодной войны, привели к закрытию ряда заводов по производству урана в США, в том числе и в Ферналде, после чего под эгидой Министерства энергетики США и Агентства по защите окружающей среды была инициирована программа по реабилитации и восстановлению качества окружающей среды. Для привлечения заинтересованных сторон к участию в процессе принятия решений по данной программе Министерство энергетики сформировало специальную рабочую группу, состоящую из представителей местных органов власти и профсоюзов, местных жителей, работников завода Ферналд. Рабочая группа представила свои рекомендации о целесообразных по мнению ее членов уровнях очистки территории, стратегиях захоронения отходов, а также конечной категории землепользования [96].

С целью проведения исследований и ТЭО в 1988 году Министерство энергетики подготовило рабочий план, разбив всю территорию предприятия на 39 участков. По результатам данного исследования в 1989 году ЕРА включил Ферналд в перечень приоритетных площадок для проведения работ по реабилитации, финансируемых за счет программы Суперфонд.

Для повышения эффективности планируемых работ 39 участков были разбиты на пять групп. Каждая группа включала участки, характеризующиеся либо схожими проблемами по загрязнению компонентов окружающей среды, либо эти участки были частью какой-либо одной зоны размещения отходов (табл. 1.59, стр. 284).

Табл. 1.59. Пять групп загрязненных участков, определенных в рамках программы по реабилитации площадки Ферналд

Группа	Состав	Сроки проведения работ по реабилитации и очистке территории
OU1	Котлованы с РАО	1995–2005 гг.
OU2	Другие объекты, содержащие РАО (могильники ТРО, пруды с известковым шламом)	1995–2004 гг.
OU3	Зона производства металлического урана	1996–2006 гг.
OU4	Хранилища РАО	2000–2006 гг.
OU5	Объекты окружающей среды (почва, грунтовые и поверхностные воды)	1996–2006 гг. – почва и поверхностные воды. Работы по очистке грунтовых вод на площадке продолжаются по сей день

Четыре производственных участка OU1–OU4 представляли собой площадки, где раньше размещались производственные корпуса или установки по обращению с РАО, ставшие источником распространения радиоактивного и химического загрязнения. Участок OU5 охватывал все компоненты окружающей среды как на территории Ферналда, так и за ее пределами, загрязненные в результате выбросов и сбросов с участков OU1–OU4. Всего в ходе исследования было выявлено 89 основных загрязняющих веществ.

Наиболее распространенным загрязняющим элементом оказался уран, обнаруженный в концентрациях выше фоновых значений не только на производственной площадке, но и за ее пределами – вне границ комплекса ареал почвенного загрязнения распространился на площадь свыше 28 км².

В этой связи главный вопрос, на которой предстояло ответить в ходе разработки программы по очистке территории Ферналда, заключался в следующем: какой объем почвы следует удалить, чтобы обеспечить защиту здоровья человека как на самой площадке, так и на близлежащих территориях? При ответе на этот вопрос разработчикам проекта пришлось руководствоваться двумя основными соображениями. Во-первых, требовалось обеспечить защиту грунтовых вод на площадке. Во-вторых, уровень очистки почвы должен был гарантировать приемлемый уровень риска для человека, непосредственно контактирующего с загрязненным грунтом.

С другой стороны для установления необходимой степени очистки почвы следовало определиться с возможной конечной категорией землепользования. Для этого были проведены консультации с рабочей группой, в ходе которых были установлены четыре группы задач для каждой потенциальной категории землепользования [96]:

- После проведения работ вся территория промышленной площадки может быть передана в неограниченное использование с возможностью размещения небольших фермерских хозяйств на любом ее участке.
- На территории площадки будет выделена отдельная зона для захоронения загрязненной почвы, при этом после проведения работ вся территория промышленной площадки за исключением зоны захоронения РАО может быть передана в неограниченное использование с возможностью размещения небольших фермерских хозяйств на любом ее участке.
- На территории площадки будет выделена отдельная зона для захоронения загрязненной почвы, остальная территория может быть использована лишь в определенных целях при условии реализации специальных мер ведомственного контроля. Таким образом, вся территория площадки, за исключением участка захоронения РАО, может быть использована для создания рекреационных, торговых или промышленных зон.
- Захоронение минимального объема загрязненного грунта в пункте захоронения и использование остальной территории исключительно в целях размещения комплекса по обращению с РАО.

Выделение конкретных целей для каждой потенциальной категории землепользования позволило составить исчерпывающий перечень альтернативных стратегий проведения работ по реабилитации. Теперь разработчики проекта получили всю необходимую информацию для того, чтобы оценить имеющиеся технические ограничения, определить необходимые в каждом отдельном случае меры административного контроля и стоимость работ, продвигаясь последовательно от одного варианта к другому.

В ходе исследования было рассмотрено множество технологий по реабилитации и различных процессов, которые потенциально могли быть использованы при очистке территории Ферналда – всего более 2 000. Однако в итоге с учетом четырех рассмотренных выше групп задач было отобрано всего 10 наиболее целесообразных вариантов. Эти варианты были сопоставлены между собой, а затем проанализированы на основании трех основных факторов: возможность технической реализации, эффективность и стоимость. Так, был составлен список из семи альтернатив (табл. 1.60) [96].

Табл. 1.60. Альтернативные варианты стратегий по очистке территории Ферналда

Альтернатива		Состав мероприятий
Полное бездействие	–	Данный вариант служил отправной точкой для сравнения различных альтернатив на основании нормативных требований.
Альтернатива 1А	Экспкавация грунта и вывоз с площадки	Выполняется экскавация почвы, степень загрязнения которой превышает предельные значения, установленные в соответствии с требованиями к окончательной реабилитации территории, и вывозится с площадки с целью захоронения в лицензированном пункте захоронения. В результате вся территория площадки может быть передана в неограниченное использование с возможностью размещения небольших фермерских хозяйств на любом ее участке.
Альтернатива 2А	Инженерный пункт захоронения	На отдельном участке сооружается пункт захоронения РАО, а остальная территория может быть передана в неограниченное использование с возможностью размещения небольших фермерских хозяйств на любом ее участке. Осуществляется экскавация почвы, степень загрязнения которой превышает предельные значения, установленные в соответствии с требованиями к окончательной реабилитации территории. Загрязненная почва захоранивается в Ферналдском поверхностном пункте захоронения.
Альтернатива 2С	Пункт захоронения на площадке и частичный вывоз РАО с площадки	Выполняется экскавация загрязненной почвы. В зависимости от концентрации загрязняющих веществ часть почвы захоранивается на специально отведенном под эти цели участке, который затем будет засыпан слоем грунта с последующим восстановлением растительного покрова. Другая часть почвы, концентрации загрязняющих веществ в которой превышают предельные значения, установленные для сценария «облучения лица, незаконно проникнувшего на территорию», вывозится для захоронения на другую площадку.
Альтернатива 3А	Инженерный пункт захоронения	Данный вариант аналогичен Альтернативе 2С. Однако вся территория за исключением площадки пункта захоронения может быть предоставлена в пользование юридическим лицам для размещения производственного или коммерческого комплекса, либо государству в целях создания национального парка или заповедника. Жилая застройка территории и проведение сельскохозяйственных работ запрещены.
Альтернатива 3С	Пункт захоронения на площадке и частичный вывоз РАО с площадки	Данный вариант аналогичен Альтернативе 2С, за исключением изменения категории землепользования и сценариев облучения, рассмотренных в Альтернативе 3А.
Альтернатива 4А	Инженерный пункт захоронения	Данный вариант аналогичен Альтернативе 2А, однако после проведения работ по очистке все территории, за исключением площадки пункта захоронения, становятся открытыми для широкой общественности и не могут быть использованы в производственных целях.
Альтернатива 4С	Пункт захоронения на площадке и частичный вывоз РАО с площадки	Данный вариант аналогичен Альтернативе 2С, за исключением изменений, описанных выше для Альтернативы 4А.

После совместных обсуждений представители DOE, EPA и рабочей группы определили Альтернативу 3А в качестве наиболее предпочтительной стратегии по очистке загрязненной почвы в Ферналде: она позволяла обеспечить безопасность в долгосрочной перспективе, ассоциировалась с наименьшими краткосрочными рисками, в сравнении с остальными вариантами оценивалась как наиболее экономически эффективная и предусматривала использование уже хорошо зарекомендовавших себя технологий. Кроме того, в ходе дискуссии стало ясно, что ни одна заинтересованная сторона не считает, что размещение фермерских хозяйств на территории бывшей промышленной площадки действительно целесообразно. Таким образом, была утверждена Альтернатива 3А, предусматривающая наложение определенных ограничений на землепользование и запрет на ведение сельскохозяйственной деятельности. После чего были определены требуемые уровни очистки почвы и произведена их оценка. Результаты проведенного исследования показали, что принятые уровни очистки действительно гарантируют защиту грунтовых вод Большого водоносного горизонта Майами, рассматриваемого в качестве потенциального источника питьевой воды, и обеспечивают защиту экологических ресурсов Ферналда в долгосрочной перспективе.

Выполнение работы и их результаты

Порядок и сроки проведения мероприятий по очистке территории Ферналдского комплекса приведены в табл.1.61.

Табл. 1.61. История проведения работ на площадке Ферналда

Годы	Планируемые мероприятия
1989	Площадка Ферналд включена в перечень приоритетных площадок EPA, завод закрыт
1991	Начало проведения работ по реабилитации площадки
1993–1996	Подписание протоколов о принятии решений по пяти группам участков
1998	Министерство энергетики публикует проект Плана по восстановлению природных ресурсов Ферналда
2006	Завершение работ по рекультивации площадки с внедрением системы долгосрочной очистки подземных вод, продолжается реализация ряда проектов по восстановлению качества окружающей среды
2008	Заповедник Ферналд открыт для посещения

На рис.1.130 приведены результаты проведения работ по каждой из пяти групп участков [91]:

- *Проект по очистке котлованов с РАО (OU1).* Проведены работы по экскавации содержимого котлованов с РАО. РАО были подвергнуты термической сушке и по железной дороге доставлены в пункт захоронения в штате Юта.

- *Проект по созданию Ферналдского пункта захоронения (OU2, OU3 и OU5).* Около $2,2 \cdot 10^6$ м³ низкоактивной почвы, строительного мусора и обломков снесенных конструкций, поступивших с участков OU2, OU3 и OU5, было размещено в новом приповерхностном пункте захоронения, состоящем из восьми камер с однослойным покрытием шириной 290 м, длиной 1020 м и высотой 20 м.

• *Проект по очистке производственного участка (OU3).* В рамках данного проекта были проведены работы, охватившие более 300 зданий и сооружений, вспомогательное оборудование, инвентаризированные опасные материалы и отвалы металлолома, также был введен в эксплуатацию ряд установок для очистки и дезактивации территории. Здания на площадке были дезактивированы и снесены. Радиоактивно загрязненные материалы, удовлетворяющие критериям приемлемости, были размещены в Ферналдском пункте захоронения, а остальные РАО вывезены и захоронены на других площадках.

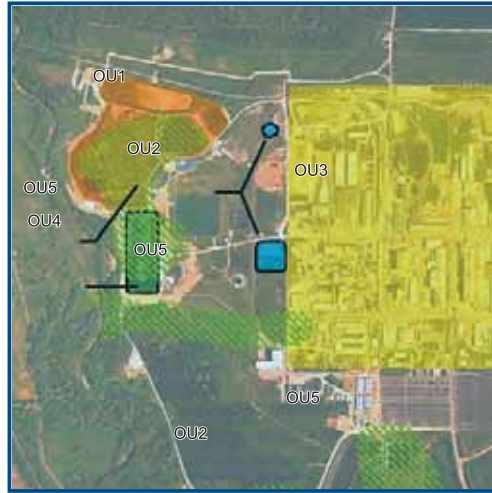


Рис. 1.130. Загрязненные участки на территории площадки Ферналд

• *Проект по очистке территории хранилищ РАО (OU4).* РАО из хранилищ 1 и 2 были отвержены, упакованы в контейнеры и транспортированы в пункт захоронения в штате Техас. Отходы из хранилища 3 были извлечены с помощью вакуумного устройства, кондиционированы, упакованы и направлены в пункт захоронения в штате Юта.

• *Проект по характеристике и экскавации почвы (OU2 и OU5).* Экскавация почвы была произведена на участках, где содержание урана в грунте превышало 82 частицы на миллион. Низкоактивная почва была помещена в Ферналдский пункт захоронения, а остальная часть загрязненной почвы вывезена с площадки на другие полигоны. Для того чтобы определить, насколько эффективным оказалось проведение работ по экскавации и привело ли оно к снижению содержания радиоактивных элементов в почве до требуемых значений, применялись радиационные сканеры, физический отбор проб и статистический анализ.

• *Восстановление водоносного горизонта и очистка загрязненной воды (OU5).* Загрязненные грунтовые воды Большого водоносного горизонта Майами были подвергнуты очистке, благодаря чему уровень загрязнения снизился до значений, установленных нормами качества питьевой воды (30 частиц на миллион для урана). С 1993 года на площадке действует система, производящая откачку и очистку поверхностных и грунтовых вод, задача которой снизить содержание урана в воде. Именно уран по большей части обуславливает загрязнение Большого водоносного горизонта Майами, являющегося единственным в регионе источником питьевой воды – ареал его загрязнения распространился на площадь свыше 0,8 км².

Кроме того, в Ферналде на постоянной основе осуществляется ведомственный контроль. Это связано с тем, что в Ферналдском пункте захоронения размещены большие объемы радиоактивно загрязненных почв, обломков строительных конструкций и мусора, а текущие уровни радиоактивного загрязнения почвы и грунтовых вод не позволяют изменить статус площадки и санкционировать ее неогра-

ническое использование. По этой причине в Ферналде осуществляется мониторинг состояния компонентов окружающей среды в соответствии со специально разработанным планом ведомственного контроля, предусматривающим выполнение трех основных условий:

- *Ответственность за реализацию ведомственного контроля возложена на собственника площадки.* Площадка Ферналд и Ферналдский пункт захоронения находятся в бессрочной государственной собственности. Управление по обращению с объектами ядерного наследия Министерства энергетики США отвечает за мониторинг, техническое обслуживание пункта захоронения, а также несет ответственность за обеспечение безопасности на всей территории Ферналдского заповедника.

- *Государственный контроль.* Ведомственный контроль также предполагает наложение ограничений на использование имущества Ферналдского заповедника. Экологические обязательства содержат положения относительно ограничений по использованию грунтовых вод и земельных участков в бытовых и сельскохозяйственных целях, а также предусматривают бессрочное нахождение данных земель в государственной собственности.

- *Контроль несанкционированного доступа.* Для предотвращения несанкционированного доступа лиц на территорию пункта захоронения по его периметру установлены ограждения и информационные таблички. Кроме того, территория постоянно патрулируется сотрудниками службы безопасности.

Все работы по очистке территории Ферналдского комплекса были полностью завершены в октябре 2006 года, а затраты на их реализацию составили порядка 4,4 млрд долларов:

- Выполнение работ завершено досрочно – за 12 лет до срока, намеченного согласно исходному плану работ, причем затраты по проекту удалось сократить на 7,8 млрд долларов США.
- В результате проведенных работ было демонтировано свыше 300 зданий, включая 250 зданий и сооружений с радиоактивным загрязнением.
- Из 6 котлованов извлечено и вывезено свыше 1 000 000 тонны отходов.
- Извлечено порядка $8,7 \cdot 10^5$ м³ продуктов распада урана.
- В созданном пункте захоронения размещено $2 \cdot 10^6$ м³ загрязненного грунта, с территории площадки вывезено в общей сложности около $1,4 \cdot 10^6$ м³ РАО.
- Рекультивировано 90 гектаров земель в зоне распространения загрязненных ураном грунтовых вод.

На сегодняшний день 3,6 км² Ферналдского заповедника очищено от радиоактивного загрязнения, еще 0,5 км² занято Ферналдским пунктом захоронения, где размещены НАО, образовавшиеся в результате проведения работ по рекультивации, а на оставшихся 0,1 км² расположены объекты инфраструктуры, в том числе недавно реконструированный и модернизированный Информационный центр. На данный момент площадка приобрела статус природного заповедника [92, 96].

Рис.1.131 демонстрирует произошедшие изменения на территории Ферналда.



Рис. 1.131. Площадка Ферналд (слева – до начала проведения работ по реабилитации, справа – Ферналдский национальный заповедник)

В центре проводятся выставки различной тематики. Так, например, любой желающий может ознакомиться с особенностями ведения сельского хозяйства в этом регионе, а также историей коренных американцев, некогда проживавших в этой местности. Постоянно действуют экспозиции, посвященные миссии Ферналда в рамках ядерного оружейного комплекса США, а также мероприятиям по очистке территории и восстановлению качества окружающей среды [96, 107].

1.4.2. Роки-Флэтс

История сооружения комплекса предприятий в Роки-Флэтс и загрязнения прилегающих территорий описана в § 1.1.

Конец 1970-х и начало 1980-х гг. были ознаменованы многотысячными протестными акциями. Первая такая акция состоялась в 1978 году перед визитом в Роки-Флэтс президента Дж. Картера. Тогда более 3,5 тысяч активистов перекрыли железнодорожные пути, ведущие к заводу, пытаясь сорвать поставки радиоактивных грузов. В апреле и в июне следующего года состоялись еще более масштабные акции с участием до 16 000 человек [99].

Такая негативная реакция общественности была по большей части спровоцирована публикацией результатов исследования доктора Карла Джонсона из Департамента здравоохранения округа Джефферсон, свидетельствовавших о том, что вблизи Роки-Флэтс частота возникновения раковых заболеваний намного выше, чем в других районах округа. Такие массовые общественные выступления побудили Конгресс США принять решение о проведении Министерством энергетики расследования, направленного на определение плана дальнейших действий и изучение возможности передислокации предприятия. Также была сформирована независимая экспертная комиссия из 12 человек, которая должна была контролировать проводимое DOE исследование [98, 99].

В 1981 году были опубликованы результаты исследования DOE, согласно которым частота возникновения раковых заболеваний у мужчин, проживавших вблизи Роки-Флэтс, оказалась ниже, чем у контрольной группы граждан США. В 1982 году независимая экспертная комиссия огласила результаты проведенной оценки – затраты на передислокацию предприятия Роки-Флэтс могли составить порядка 2,06 млрд долларов и занять от 10 до 15 лет. Наконец, в 1988 году вышел итоговый отчет DOE, в котором уровень обеспечения безопасности на предприятии Роки-Флэтс был оценен как чрезвычайно низкий. В том же году был опубликован и другой доклад DOE – в нем были

рассмотрены вопросы, касающиеся модернизации установок ядерного оружейного комплекса США. В докладе содержалось предписание о постепенном закрытии и выводе из эксплуатации установок Роки-Флэтс.

Тем не менее, операции по производству компонентов ядерного оружия в Роки-Флэтс были прекращены уже в следующем году. 6 июня 1989 года на основании ордера, выданного областным судом штата Колорадо, более 80 сотрудников ФБР и Агентства по защите окружающей среды вошли на территорию предприятия и в течение 20 дней собирали доказательства несоблюдения требований природоохранного законодательства США, положенных в основу исследований по оценке состояния технологических мощностей Роки-Флэтс и их безопасности для окружающей среды, персонала и местного населения.

В результате были выявлены многочисленные нарушения и факты, обуславливающие неприемлемо высокие уровни ядерной опасности, например, высокий потенциал возникновения ядерной критичности в системах хранения ЖРО, условия для нагнетания повышенного давления в системах и повышенный риск радиолитического распада, чреватый интенсификацией процессов образования водорода и способный привести к взрыву. Из-за установленных нарушений работы на заводе были приостановлены до момента их полного устранения.

Практически все замечания комиссии были устранены уже к 1992 году, и завод был снова готов заработать, однако этого так и не произошло, так как в меняющихся геополитических условиях отпала необходимость в интенсивной наработке оружейных материалов, и президент Буш принял решение о завершении программы по производству ядерно-оружейных материалов.

В 1992 году завод Роки-Флэтс был окончательно закрыт [99]. Производственная площадка и санитарно-защитная зона предприятия были включены в перечень приоритетных площадок ЕРА для проведения работ по реабилитации, финансируемых за счет программы Superfund. С этого момента основная задача Министерства энергетики состояла в разработке и реализации программы по очистке загрязненной территории и приведении площадки в безопасное состояние.

Разработка программы по очистке территории Роки-Флэтс

Соглашение об очистке территории Роки-Флэтс, сторонами которого выступили Министерство энергетики, Агентство по защите окружающей среды и Управление здравоохранения и защиты окружающей среды штата Колорадо, было подписано в июле 1996 года. Соглашение во многом изменило подход к нормативному регулированию в данной области. Так, впервые в подобный документ был включен перечень задач по каждому из 8 основных направлений работ, способных повлиять на решения, принимаемые по тому или иному вопросу в рамках разработки программы по очистке территории:

- утилизация оружия, пригодных для использования делящихся материалов и ТРУ РАО;
- обращение с РАО на площадке и за ее пределами;
- улучшение качества воды (по завершению работ качество поверхностных вод на площадке, а также качество поверхностных и грунтовых вод, покидающих территорию площадки, должно соответствовать нормам качества питьевой воды);
- разработка руководящих рекомендаций (снижение риска, экономическая эффективность, защита здоровья человека, предотвращение негативного воздействия на экологические ресурсы и др.);

- определение конечной категории землепользования (были рассмотрены две альтернативы: создание заповедника или промышленного центра);
- разработка плана по проведению мониторинга состояния окружающей среды;
- полная ликвидация зданий и сооружений на площадке;
- организация компактного хранения оружейных материалов, пригодных для использования делящихся материалов и ТРУ РАО.

Новый подход позволил собрать целостную картину возможных мероприятий по очистке площадки до требуемых уровней [193].

В рамках Соглашения вся территория Роки-Флэтс была разделена на две части: промышленная зона (т. е. территории, занимаемые промышленными установками и вспомогательной инфраструктурой) и буферная зона (санитарно-защитная зона предприятия). Кроме того, в соглашении были прописаны уровни вмешательства, характеризующие требуемую степень очистки почвы и грунтовых вод в результате выполнения соответствующих мероприятий, а также нормы очистки поверхностных вод, представленные в форме численных значений по каждому загрязняющему элементу. Все же приведенные в этом документе значения не были окончательными и использовались лишь в качестве ориентира для принятия дальнейших решений.

Что касается конечной категории землепользования, то в соответствии с положениями Соглашения данная территория могла быть использована либо для развития промышленности, либо для создания заповедной зоны. Окончательный выбор был сделан после того, как данные по характеристике площадки были сопоставлены с уровнями вмешательства по почве и воде, и на основании анализа было принято решение о превращении комплекса Роки-Флэтс в национальный заповедник. Соответствующий закон «О создании национального заповедника Роки-Флэтс» вступил в силу в 2001 году. После чего уровни вмешательства были скорректированы с учетом новых сценариев облучения и утверждены в 2003 году [96].

Мероприятия по очистке и рекультивации территории Роки-Флэтс

В 1995 году Kaiser-Hill LLC, совместное предприятие компаний Kaiser Group Holdings и CH2M Hill, а также несколько независимых подрядчиков, таких как Westinghouse, Washington Group International и BNFL, подписали контракт о проведении работ по очистке и рекультивации площадки Роки-Флэтс – комплекса, на территории которого располагались здания 771 и 776/777, признанные самыми уязвимыми с точки зрения обеспечения ядерной и радиационной безопасности зданиями ядерного оружейного комплекса США – в них хранились большие объемы растворов и упаковок с плутонием, не отвечающих современным требованиям безопасности. Кроме того, в здании 771 находилась так называемая комната «бесконечности», в которой стрелки измерительных приборов, использовавшихся в 1970-х гг., зашкаливали из-за невероятно высоких уровней радиации.

План по реабилитации территории Роки-Флэтс, разработанный к 1996 году, предполагал полную ликвидацию всех зданий и сооружений на площадке, удаление и вывоз всех РАО и особых ядерных материалов, а также восстановление качества воды и почвы в соответствии с показателями, установленными нормами безопасности [101–103].

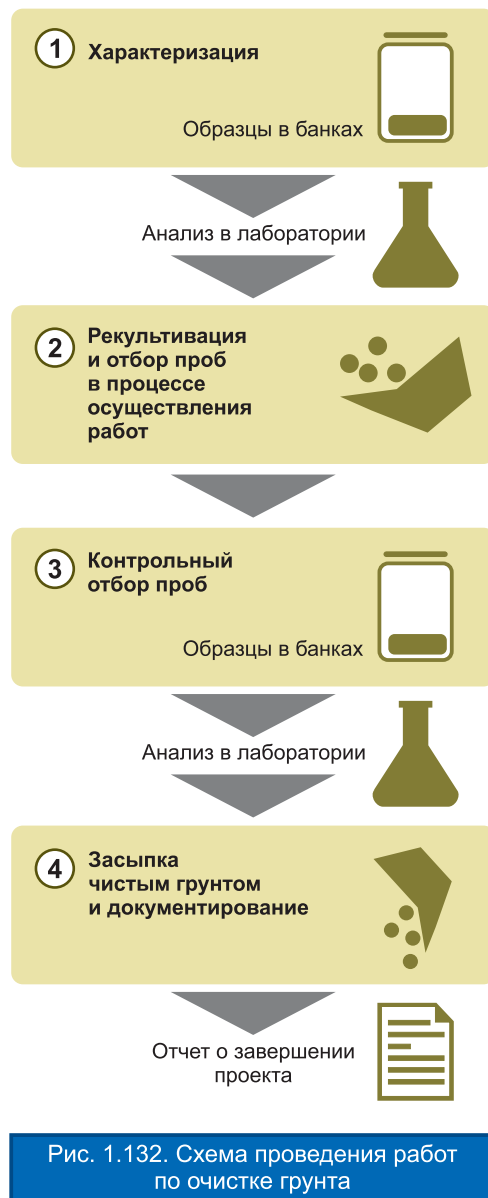
Изначально затраты на проведение работ по реабилитации территории Роки-Флэтс оценивались на уровне 30 млрд долларов, а закончить их выполнение планирова-

лось не раньше, чем через 70 лет. Однако компания Kaiser-Hill заявила, что завершит все работы уже к 2010 году, а их стоимость не превысит 9 млрд долларов. В 2000 году Министерство энергетики заключило второй контракт с Kaiser-Hill, согласно которому все работы по очистке Роки-Флэтс планировалось завершить к 15 декабря 2006 года при суммарных затратах 3,94 млрд долларов. Однако в итоге Kaiser-Hill удалось реализовать всю программу по очистке территории Роки-Флэтс досрочно – к 13 октября 2005 года, сэкономя 553,9 млн долларов на проведении всех работ и еще около 438,2 млн долларов за счет ускоренного их выполнения [194].

Поскольку согласно первоначальным планам завод предполагалось закрыть лишь на время, особые ядерные материалы с 1989 года продолжали хранить в помещениях перчаточных линий – около 12,9 т. плутония были размещены в 27 000 упаковок, чья конфигурация не предусматривала долгосрочного хранения. Поэтому первоочередной задачей стало приведение материалов, содержащих плутоний и высокообогащенный уран в состояние, пригодное для долгосрочного хранения. На самом деле, на тот момент в США вообще не было утверждено никаких норм для долгосрочного хранения подобных материалов. Поэтому работы по очистке территории начались с разработки общепромышленных требований к долгосрочному хранению и упаковке ОЯМ, находящихся вне ядерно-оружейного цикла производства [100, 101].

Для очистки почвы производилась экскавация слоя грунта толщиной не более 1 м и засыпка выработок слоем чистой почвы (рис. 1.132). В местах, где глубина загрязнения превышала 1 м, экскавация грунта не выполнялась. Загрязненный грунт был вывезен с территории площадки в пункты захоронения в Айдахо и Нью-Мексико [103, 194].

Рекультивация полигона 903 стала одним из самых сложных и масштабных проектов по очистке территории Роки-Флэтс. Решение о закрытии полигона было принято только в 1967 году, когда после сильного ливня еще большие объемы загрязняющих веществ попали в окружающую среду. Работы по ликвидации полигона стартовали



в 1968 году. К тому моменту многие бочки с РАО оказались пусты. Причем не только сама территория могильника подверглась загрязнению – загрязненными вследствие ветрового уноса частиц земли оказались и прилегающие участки.

В рамках реализации программы по очистке и рекультивации территории Роки-Флэтс пришлось удалить около 32 000 тонн загрязненного грунта и асфальта. Повысить безопасность при выполнении всех работ по экскавации грунта позволило применение мобильных тентов (рис. 1.133). Кроме того, на территории вблизи полигона 903 была внедрена система пассивной очистки воды – установлено три барьера для фильтрации загрязненных грунтовых вод, позволяющих снизить концентрации нитратов, урана и летучих органических веществ. Данная система уже позволила очистить порядка $2 \cdot 10^7$ л грунтовых вод, а в общей сложности объем загрязненных вод, подвергнутых очистке, составил $4 \cdot 10^7$ л [103].



Рис. 1.133. Экскавация грунта под мобильными тентами

Ликвидация растворов, хранившихся в установках Роки-Флэтс, представляла еще одну задачу, которую было необходимо решить для приведения площадки в безопасное состояние – в общей сложности более 30 000 литров растворов, содержащих около 700 кг плутония и обогащенного урана, находились в трубопроводах общей протяженностью несколько десятков километров и в 690 стареющих резервуарах-хранилищах, размещенных внутри зданий. Кроме того, из-за радиолиза внутри таких систем мог образовываться водород, создающий опасность взрыва. Работы по откачке, переработке и стабилизации растворов были инициированы в конце 1994 года [102].

Также предстояло полностью ликвидировать более 800 загрязненных зданий и сооружений общей площадью около $0,3 \text{ км}^2$ (из них $0,1 \text{ км}^2$ – загрязненных плутонием и ураном). В том числе пять зданий, включенных в десять наиболее радиационно опасных зданий США [101, 103].

Самой сложной и трудоемкой частью проекта стало проведение работ по ликвидации зданий 771 и 776/777, характеризующихся чрезвычайно высокими уровнями радиоактивного загрязнения, обусловленными произошедшими здесь в 1957 и 1969 годах пожарами (см. §1.1). На момент начала работ по ликвидации здания 776/777 в нем находились тысячи контейнеров с плутонием, большая часть которых была упакована с нарушением действующих норм безопасности. Радиоактивно загрязненные дым и вода от пожара 1969 года пропитали строительные конструкции и проникли буквально в каждую трещину и щель в стенах здания, что значительно осложнило проведение работ по дезактивации. Кроме того, здесь располагалось множество единиц металлообрабатывающего оборудования, перчаточные боксы и 40-тонная пресс-машина. Еще одной проблемой, с которой пришлось столкнуться при проведении работ по дезактивации и ликвидации зданий, в том числе и здания 776/777, стало присутствие больших объемов

конструкций из асбеста. Так, вся внешняя облицовка здания 776/777 была выполнена из асбеста. В целях снижения негативного воздействия на работников при проведении работ по дезактивации покрытие из асбеста пришлось полностью демонтировать и заменить его плитами из другого материала, что позволило сохранить отрицательную разность давлений внутри помещений [104].

В здании 771 находилась наиболее загрязненная комната «бесконечности», запечатанная после пожара 1957 года. После вскрытия комнаты в 2002 году были зафиксированы уровни радиации, до 2000 раз превышающие предельно допустимые значения, установленные для проведения работ с использованием респираторов. Для снижения концентраций радиоактивных веществ в воздухе была применена техника распыления состава на основе глицерина с последующим использованием специальных спреев закрепителей, после чего комната была демонтирована с помощью резного инструмента с алмазной проволокой (рис.1.134) [102, 104].



Рис. 1.134. Демонтаж перчаточных отделений в Роки-Флэтс

Центральное место в проведении работ по ликвидации зданий и сооружений в Роки-Флэтс было отведено демонтажу так называемых перчаточных боксов, в которых размещалось самое разнообразное технологическое оборудование для проведения манипуляций с плутонием. Уровни радиоактивного загрязнения перчаточных боксов были значительными, поэтому изначально их планировалось захоранивать как трансурановые РАО. Однако американским специалистам удалось разработать особые дезактивирующие средства, которые позволили снизить уровни загрязнения до величин, допускающих транспортировку большей части таких конструкций в качестве НАО. Наиболее эффективным оказалось применение водного раствора на основе церистого нитрата. В результате объемы отходов, предназначенных для захоронения в Опытной установке по изоляции ТРУ РАО в Нью-Мексико, существенно сократились. Это также позволило вместить в упаковочные контейнеры больше РАО за счет разделки конструкций на небольшие сегменты. Все же большая часть перчаточных боксов были транспортированы в пункты захоронения НАО в неразобранном виде как объекты с поверхностным загрязнением. В общей сложности было ликвидировано 1 457 перчаточных боксов [105].

Что касается методов и технологий, использовавшихся при проведении работ по дезактивации зданий и сооружений, то особо широко применялись следующие из них [194]:

- *Гидролазерная дезактивация* с подачей воды под давлением использовалась для удаления загрязнений с поверхности бетонных стен и полов. Вода также позволяла снизить концентрации радиоактивных веществ в воздухе. В целях обеспечения оборотного водоснабжения использовалась система сбора и фильтрации отработанной воды. После такой очистки воду можно было использовать повторно. Данный метод позволял удалять краску с поверхностей, а также тонкий слой бетона. Недостатком данного ме-

тогда можно считать то, что его многократное применение способно лишь усугубить загрязнение – из-за подачи воды по давлением оставшиеся на поверхности загрязняющие вещества способны проникать глубже в пористый бетон. Кроме того, после такой дезактивации в стенах могут образовываться карманы и углубления, что может осложнить оценку состояния строительных конструкций перед началом работ по сносу здания. В случае если загрязнение удавалось локализовать, но оно распространялось на большую глубину, то приходилось вырезать целые сегменты стен или потолка с помощью пил с алмазной проволокой. Также осуществляли бурение отверстий в стенах, куда затем заливали расширяющийся раствор, способствующий растрескиванию бетона.

- *Околка* с использованием вращающихся проволочных щеток и выскабливание горизонтальных поверхностей.

- *Пленочные покрытия и закрепители* для фиксации загрязняющих веществ. Для изготовления пленочных покрытий использовались растворы на основе латекса, наносимые на загрязненные поверхности с помощью распылителя, кисти или роллера. После высыхания покрытия удаляли, а вместе с ними с поверхности захватывались и загрязняющие вещества. Закрепители, в свою очередь, позволяли повысить огнестойкость поверхности перед использованием плазменно-дуговой резки.

- *Аэрозольное орошение водными растворами растворимых веществ* (например, гликоля) позволяло абсорбировать и подавить загрязнение воздуха в любых помещениях. Недостатком данного метода является то, что частицы загрязняющих веществ могут задерживаться на одежде и обуви рабочих. Поэтому в состав аэрозолей была включена краска, светящаяся в ультрафиолетовом диапазоне, что позволило с легкостью выявлять загрязненные участки на средствах индивидуальной защиты рабочих.

- – система для моментальной упаковки крупногабаритного загрязненного оборудования. Оборудование фиксировалось на металлическом поддоне, оборачивалось усадочной пленкой, после чего при помощи распылителя наносилось специальное стойкое покрытие, служившее прочным герметичным контейнером, в котором такое оборудование можно было захоранивать как НАО (рис. 1.135).



Рис. 1.135. Применение технологии InstaCote

Проведение работ по сносу зданий и сооружений привело к образованию значительных объемов НАО. Согласно первоначальным оценкам объемы их образования не должны были превысить 184 500 м³, однако в реальности образовалось свыше 594 000 м³ НАО. На столь серьезное занижение оценок оказали влияние два фактора. Во-первых, в ходе выполнения работ стало очевидно, что дезактивировать большую часть строительных конструкций нецелесообразно. В итоге многие здания, которые изначально планировалось дезактивировать, были снесены при наличии остаточного радиоактивного загрязнения. Во-вторых, операции по упаковке отходов выполнялись недостаточ-

но эффективно, так как работы по захоронению РАО и обращению с ними финансировались из отдельных фондов, и у подрядчика, занимавшегося упаковкой отходов, не было стимула для повышения эффективности проведения соответствующих работ.

Захоронение НАО в основном осуществлялось на двух площадках – в пункте захоронения испытательного полигона в штате Невада и в коммерческом пункте захоронения в штате Юта (рис. 1.136).

На начальном этапе проведения работ по очистке территории Роки-Флэтс, когда объемы НАО были не столь велики, перевозка отходов по преимуществу производилась автомобильным транспортом. Однако в ходе ликвидации более крупных установок при-

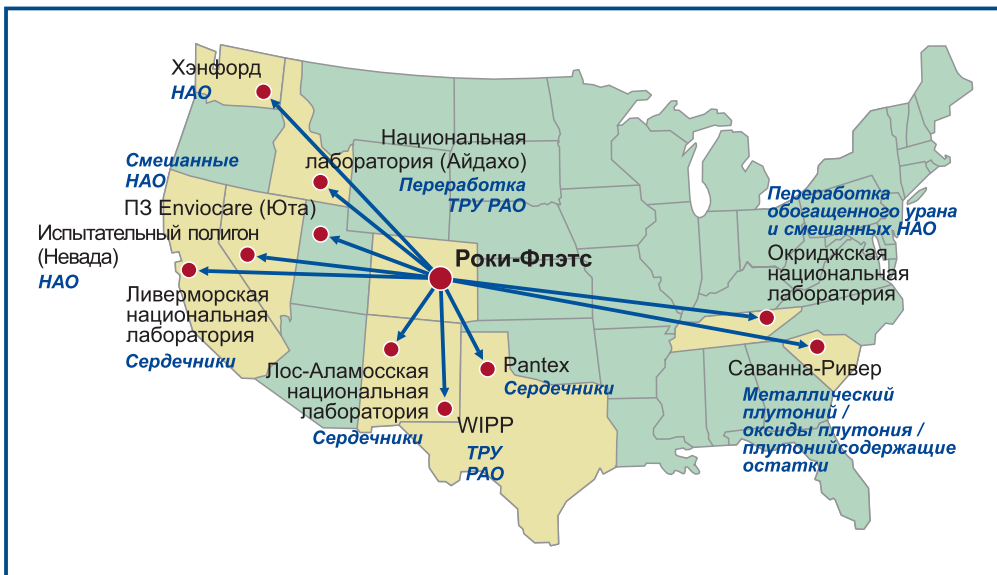


Рис. 1.136. Объекты, на которые осуществлялись поставки РАО и ОЯМ из Роки-Флэтс

шло задействовать железнодорожный транспорт, что позволило сэкономить на транспортировке порядка 27 млн долларов.

Всего в ходе реализации программы по очистке территории Роки-Флэтс с площадки на захоронения было вывезено:

- 15 011 м³ трансурановых и смешанных трансурановых РАО;
- 511 180 м³ НАО и 48 288 м³ смешанных НАО (включая загрязненные почвы с полигона 903 и прилегающих территорий);
- более 820 000 м³ твердых бытовых отходов;
- более 4 300 м³ опасных нерадиоактивных отходов.

В мае 2007 года Агентство по защите окружающей среды исключило площадку Роки-Флэтс из перечня приоритетных площадок для проведения работ по реабилитации. Часть территории буферной зоны площадью около 16 км² была передана в ведение Федеральной службы рыбного хозяйства и дикой природы США (Национальный заказник Роки-Флэтс).

В целом, работы по очистке Роки-Флэтс не позволили полностью ликвидировать радиоактивное загрязнение территорий, расположенных в пределах бывшей производственной площадки завода. Несмотря на то, что все здания были снесены, а РАО и ОЯМ вывезены с площадки, остаточное загрязнение на участках, где раньше располагались некоторые производственные установки, а также в осадительных бассейнах и на территории двух полигонов РАО ликвидировать так и не удалось. При этом под остаточным загрязнением следует понимать присутствие лишь незначительных концентраций радиоактивных материалов, химических растворителей и тяжелых металлов, в основном ниже значений, прописанных в нормативно-правовых документах. Результаты проведенных исследований показали, что столь малые концентрации загрязняющих веществ не создают угрозы здоровью человека и окружающей среде.

На данный момент вся территория Роки-Флэтс находится в собственности Министерства энергетики США, осуществляющего мониторинг состояния окружающей среды под надзором Агентства по защите окружающей среды и Департамента здравоохранения и охране окружающей среды штата Колорадо.

Произошедшие перемены наглядно иллюстрирует рис. 1.137.

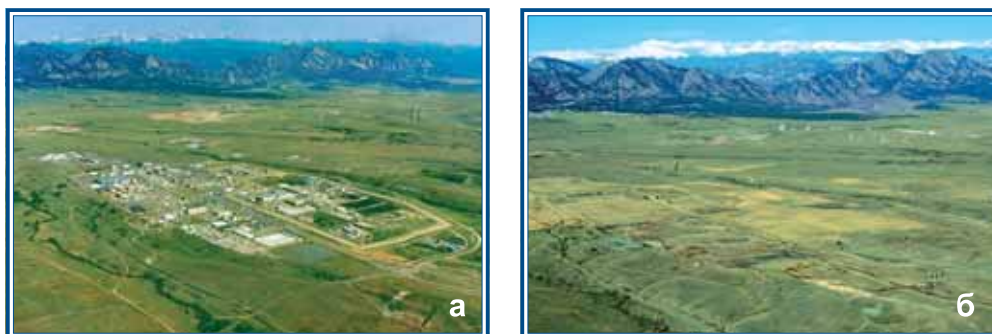


Рис. 1.137. Результаты проведения работ по реабилитации комплекса Роки Флэтс (слева – 1995 год, справа – 13 октября 2005 года)

Что касается буферной зоны (площадью 20 км²), некогда окружавшей производственную площадку, то согласно результатам мониторинга обнаруживаемые здесь уровни радиоактивного и химического загрязнения пренебрежимо малы и не требуют реализации каких бы то ни было мероприятий по реабилитации.

1.4.3. Маунд Сайт

Маунд Сайт – одна из бывших площадок ядерного оружейного комплекса США, где велась разработка и производство компонентов ядерного оружия, а также реализовывались проекты в рамках различных военных и энергетических программ Министерства энергетики США (см. § 1.1).

Уровни загрязнения Маунд Сайт не были столь уж значительными по сравнению с другими площадками ядерного оружейного комплекса США, однако предприятие находилось в непосредственной близости от водоносного горизонта, являющегося единственным источником питьевой воды в этом регионе, что стало основной причиной его включения в 1989 году в перечень приоритетных площадок ЕРА для проведения работ по реабилитации.

После включения Маунд Сайт в программу по реабилитации Министерство энергетики разработало специальную программу по очистке площадки, разделив всю территорию комплекса на девять зон. Для каждой из зон были определены задачи, которые предстояло решить в ходе проведения работ по очистке территории, установлены требования к проводимым исследованиям, утверждены графики выполнения работ и перечни соответствующих мероприятий. Однако в 1994 году из-за сокращения бюджета данная программа была пересмотрена.

Разработка программы по очистке территории Маунд Сайт

Новая программа Маунд 2000 была разработана Министерством энергетики в сотрудничестве с Агентством по защите окружающей среды и предусматривала меры по сглаживанию последствий от сокращения финансирования и ускорения темпов проведения работ, а также по использованию территории для создания промышленно-технологического центра. В этом разработчикам новой программы помогли старые архивные данные по площадке. Несмотря на то, что обычно архивные документы могут содержать большое количество неточностей, в случае Маунд Сайт информация из архивов полностью соответствовала результатам проведенных исследований, что существенно облегчило разработку особого подхода к принятию решений по очистке Маунд Сайт, способствующего значительной экономии средств и ускоренному выполнению всех работ.

Для разработки программы по очистке Маунд Сайт была создана специальная рабочая группа, состоявшая из представителей Министерства энергетики, Агентства по защите окружающей среды США и Агентства по защите окружающей среды штата Огайо. Участие в работе группы также принимали различные специалисты технического профиля и другие заинтересованные стороны, в том числе и местные жители. Таким образом, все заинтересованные стороны имели возможность высказать свое мнение или предложить свое решение той или иной проблемы.

Эксперты проанализировали состояние каждого здания и каждого участка площадки, являющегося потенциальным источником распространения радиоактивного или химического загрязнения. В результате каждый объект был отнесен к одной из трех категорий:

- проведения мероприятий по очистке не требуется;
- требуется проведение мероприятий по очистке, однако для принятия окончательного решения по их составу следует собрать дополнительную информацию;
- требуется проведение работ по реабилитации.

Что касается конечной категории землепользования, то после проведения обсуждений с жителями Майамизбурга было решено разместить на территории Маунд Сайт промышленный центр, что способствовало бы экономической диверсификации региона и созданию новых рабочих мест [96].

Работы по очистке территории Маунд Сайт

В рамках программы «Маунд 2000» вся территория была разбита на несколько участков (рис. 1.138.). В июне 1995 года был подписан протокол о принятии решения по одному из наиболее проблемных участков площадки – OU1, где располагался старый могильник. Основная задача по данному участку состояла в очистке местного водоносного горизонта от летучих органических соединений. Сделать это планировалось путем откачки грунтовых вод с их последующей очисткой воздушным осушителем.

Система должна была предотвратить дальнейшую миграцию радиоактивных веществ, просачивавшихся с поверхности, и очистить откаченные грунтовые воды до уровней, при которых допустим их сброс.

Работы по сооружению очистной системы производительностью 380 л/мин начались осенью 1996 года, а в феврале 1997 года установка была введена в эксплуатацию. Вскоре для повышения ее производительности на участке OU1 была также установлена система очистки почвы методом паровой экстракции.

Что касается самого могильника, то согласно протоколу о принятии решения удалять отходы изначально не планировалось – такой подход к очистке территории был признан нецелесообразным и слишком затратным. Тем не менее, это решение не удовлетворило местных жителей, и они подали петицию в Конгресс США. В результате с 2006 по 2010 год были проведены работы по полному удалению захороненных в Маунд Сайте отходов и их транспортировке на другие площадки. На эти цели Конгресс выделил дополнительные 30 млн долларов. Однако этих средств не хватило, и часть материалов так и не была удалена из могильника. Поэтому правительству пришлось выделить еще 20 млн долларов для завершения всех работ по извлечению материалов, засыпке могильника и рекультивации территории.

В 2011 году были утверждены поправки к протоколу о решении по производственному участку OU1, предусматривающие поддержание эксплуатации системы очистки грунтовых вод, а также реализацию особой формы ведомственного контроля, включающего в том числе наложение запрета на дальнейшее использование участка OU1 в хозяйственно-бытовых целях, а также бурение скважин для забора питьевой воды [195].

Одним из наиболее трудоемких проектов по реабилитации Маунд Сайте стала очистка канала Майами-Эри (OU4), в донных отложениях которого были обнаружены повышенные концентрации ^{238}U . Причиной загрязнения Майами-Эри стала авария на

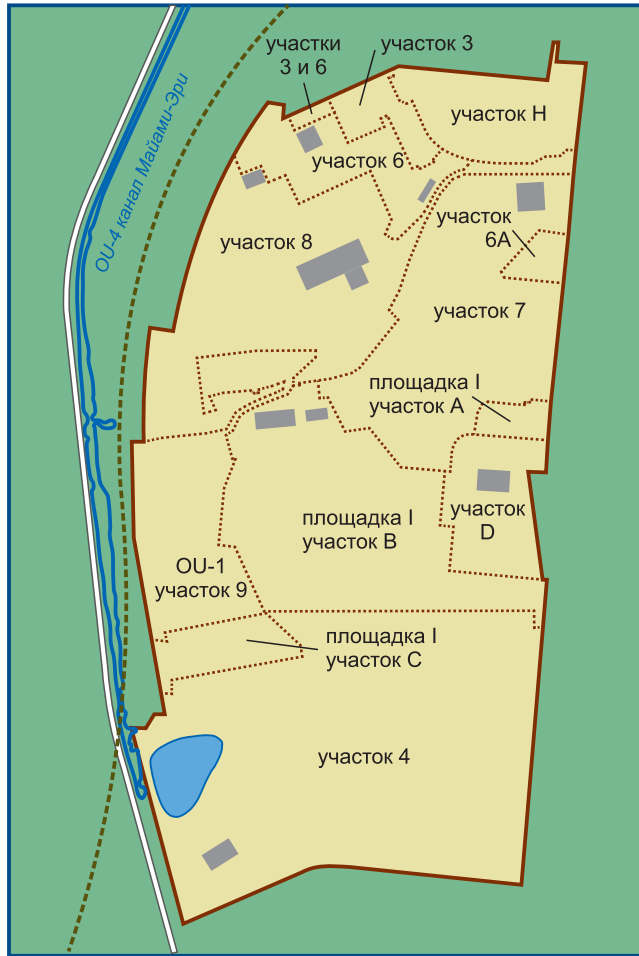


Рис. 1.138. Территория Маунд Сайте, разделенная на участки в рамках программы «Маунд 2000»

линии по обработке плутония, произошедшая в 1969 году. В результате проливного дождя загрязняющие вещества, выброшенные из установки, были смыты в канал по склону холма. В октябре 1996 года на участке стартовало проведение работ по экскавации свыше 29 тыс. м³ загрязненных донных отложений. Все работы были завершены в мае 1998 года.

В ходе проведения работ в Маунд Сайт было отобрано порядка 200 000 проб почвы, воды и воздуха, которые позволили установить многочисленные химически и радиоактивно загрязненные участки. В итоге более 6 000 вагонов с загрязненной почвой (около 286 000 м³) было вывезено с площадки и направлено на захоронение. Кроме того, с Маунд Сайт было вывезено около 290 000 м³ низкоактивных и смешанных низкоактивных отходов, образовавшихся в результате проведения работ по выводу из эксплуатации и сносу зданий, а также 300 м³ трансурановых РАО.

Из 116 зданий и сооружений на площадке было снесено 64, остальные здания были дезактивированы до уровней, позволяющих их дальнейшее использование в производственных целях при соблюдении определенных ограничений.

Так, например, было дезактивировано производственное здание Т, где раньше выполнялись операции по очистке ²¹⁰Po, использовавшегося для производства триггеров, размещалась измерительная лаборатория, где осуществлялись манипуляции с плутонием, а также хранилище трансурановых материалов. Кроме того, в здании Т и его пристройках было установлено оборудование по переработке трития, способное производить операции с многокилограммовыми партиями этого материала. В ходе работ по очистке здания все особые ядерные материалы (металл, оксиды металла и мусор), хранившиеся здесь в запечатанных бочках, были удалены. Работы по дезактивации, а также демонтажу загрязненного оборудования и частичной ликвидации строительных конструкций были выполнены компанией CH2M HILL [196].

В результате проведения работ по очистке территория Маунд Сайт была реабилитирована до состояния, позволяющего использовать данные земли исключительно в промышленных целях. Все ядерные материалы были удалены, здания и сооружения – либо ликвидированы, либо дезактивированы и подготовлены к передаче в промышленное использование. Все радиоактивные и иные опасные отходы были вывезены с площадки и захоронены в соответствии с действующими требованиями безопасности. Общие затраты на реализацию всех мероприятий по очистке и рекультивации территории Маунд Сайт составили 432 млн долларов, а с учетом необходимости поддержания системы очистки грунтовых вод суммарные затраты на реализацию проекта могут достигнуть 1,1 млрд долларов [197].

После выполнения всех предусмотренных в соответствии с программой Маунд 2000 мероприятий в целях минимизации потенциального воздействия негативных факторов на окружающую среду и человека, а также сохранения достигнутых результатов на площадке были организованы особые меры ведомственного контроля, предусматривающие, в частности, наложение ограничений на использование водных и земельных ресурсов в пределах площадки; постоянное наблюдение за естественными процессами, приводящими к смягчению последствий прошлой деятельности; мониторинг состояния грунтовых вод, а также эксплуатацию системы, осуществляющей откачку и очистку грунтовых вод. Кроме того, в рамках ведомственного контроля был принят ряд ограничений и обязательств: на площадке запрещено осуществлять определенные виды деятельности и выполнять некоторые виды работ, например, под запретом использование

площадки в непромышленных целях, экскавация грунта, откачка и использование грунтовых вод, демонтаж или сверление отверстий в бетонном полу некоторых помещений внутри здания Т без предварительного согласования подобных работ с регулирующим органом.

Муниципальный совет Маймисбурга учредил специальную Корпорацию по развитию Маунд Сайт, которой было поручено трансформировать площадку в технопарк – Маундский центр передовых технологий*. Кроме того, Министерство энергетики оказывает финансовую поддержку Корпорации в части экономического развития региона путем предоставления грантов и встречного финансирования. DOE заключило договор с Корпорацией, по которому после завершения всех работ по очистке территории в ее ведение были переданы отдельные производственные участки Маунд Сайт. В свою очередь, Корпорация подписала акт об отказе от права проведения ремонтных работ, перемещения установок и реконструкции зданий и сооружений на площадке. Кроме того, в отношении каждого производственного участка были установлены особые требования к организации ведомственного контроля. На данный момент около 60 % территории уже передано Корпорации, а остальные 40 % – перейдут к ней в 2017 году. Власти Маймисбурга также получили во временное владение некоторые территории, например, участок OU4.

Сегодня на территории бывшего секретного объекта действует Маундский центр передовых технологий. Корпорация по развитию Маунд Сайт вложила около 40 млн долларов в модернизацию и ремонт зданий, озеленение территории, строительство дорог, а также модернизацию хозяйственно-бытовых и энергетических систем. Помещения в Маунд Сайт арендуют 15 компаний, занимающихся научными исследованиями и разработками в таких областях, как инновационные энергетические технологии, экологически чистые источники энергии, нанотехнологии, топливные материалы и контрольно-измерительные приборы, лазерная обработка, оптоэлектроника, обработка материалов, информационные технологии [198].

Результаты проведенных работ иллюстрирует рис. 1.139.



Рис. 1.139. Внешний вид площадки до и после проведения работ по очистке территории комплекса Маунд Сайт

* англ. Mound Advanced Technology Center.

§ 1.5. Комплексные работы на крупных промышленных площадках

Среди ряда зарубежных стран, рассмотренных в монографии (США, Великобритания, Франция, Канада), США обладает наиболее богатым опытом в сфере решения проблем, связанных с реабилитацией объектов ядерного наследия, накопившихся за более чем полувековую историю существования американского ядерного оружейного комплекса. В этой стране национальные программы реабилитации радиоактивно загрязненных территорий уже позволили добиться существенного прогресса и решить ряд чрезвычайно сложных задач в области восстановления качества окружающей среды, которые когда-то казались невыполнимыми, в том числе на крупных промышленных площадках, где работы приходится проводить одновременно по большому количеству объектов.

Ниже рассмотрены специфические аспекты проведения работ по реабилитации крупных промышленных площадок в США. Прежде всего были проанализированы особенности построения процедуры принятия решений по отдельным объектам в пределах одной крупной площадки и определению степени приоритетности проведения работ по каждому объекту.

Кроме того, накопленный США опыт в сфере реабилитации и очистки радиационно и химически загрязненных площадок позволил Министерству энергетики США разработать обобщенный подход, благодаря которому на основании схожести характеристик разных площадок или же особенностей загрязнения окружающей среды на разных объектах в пределах одной площадки можно существенно упростить разработку соответствующих стратегий реабилитации (так называемый «шаблонный» подход).

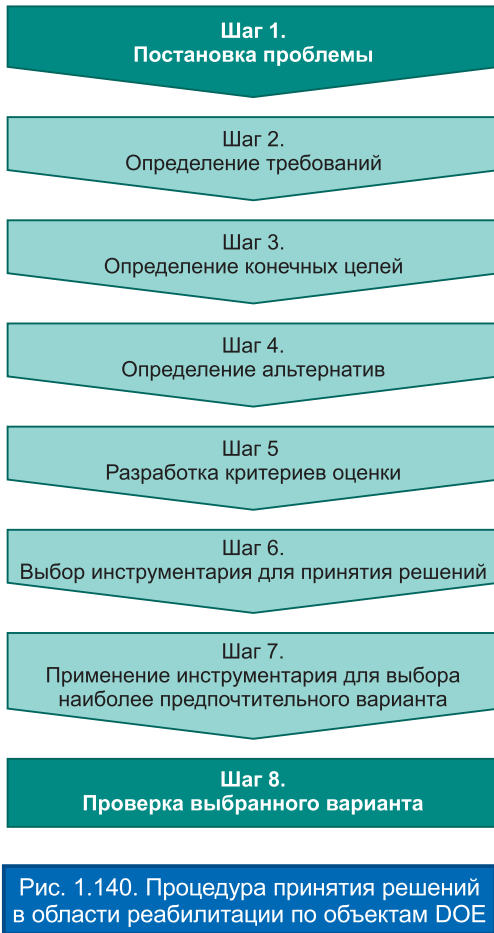
Еще одно важное направление работ DOE касающееся в том числе и проведения работ на крупных площадках, – это целый комплекс исследований, выполненных Междугосударственным советом по технологиям и вопросам регулирования (Interstate Technology & Regulatory Council), результаты которых были положены в основу стратегии оптимизации процесса реабилитации (принятие решений по реабилитации на основе «концептуальной модели площадки»).

1.5.1. Процедура принятия решений по проектам реабилитации и очистки крупных промышленных площадок

При выработке общей процедуры принятия решений по планированию реабилитационных мероприятий на объектах ядерного наследия США придерживаются подхода, описанного в законе CERCLA (см. § 1.2 и § 1.4), согласно которому процедура составления перечня мероприятий по реабилитации разбита на несколько этапов и завершается утверждением протокола о принятии решения (ROD)* по конкретной площадке в целом либо по отдельным ее участкам.

В целом процедура принятия решений DOE состоит из восьми основных шагов (рис. 1.140), первый из которых заключается в описании сущности проблемы. После чего определяются требования, которым должно соответствовать любое принимаемое решение. Как только такие требования установлены, переходят к третьему этапу – уста-

* англ. Record of Decision.



навливают цели или задачи, которым должно соответствовать каждое принятое решение. Они позволят сопоставить между собой различные решения и выбрать наиболее оптимальные.

На четвертом этапе определяют перечень всех возможных альтернативных решений. Как правило, на этом этапе происходит коллективное обсуждение различных вариантов с участием всех заинтересованных сторон.

На следующем этапе на основе задач реабилитации разрабатывают критерии оценки. Для сравнения различных альтернативных решений по перечню разработанных критериев могут использоваться специальные программные средства, позволяющие выбрать наиболее предпочтительное или оптимальное решение по реабилитации. При этом зачастую анализ чувствительности может существенно упростить поиск подходящей альтернативы в том случае, если по какому-либо из рассматриваемых вариантов не хватает данных или критерии оценки не позволяют однозначно установить наиболее предпочтительный вариант.

На заключительном этапе процесса принятия решений необходимо получить подтверждение того, действительно ли выбранное решение позволяет реализовать все задачи и устранить все проблемы, выявленные на первом этапе [199].

Именно так выглядит процесс принятия решений по реабилитации площадок в теории.

Рассмотрим, каким же образом этот подход применяется на практике, и какова специфика данного процесса, в том случае, если решения приходится принимать по крупным площадкам ядерного наследия, включающим множество объектов. Примером такой площадки является территория Окриджской резервации. В целом в основу стратегии по очистке Окриджской резервации легли соображения относительно стока поверхностных вод, так как на территории резервации расположено целых пять водосборных бассейнов. Именно этой особенности площадки было решено уделить основное внимание, учитывая, что миграция загрязняющих веществ происходит преимущественно с поверхностным стоком, а неглубоко залегающие грунтовые воды обычно разгружаются в ближайшие водные объекты.

Река Клинч – основной гидрографический объект резервации, служащий естественной границей площадки, принимает большую часть загрязняющих веществ, по-

ступающих из различных источников со всей ее территории. Кроме того, на площадке имеется еще три крупных пункта разгрузки грунтовых вод – это небольшие реки Уайт Оук Крик (ниже по течению от ОНЛ, Бэар Крик (ниже по течению от Центра безопасности (Y-12)) и Поплар Крик (вблизи ТПВТ). Таким образом, риск-ориентированный подход, применяемый в рамках стратегии по реабилитации Окриджской резервации, в первую очередь нацелен на устранение тех источников выброса загрязняющих веществ, которые вносят наибольший вклад в величину совокупного риска, обуславливаемого загрязнением площадки. Применение концепции «водосбросных бассейнов» позволило выявить наиболее опасные источники загрязнения и на этом основании определить степень приоритетности проведения работ по тому или иному участку [200].

Для дальнейшей проработки стратегии очистки была разработана специальная система приоритизации, призванная упростить процедуру принятия решений.

В целом основные приоритеты были расставлены следующим образом:

- 1) свести к минимуму влияние факторов, представляющих непосредственную опасность для человека и окружающей среды как на самой площадке, так и за ее пределами;
- 2) свести к минимуму миграцию загрязняющих веществ за пределы площадки;
- 3) реабилитировать источники загрязнения поверхностных и грунтовых вод;
- 4) удалить оставшееся на площадке загрязнение;
- 5) ликвидировать неиспользуемые здания.

Хотя стремление к снижению рисков и является наиболее существенным фактором, влияющим на принятие решений по реабилитации, не стоит забывать и о финансовых аспектах. На завершение всех работ по реабилитации выделяется определенная конечная сумма денег. При этом на поддержание инфраструктуры могут расходоваться значительные средства. Так, в Ок-Ридже на оплату коммунальных услуг, охрану, обеспечение пожарной безопасности, а также техническое обслуживание ежегодно уходит около 60 млн долларов. Сокращение затрат на поддержание инфраструктуры позволяет перенаправить сэкономленные средства на ускоренное выполнение работ по снижению рисков. Таким образом, при разработке стратегии реабилитации следует учитывать два взаимосвязанных фактора – риски и затраты на поддержание инфраструктуры.

Следовательно, для ускоренного снижения рисков нужно уменьшить общие затраты на инфраструктуру, а сделать это можно за счет ликвидации неиспользуемых зданий, установок и сооружений, на поддержание которых эти средства расходуются. Подобная интеграция работ по реабилитации и выводу из эксплуатации, приводящих к снижению рисков, чрезвычайно важна. Описанная стратегия реинвестирования наглядно представлена на рис. 1.141.

В процессе принятия решений следует учитывать и другие немаловажные факторы, такие как логика исполнения работ и эффективное использование ресурсов. Так, под логикой исполнения работ понимается наиболее оптимальная логическая последовательность выполнения различных мероприятий по выводу из эксплуатации, реабилитации и очистке загрязненных территорий. Например, перед установкой покрытия на полигоне захоронения все вспомогательные установки на данном участке целесообразно ликвидировать.



Рис. 1.141. Стратегия реинвестирования

Выбор оптимальной логики исполнения работ также способствует более эффективному использованию имеющихся ресурсов, что позволит снизить затраты. Примером эффективного использования ресурсов является объединение работ по сносу нескольких зданий, располагающихся на одном участке, в рамках одного проекта даже в том случае, если эти здания и сооружения различаются по степени приоритетности. В этом случае общие затраты на проведение работ в рамках единого контракта будут ниже, чем при выполнении всех работ по отдельным контрактам.

В течение нескольких лет американские специалисты кропотливо собирали и анализировали данные (архивные записи, результаты характеризации площадки в ходе полевых исследований, результаты оценки распределения основных загрязняющих веществ в компонентах окружающей среды, сведения о гидрогеологических и гидрологических особенностях площадки, плотности и распределении населения, проживающего в данном регионе), необходимые для присвоения индекса приоритетности отдельным участкам Окриджской резервации, с помощью которых можно определить степень неотложности проведения работ по реабилитации на том или ином участке.

Результаты исследования позволили сделать вывод о том, что наибольшую опасность для населения, персонала и окружающей среды на территории Окриджской резервации представляют выбросы с участка Мэлтон Вэлли.

В табл. 1.62 (стр. 298–300) приведен итоговый перечень приоритизации объектов Окриджской резервации, сформированный на основании метода риск-ориентированной приоритизации экологических проблем, анализа практических соображений относительно оптимальной логики исполнения работ, эффективного использования ресурсов и сокращения затрат на поддержание инфраструктуры (приоритеты 5–13).

Мероприятия по обращению с хранящимися на площадке историческими РАО были интегрированы в план проведения работ по ТПВТ и Мэлтон Вэлли ввиду того, что их захоронению должна предшествовать ликвидация зданий и сооружений на территории ТПВТ и установка покрытия на полигонах Мэлтон Вэлли. Все остальные исторические отходы, хранящиеся на территории ОНЛ и Y-12, подлежали захоронению одновременно с проведением работ на соответствующих участках. Такой план имел свои преимущества, так как позволял сэкономить средства за счет эффекта масштаба и сокращения затрат на хранение РАО.

Последовательность исполнения работ была определена на основании системы приоритизации, предусматривающей первоочередную реализацию проектов и мероприятий по объектам, обуславливающим наиболее высокий уровень риска для населения, персонала и окружающей среды (приоритеты 1–3). Вторым по важности аспектом было определено снижение затрат на поддержание инфраструктуры. Так, закрытие ТПВТ (приоритет 4) позволяло сэкономить средства и перенаправить их на ускоренное выполнение работ по остальным объектам, включенным в программу (приоритеты 5–13).

Табл. 1.62. Приоритизация объектов в рамках программы по очистке территории Окриджской резервации

Индекс приоритетности	Участок	Обоснование индекса приоритетности
1	Мэлтон Вэлли	<p>На территории Мэлтон Вэлли расположены наиболее мощные источники миграции загрязняющих веществ за границы площадки. Самым проблемным объектом была признана Новая гидроразрывная установка, поэтому в первую очередь работы были выполнены именно на этом объекте (закупорка, ликвидация, дезактивация шахт и вывод из эксплуатации вспомогательных установок).</p> <p>С 1960-х по 1980-е гг. процесс глубинной закачки РАО использовался для захоронения ЖРО и радиоактивного шлама. В скважины закачивалась смесь РАО и цементного раствора с добавлением различных присадок. Сначала были сооружены две опытные скважины закачки для наблюдения за поведением закачиваемого раствора в зоне закачки внутри коренных пород. Для этого в опытные скважины были закачаны растворы с незначительным содержанием радионуклидов, чтобы затем с помощью гамма-детектора следить за изменением положения цементного тела внутри коренных пород.</p> <p>Третья скважина Старой гидроразрывной установки и четвертая скважина Новой гидроразрывной установки были предназначены для промышленной закачки отходов. Всего в искусственно созданные разрывные нарушения в пластах глинистых сланцев на глубину от 91 до 300 м было закачено около 18·10⁶ м цементного раствора ЖРО суммарной активностью порядка 43·10¹⁵ Бк. При этом наиболее интенсивно закачка осуществлялась на глубины свыше 238 м. В ходе закачки уровни загрязнения в наблюдательных скважинах составляли порядка 3·10⁶ Бк/л (бета-излучатели). Наблюдательные скважины служили потенциальными источниками миграции загрязненных жидкостей, выделяющихся из цементного тела закачанных растворов ЖРО, а затем из глубокозалегающих грунтовых вод в неглубоко залегающие. В целях предотвращения миграции загрязняющих веществ в 2001 году были инициированы работы по закупорке и ликвидации 111 скважин (4 скважин закачки и 107 наблюдательных скважин).</p>
2	Территории за границами площадки	Частная собственность с открытым доступом, угроза для персонала.

Индекс приоритетности	Участок	Обоснование индекса приоритетности
	Объекты Бетел Вэлли и верховья реки Ист Форк Поплар Крик, дающие повышенные уровни риска	<p>Была установлена необходимость проведения дополнительных исследований по характеристике подземных вод в целях сбора дополнительных сведений, позволивших разработать перечень мероприятий по очистке данных участков, в том числе:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) каптаж глубоко залегающих грунтовых вод; 2) биодegradация на месте в целях ликвидации ареала загрязнения летучими органическими соединениями; 3) мониторинг грунтовых вод на западе Бетл Вэлли; 4) экскавация почвы на участках, по которым имеются сведения об утечках в целях снижения поступления загрязняющих веществ в грунтовые воды.
	ТПВТ	<p>Все здания на территории ТПВТ подлежат ликвидации, так как их плачевное техническое состояние обуславливает повышенные уровни риска для персонала, осуществляющего техническое обслуживание установок и сооружений ТПВТ. Средства, которые до этого уходили на техническое обслуживание, были перенаправлены на финансирование работ по реабилитации. Помимо загрязненных установок и зданий существенным источником миграции загрязняющих веществ в грунтовые и поверхностные воды являлась почва. Тем не менее было решено, что к работам по рекультивации целесообразно приступить только после ликвидации всех зданий и сооружений.</p>
5	ОНЛ здание 3026	<p>Здание находится в плачевном состоянии, являясь источником повышенной опасности, и требует регулярного вложения значительных средств в его техническое обслуживание.</p>
6	Экспериментальный ядерный реактор на расплавах солей	<p>Источник повышенной опасности и требует регулярного вложения значительных средств в его технического обслуживания.</p>
7	Долина реки Беар Крик	<p>Превалирующим загрязнителем долины реки Беар Крик является уран. В прошлом до 1970 года на этом участке захоронивали как технологические, так и нетехнологические отходы. Отходы размещали либо на открытых площадках, либо сбрасывали в необлицованные траншеи, а затем поджигали. Также в Беар Крик осуществляли сортировку списанного оборудования, что привело к загрязнению почвы. Очистка территории пункта захоронения Беар Крик (участок площадью $80 \cdot 10^3 \text{ м}^2$) была завершена в 2003 году.</p> <p>Всего на поверхность было поднято 61 490 м РАО, из них 46 690 м – захоронено в централизованном пункте захоронения исторических РАО на территории Окриджской резервации и 12 800 м РАО с не столь высокой удельной активностью были захоронены на месте, а сам полигон Беар Крик был засыпан. Таким образом, благодаря выполненным работам удалось остановить миграцию загрязняющих веществ в поверхностные и грунтовые воды. Мероприятия были реализованы в три этапа: (1) разработка проекта; (2) сооружение гидравлического барьера для снижения поступления загрязняющих веществ в реку, осушение территории, экскавация загрязненной почвы и ее захоронение за пределами площадки; (3) извлечение и перезахоронение РАО.</p>

Индекс приоритетности	Участок	Обоснование индекса приоритетности
8	Бетел Вэлли	Интеграция программы реабилитации территории с планами по модернизации ОНЛ. Загрязненная почва представляла риск для персонала. Однако к работам по рекультивации территории было решено приступить только после ликвидации всех неиспользуемых зданий и сооружений.
	Верховья реки Ист Форк Поплар Крик	Интеграция программы реабилитации территории с планами по модернизации Центра безопасности. Работы по реабилитации водосборного бассейна реки Ист Форк Поплар Крик были выполнены последовательно в два этапа. На первом этапе была произведена очистка почв, донных отложений и зон разгрузки грунтовых вод от соединений ртути в целях предотвращения миграции ртути в поверхностные воды. Объектами реабилитационных мероприятий второго этапа стали загрязненные почвы, металлолом и ядерные материалы на территории Центра Безопасности Y-12.
10	Грунтовые воды	Было решено, что к очистке грунтовых вод целесообразно приступить только после ликвидации всех источников загрязнения.
11	Горный хребет Честнат	Загрязнение территории, источники загрязнения установлены.
12	Склад металлолома Уайт Уинг	Загрязнение территории, источники загрязнения установлены.
13	Реки Клинч и Поплар Крик	Объекты, в которые загрязняющие вещества поступают со всей территории резервации.

Таким образом, участок Мэлтон Вэлли был признан наиболее приоритетным с точки зрения сроков проведения работ, где требовалась первоочередная реализация мероприятий по реабилитации и очистке территории не только в виду наличия гидро-разрывных установок, но и целого ряда других объектов ядерного наследия, обуславливающих повышенные уровни риска. DOE и его основной субподрядчик по данному участку, компания Bechtel Jacobs Company разделили всю совокупностью предстоявших работ на 14 отдельных проектов (табл. 1.63; рис. 1.142, стр. 302) [201–203].

Именно так выглядит процесс принятия решений по реабилитации крупных площадок на практике. Учитывая богатый опыт DOE в области реабилитации объектов ядерного наследия, Министерство проводит непрерывную работу, направленную на оптимизацию и повышение эффективности процесса принятия решений. С начала 2000-х гг. Междугосударственный совет по технологиям и нормативным актам реализует проект по оптимизации процесса реабилитации загрязненных территорий (RPO*).

* англ. Remediation Process Optimisation.

Табл. 1.63. Проекты, включенные в программу по реабилитации Мэлтон Вэлли

Проект	Меры по реабилитации	Комментарии
Пункты захоронения траншейного типа	Гидрологическая изоляция	Установка покрытия на котлованах 2, 3 и 4, а также на траншеях 5, 6 и 7
SWSA*4	Гидрологическая изоляция	Экспкавация пруда промежуточной выдержки, установка покрытия на SWSA4, дезактивация и демонтаж вспомогательных сооружений, закупорка и ликвидация мониторинговых скважин
SWSA5	Гидрологическая изоляция	Установка покрытия на SWSA5 и на площадке Старой гидроразрывной установки, дезактивация и демонтаж вспомогательных сооружений, закупорка и ликвидация мониторинговых скважин
SWSA6	Гидрологическая изоляция	Установка покрытия на SWSA6, дезактивация и демонтаж вспомогательных сооружений, закупорка и ликвидация мониторинговых скважин
Траншеи 5 и 7, резервуары для хранения топлива реактора HRE	Цементация на месте	Траншеи 5 и 7
Почвы и донные отложения	Экспкавация/удаление	Ликвидация бассейнов выдержки реакторов HRE и HFIR, экспериментальной установки для проведения термоядерных исследований, лизиметра EPICOR-II, шести участков с загрязнением почвы и 25 очагов загрязнения. Проведение контрольного исследования
Новая гидроразрывная установка	Дезактивация и вывод из эксплуатации	Дезактивация и вывод из эксплуатации поверхностных сооружений Новой гидроразрывной установки, башенного хранилища
Реактор HRE	Дезактивация и вывод из эксплуатации	Дезактивация и вывод из эксплуатации 11 установок реактора HRE, двух насосных станций и установки для переупаковки отходов
Зона хранения оборудования 7841	Захоронение загрязненных резервуаров, транспортных средств, оборудования и т. п.	875 предметов подлежат характеристике и захоронению в пункте захоронения EMWMP, опытном полигоне в Неваде или пункте захоронения Envicore (штат Юта)
Скважины гидроразрывной установки (закупорка и ликвидация)	Заливка цементным раствором наблюдательных скважин и скважин закачки	4 скважины закачки и 107 наблюдательных скважин
Резервуары T-1 и T-2 резервуары реактора HFIR	Удаление шлама и заливка емкостей цементным раствором	Передача 11 000 л шлама из емкостей T-1 и T-2 на установку выпаривания НАО в ОНЛ и заливка резервуаров
Пункт захоронения траншейного типа с ТРУ РАО	Извлечение захороненных контейнеров с ТРУ РАО, требующих дистанционного обращения	Из 22 траншей удалено 204 контейнера, 12 стальных бочек, 15 м отходов

* SWSA (Solid Waste Storage Area) – зона хранения ТПО.

Проект	Меры по реабилитации	Комментарии
Поверхностные сооружения Старой гидроразрывной установки	Снос до основания с последующей установкой покрытия	Дезактивация и вывод из эксплуатации здания 7852, котлована Т-4, насосной станции и вспомогательных зданий и сооружений
Небольшие вспомогательные сооружения в SWSA4	Снос до основания с последующей установкой покрытия	Дезактивация и вывод из эксплуатации вспомогательных установок, зданий и сооружений



Рис. 1.142. Вид сверху на основные объекты Мэлтон Вэлли

В ближайшем будущем государственные и частные компании продолжат тратить миллиарды долларов на характеризацию и оценку загрязненных территорий, а также на разработку, проектирование, сооружение, эксплуатацию, техническое обслуживание и мониторинг систем по очистке загрязненных компонентов окружающей среды.

Результаты обобщения многолетнего опыта в этой области свидетельствуют о том, что наличие значительных неопределенностей, в особенности в случае реабилитации больших и сложных площадок со множеством источников загрязнения, требует применения более гибких и итеративных подходов, способствующих минимизации неопределенностей, повышению эффективности работ и снижению затрат. Именно наличие неопределенностей, зачастую приводящих к срыву установленных сроков окончания работ, сыграло роль основного стимула при разработке особых механизмов, которые, с одной стороны, позволили бы систематически пересматривать изначально установленные цели проведения работ, а с другой – непрерывно внедрять все новые и более совершенные методики и технологии [204].

На рис. 1.143 отражена зависимость «время – усилия» для стандартного проекта по очистке загрязненных промышленных площадок.

Так, на начальных этапах выполнения работ по реабилитации большая часть усилий направлена на характеризацию площадки и реабилитацию источников загрязнения, и лишь незначительное внимание уделяется мониторингу. При этом на более поздних этапах осуществления проекта все больше усилий направлено на проведение мониторинга, а также поддержание функционирования и техническое обслуживание систем очистки.

Прерывистая линия на графике – это время, по истечении которого площадка будет приведена в конечное состояние и все работы по реабилитации будут завершены. Следует отметить, что точно определить эти сроки для большинства проектов невозможно.

На рис.1.144 показано, каким образом применение подхода RPO позволяет экономить ресурсы и время в ходе реализации подобных проектов.

До недавнего времени специалисты, проводящие исследования в рамках проекта RPO стремились ответить на вопрос «каким образом» можно добиться наиболее эффективной организации мероприятия по очистке и реабилитации территорий. Иными словами, основное внимание уделялось совершенствованию технологий. Однако сейчас в центре внимания оказалась разработка подходов для построения «концептуальной модели площадки» (CSM*), которая позволит ответить на вопрос «зачем» проводить те или иные мероприятия по очистке.

Концептуальная модель площадки (КМП) – это не что иное, как итеративное «живое» описание площадки, в котором обобщена и систематизирована вся имеющаяся информация и которое помогает команде экспертов, работающих над проектом по ее реабилитации, наглядно представить и осмыслить имеющиеся сведения. Таким образом, в случае осуществления сложных проектов подобная визуализация и обобщение позволяют добиться многократного снижения затрат финансовых ресурсов и времени на проведение необходимых работ по очистке.

* англ. Conceptual Site Model.

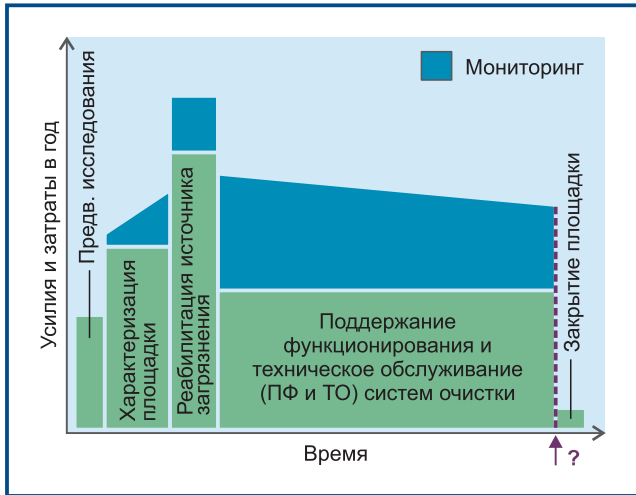


Рис. 1.143. Стандартный подход к осуществлению проектов по реабилитации (зависимость ресурсы / время)

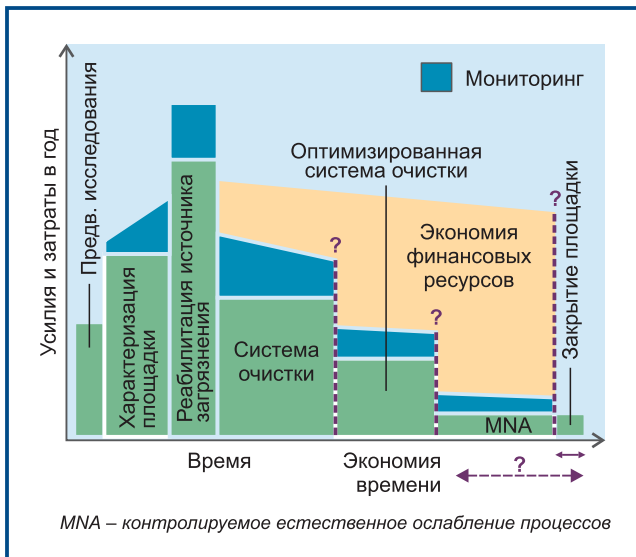


Рис. 1.144. Оптимизированный RPO подход к осуществлению проектов по реабилитации (зависимость ресурсы / время)

1.5.2. Концептуальная модель площадки как основа принятия решений по реабилитации

В последние годы КМП активно используется американскими специалистами при разработке проектов, осуществляемых в рамках Закона о Суперфонде и направленных на очистку территорий с опасными отходами и материалами, и позволяет упростить процедуру принятия решений на всех этапах – от проведения исследований до выполнения конкретных работ по очистке. При этом и сама модель как основной инструмент планирования и управления непрерывно дорабатывается, развивается и оптимизируется на всем протяжении проекта. В целом возможность для предоставления доступа ко всему объему имеющейся информации и легкость ее интерпретации различными специалистами в рамках проекта по реабилитации – важнейшая составляющая правильного построения процесса принятия решений, начиная от этапа планирования мероприятий и заканчивая закрытием площадки.

По сути КМП – это емкое описание площадки, составленное на основе совокупности данных, представленных в текстовой и графической формах, отражающих как уже известную информацию о площадке, так и выдвинутые в рамках проекта гипотезы. Если работы на площадке были начаты сравнительно давно, то за годы реализации проекта накапливается большое количество разнообразной информации в электронном и печатном виде, представленной в отчетах, докладах, статьях, базах данных и т. п. При построении и использовании КМП вся имеющаяся информация систематизируется и обобщается в единую базу данных, что увеличивает полезность исторических и архивных сведений, а также позволяет сосредоточить усилия на поиске недостающей информации и минимизировать основные неопределенности.

Благодаря КМП новые сведения, полученные в ходе характеристики площадки и выполнения работ по очистке территории, можно легко интегрировать в имеющуюся базу данных и эффективно использовать при принятии решений по ключевым составляющим того или иного проекта, например, при оценке совокупного риска, выборе мероприятий по очистке и реабилитации объекта, методикам проведения таких мероприятий, а также при определении возможностей для повторного использования или репрофилирования площадки.

Кроме того, КМП играет важную роль в построении открытого диалога с заинтересованными сторонами и согласовании перечня выбранных мероприятий по реабилитации. Обеспечивая эффективную и оперативную оценку имеющихся данных, элементы КМП образуют информационную платформу для выбора оптимальных решений, благодаря которым, например, можно уменьшить объем полевых исследований по характеристике площадки и исключить необходимость проведения работ по повторной характеристике площадки на более поздних этапах жизненного цикла проекта, а также оптимизировать элементы методик выполнения работ по реабилитации.

Таким образом, всеобъемлющая КМП позволяет, к примеру, рассмотреть в совокупности имеющиеся данные по химическому анализу и сведения по геологическим, гидрогеологическим и иным особенностям площадки, что повышает продуктивность работы специалистов по разработке решений, направленных на обеспечение безопасности, эффективное распределение ресурсов и уменьшение площади территорий, требующих проведения работ по очистке и реабилитации.

КМП жизненного цикла

КМП жизненного цикла проекта отражает последовательное продвижение в реализации проекта по очистке территорий и восстановлению качества окружающей среды как в контексте использования уже имеющейся информации, так и получения новых сведений. При этом цели использования КМП постепенно меняются – от характеристики площадки к оценке и выбору технологий реабилитации и их дальнейшей оптимизации. По мере реализации проекта характер принимаемых решений и потребности в той или иной информации и в других ресурсах также меняются в зависимости от конкретного этапа осуществления работ и связанных с ним технических требований.

Всего различают шесть основных этапов жизненного цикла КМП. Каждый новый этап отражает эволюцию КМП в соответствии с новыми знаниями о площадке, а также задачами, решаемыми на том или ином этапе проекта. На ранних этапах на основе текстовых файлов, рисунков, таблиц и электронных трехмерных моделей собирается исходная версия КМП. На более поздних этапах с увеличением объема информации и ее сложности появляется необходимость в использовании платформ визуализации, особых стратегий управления данными и интерактивных инструментальных программных средств, используемых для облегчения процесса принятия решений.

В табл. 1.64 представлено краткое описание шести этапов жизненного цикла КМП, ниже приведена более подробная информация по каждому этапу [205].

Табл. 1. 64. Этапы жизненного цикла КМП

Этап выполнения работ по очистке площадки	Этап жизненного цикла КМП	Описание этапа жизненного цикла КМП	Этап согласно
Оценка площадки	Предварительная КМП	Стадия проекта, на которой имеется пакет документов, собранный на основании имеющихся данных и служащий отправной точкой для систематического планирования работ на дальнейших этапах.	предварительная оценка; инспектирование площадки; включение в Национальный приоритетный список (NPL*) или принятие решения об отсутствии необходимости в проведении работ по реабилитации/очистке (NFRAP**)
	Базовая КМП	Стадия проекта, на которой документально фиксируется согласие или несогласие заинтересованных сторон на проведение работ по очистке, выявляются имеющиеся неопределенности, устанавливается потребность в той или иной информации и ресурсах.	–

* англ. National Priorities List.

**англ. No Further Remedial Action Planned.

Этап выполнения работ по очистке площадки	Этап жизненного цикла КМП	Описание этапа жизненного цикла КМП	Этап согласно
Исследования на площадке и оценка альтернатив	КМП для стадии характеристики	Итеративное совершенствование КМП по мере появления все новой информации в ходе проведения исследований. КМП используется при принятии решения о выборе той или иной технологии и методики очистки/реабилитации.	исследование целесообразности выполнения работ и определение их объема; определение характера мероприятий – работы в режиме чрезвычайной ситуации/аварии; работы, требующие оперативного выполнения и работы, не требующие немедленного выполнения
Выбор конкретных мер	КМП для стадии разработки проекта	Итеративное совершенствование КМП в ходе разработки проекта конкретных мер по очистке/реабилитации. Используется как основа для разработки проекта мер и технической детализации мероприятий.	предлагаемый план действий; протокол о принятии решения*
Осуществление запланированных мероприятий	КМП для стадии реализации работ по реабилитации/очистке	Итеративное совершенствование КМП в ходе осуществления работ по очистке/реабилитации. Используется как вспомогательный инструмент в реализации и оптимизации работ по очистке/реабилитации, также включает документацию, свидетельствующую о достижении или не достижении установленных целей проведения работ	проект проведения работ по реабилитации / очистке; мероприятия по реабилитации/очистке
Сопровождение площадки после осуществления мероприятий по очистке	КМП для этапа после завершения работ по очистке	Всеобъемлющая информация о физических, химических, геологических и гидрогеологических особенностях площадки, на основании которой может быть принято решение о повторном использовании данных территорий; содержит документальные сведения о принятых мерах ведомственного контроля, размещенных на площадке отходах и т. п.	проведение работ; период эксплуатации и технического обслуживания систем очистки; долгосрочный мониторинг; оптимизация; мероприятия по устранению последствий загрязнения в долгосрочной перспективе
Завершение работ на площадке	–	–	Предварительный или итоговый отчеты о завершении работ на площадке и достигнутых результатах

* англ. Record of Decision.

Основные источники загрязнения	Основной механизм распространения ЗВ	Вторичные источники загрязнения	Вторичный механизм распространения ЗВ	Путь распространения ЗВ	Объект воздействия			
					Человек	Биота		
				Путь воздействия	Местные жители	Посетители площадки	Наземная	Водная
Бочки и резервуары	Выбросы пыли	Выбросы пыли и летучих ЗВ	Ветер	Пероральный	●			
					Ингаляционный	●		●
Пруды-отстойники	Проливы	Инфильтрация и просачивание	Почва	Трансэпидермальный	●	●	●	
				Пероральный	●		●	
	Инфильтрация и просачивание	Почва	Грунтовые воды	Трансэпидермальный	●	●	●	
				Пероральный	●		●	
Пруды-отстойники	Перелив через плотину	Ливневый сток	Поверхностные воды и осадок	Трансэпидермальный	●	●	●	●
				Ингаляционный				
				Трансэпидермальный	●		●	●
Сооружения, бочки, резервуары, пруды-отстойники				Трансэпидермальный		●	●	●

Рис. 1.145. Пример блок-схемы «Источник загрязнения – путь воздействия – объект воздействия»

На рис. 1.145 показан пример блок-схемы «Источник загрязнения – объект воздействия», которую принято использовать в качестве КМП в рамках анализа риска. Помимо архивных данных в состав КМП включают данные о потенциально опасных загрязняющих веществах как выявленных в ходе исследований, так и о тех, что могут быть потенциально обнаружены, месте нахождения возможных источников загрязнения, механизмах и времени выбросов загрязняющих веществ (как тех, что имели место в прошлом, так и тех, что потенциально могут возникнуть в будущем), объектах окружающей среды, которым был причинен ущерб в результате таких выбросов, данные о распространении загрязняющих веществ в окружающей среде, потенциальных путях их миграции, а также потенциальных объектах их воздействия.

С точки зрения средств визуализации, предварительная КМП может включать простые наброски, двухмерные (карты и поперечные разрезы) и трехмерные изображения. Уровень сложности КМП на этом этапе будет в первую очередь определяться объемом и видом имеющейся информации (сведения на бумажных или электронных носителях) (рис. 1.146).



Базовая КМП

По сути, базовая КМП является усовершенствованной более информативной версией предварительной КМП. Ее основная функция – помочь экспертам в выявлении недостающей информации для достижения ключевых задач проекта.

В базовой КМП:

- содержится документальное подтверждение того факта, что заинтересованным сторонам проекта удалось (или не удалось) достичь согласия по сведениям, касающимся выявленных условий на площадке;
- представлены гипотезы относительно имеющихся неопределенностей;
- определены потребности в получении новых сведений, а также планы по сбору информации;
- представлен перечень проблем, с которыми, возможно, придется столкнуться при проведении работ по реабилитации/очистке загрязненной территории.

КМП для стадии характеризации площадки

Данный вид КМП строится на основе базовой КМП и используется для систематизации и обобщения данных, собранных на этапе характеризации. Таким образом, КМП постепенно дорабатывается и развивается и при эффективном использовании

позволяет повысить уверенность заинтересованных сторон в применении правильного подхода к рассмотрению таких вопросов, как характер и уровень загрязнения, выявленные геологические и гидрогеологические особенности площадки, влияющие на перемещение загрязняющих веществ и т. п.

На этом этапе собранные данные систематизируют и относят к определенным элементам КМП, что, в свою очередь, помогает в оценке совокупного риска и выявлении непосредственных угроз для здоровья человека и окружающей среды.

Таким образом, в КМП на этапе характеристики интегрированы наиболее важные сведения по геологическим, гидрогеологическим и химическим параметрам площадки, которые могут быть использованы в целях обеспечения эффективности скрининга альтернативных вариантов проведения работ (рис. 1.147, стр. 310–311).

При сравнении рис. 1.146 и 1.148, видно, что на этапе характеристики КМП отражает более глубокое понимание процессов миграции загрязняющих веществ, характера и источников загрязнения.

Этап характеристики также предполагает переход от двухмерных моделей к трехмерным средствам визуализации. Именно на этом этапе особое внимание следует уделять использованию технологий фиксации данных в режиме «реального времени», обеспечивающих высокую производительность сбора данных, а значит и возможность оперативного редактирования и изменения данных, внесенных в КМП. Такая необходимость обусловлена тем, что до начала работ по характеристике, как правило, имеется лишь ограниченный набор данных о характере и уровне загрязнения, а также связанном с ним совокупным риском, и именно на этапе характеристики происходит стремительное развитие знаний о площадке. Таким образом, средства, используемые для информативного наполнения КМП, должны обеспечивать быстрое и эффективное документирование больших объемов данных и их приведение в заранее установленный формат.

Как только данные о характере, масштабах загрязнения и сопутствующих рисках получены, переходят к сбору сведений о физических и химических особенностях площадки, необходимых для выбора соответствующих технологий и разработки проекта реабилитации.

КМП на этапе разработки проекта

Элементы КМП используются на стадии разработки проекта в целях определения дополнительных информационных требований и получения сведений по выбранным методам очистки территории. Следует отметить, что данная КМП используется как для разработки пилотных, так и полномасштабных проектов по очистке площадок. Зачастую в целях оптимизации проекта работ данные о физических, геологических и гидрогеологических параметрах той или иной площадки требуют уточнения. Например, элементы КМП находят свое применение при планировании и анализе результатов испытаний по определению коэффициентов фильтрации или геохимических характеристик, проводимых в целях разработки стратегии по очистке компонентов окружающей среды «на месте». Геологические и гидрогеологические компоненты КМП на этом этапе также помогают в оценке различных факторов, которые необходимо учитывать при реализации проекта, таких как радиус воздействия, необходимость проведения испытаний методом меченых атомов, геохимические характеристики водоносного горизонта (рН, окислительно-восстановительный потенциал, количество растворенного кислорода и т. п.).

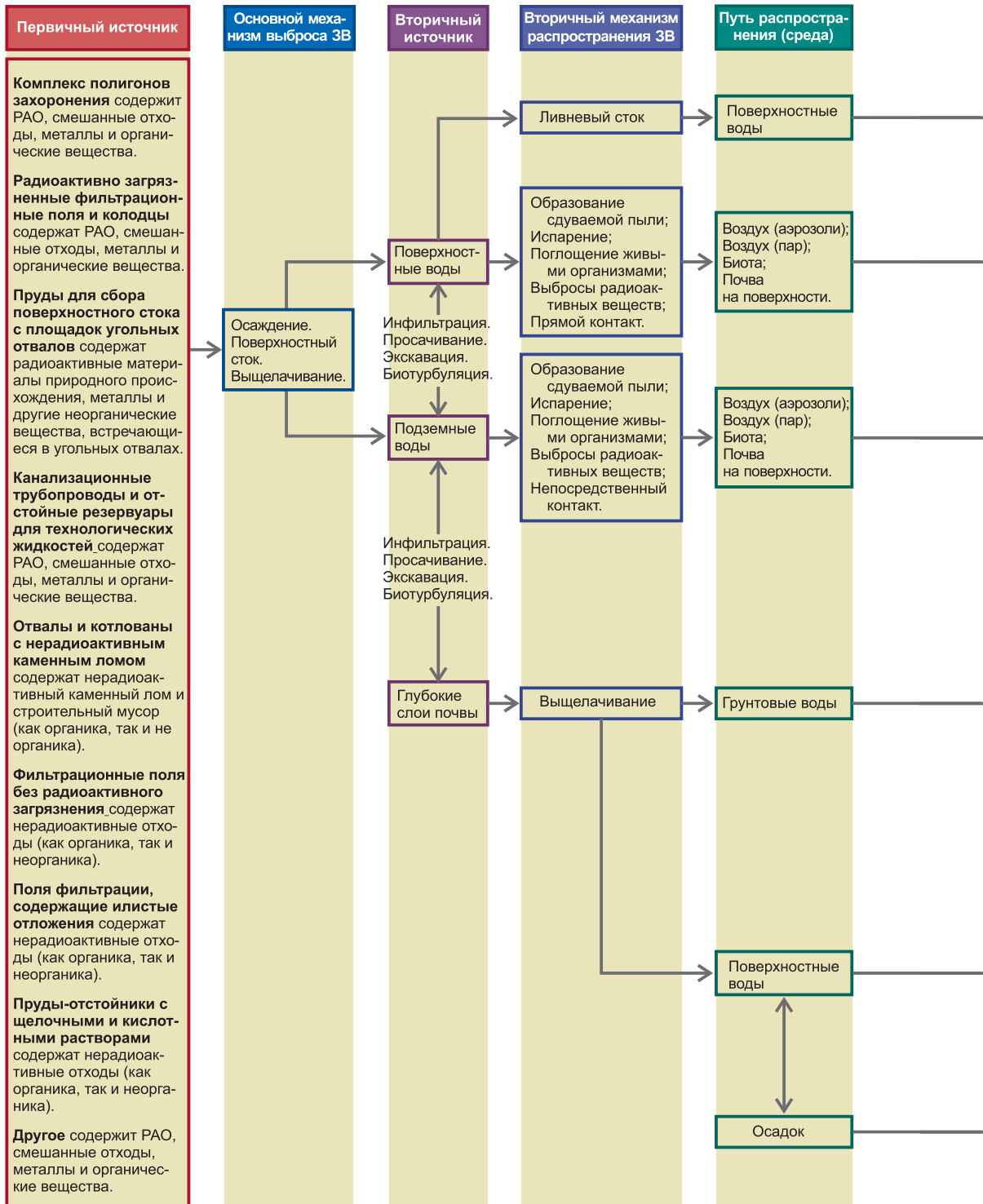
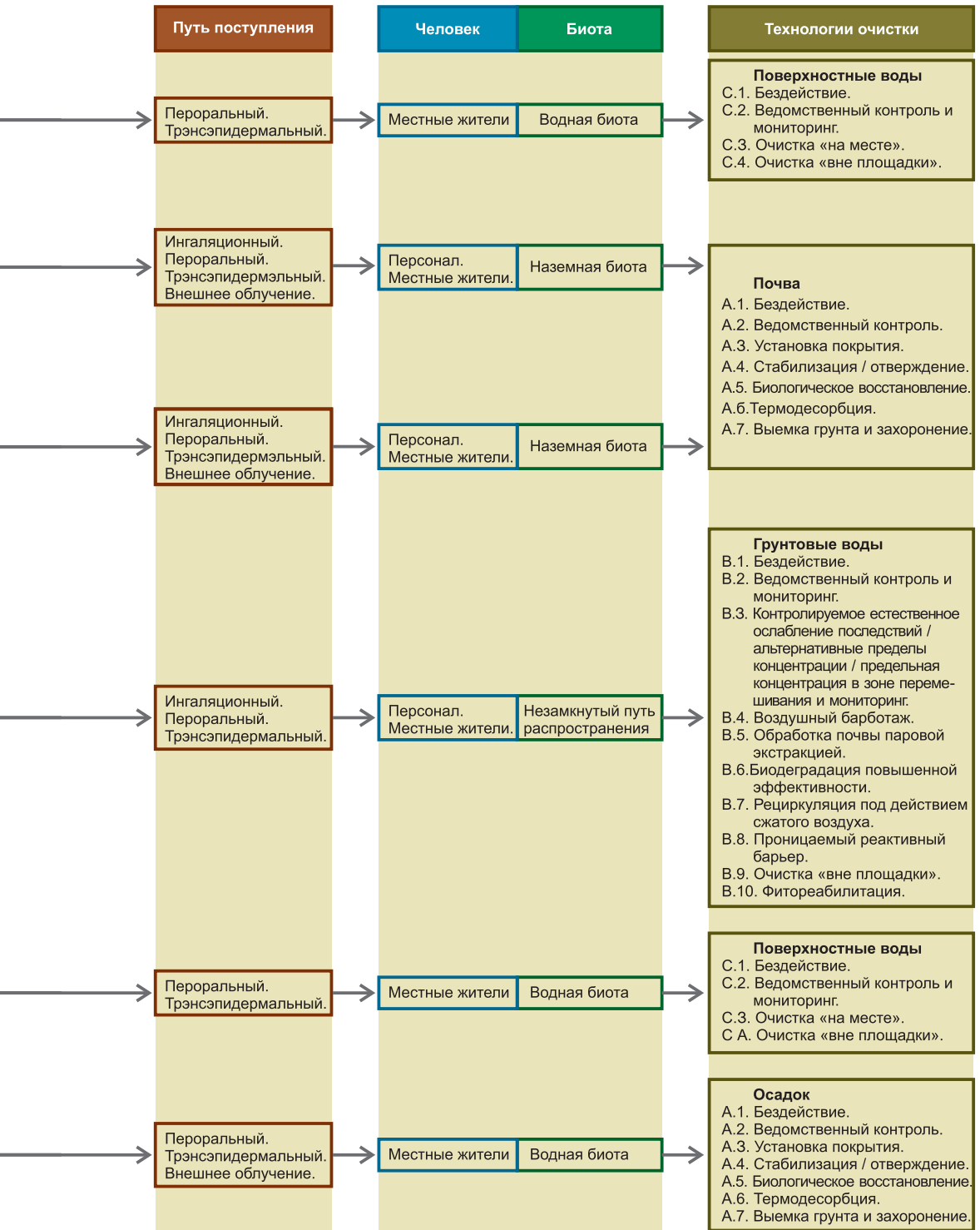
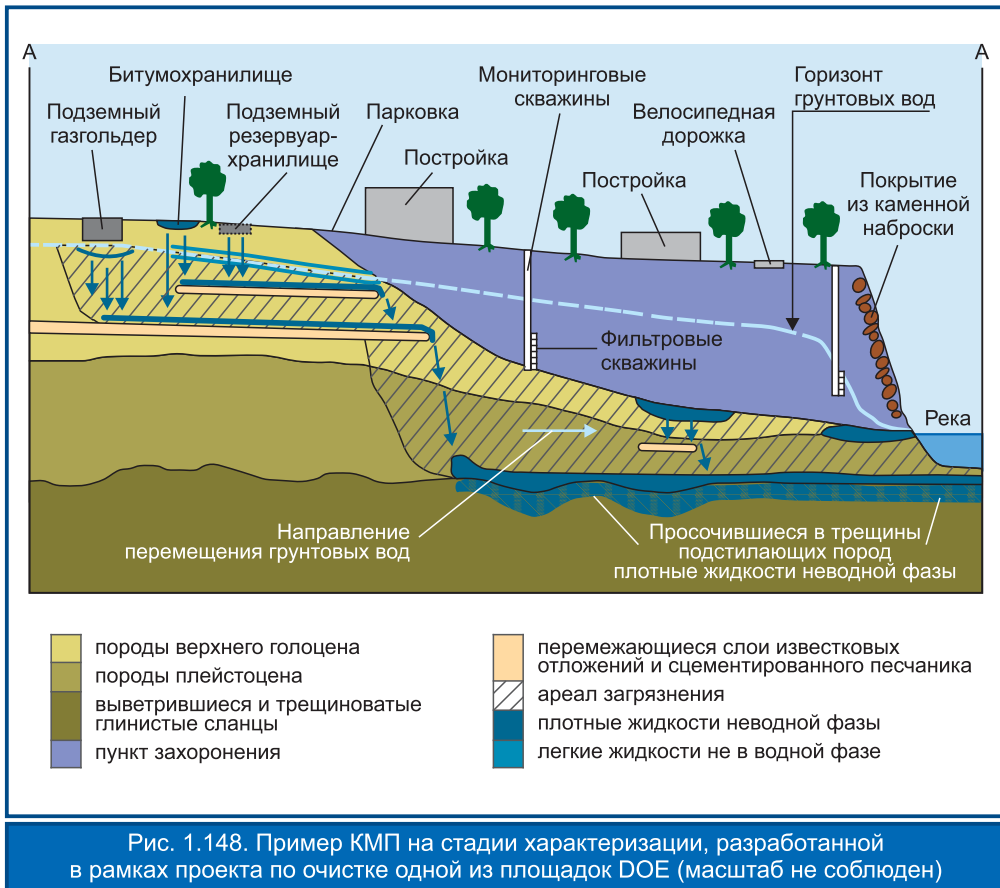


Рис. 1.147. Обобщенная КМП



для Саванна-Ривер

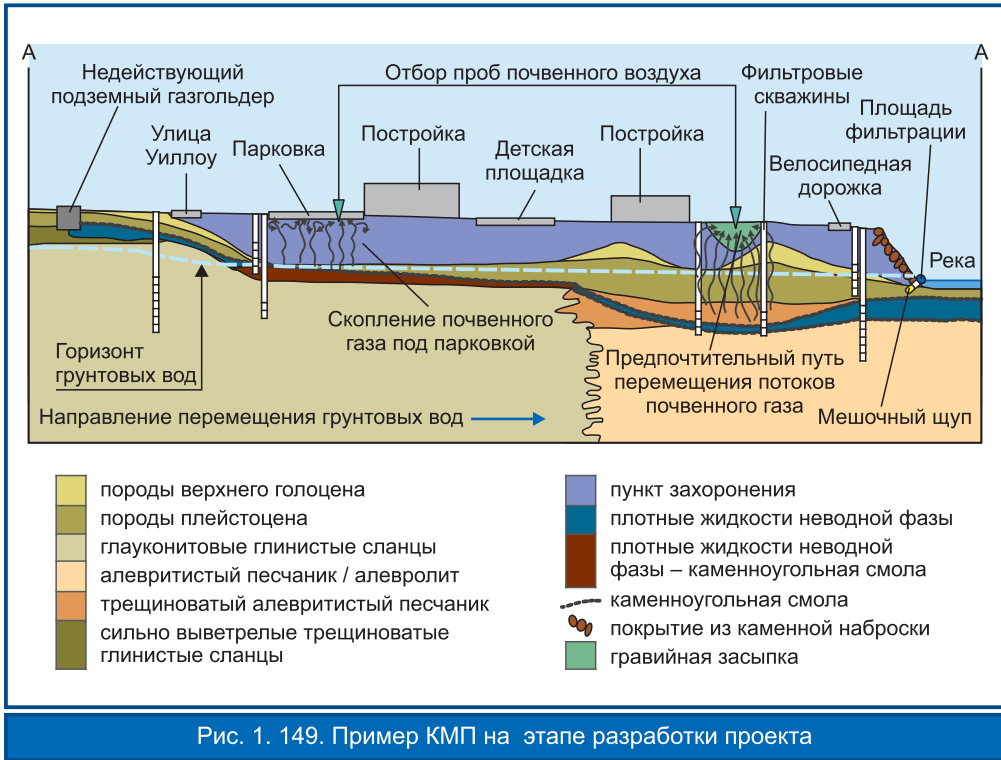


Кроме того, на этом этапе КМП может использоваться как основа для количественного определения искомых эксплуатационных показателей при установке систем очистки и в ходе их эксплуатации.

При этом для разработки такой КМП могут быть использованы те же системы управления данными и средства трехмерной визуализации, что и на предыдущем этапе. Элементы КМП, например, диапазон концентраций, расчетные данные по массе, месту нахождения и размерам источников загрязнения, помогают в определении исходных показателей для последующего сравнения, а также целевых показателей в краткосрочной, среднесрочной и долгосрочной перспективах, позволяющих дать количественную оценку результативности применения того или иного метода или системы очистки. Кроме того, группа экспертов, занимающихся разработкой проекта, может использовать элементы КМП при разработке сопроводительной документации к техническому проекту и договорам по проведению работ.

На рис. 1.149 показан пример наглядного представления элементов КМП на этапе разработки проекта.

По сравнению с предыдущей версией данная КМП отражает целый ряд новых сведений, например, данных по уровню воды, местам расположения скважин, почвен-



ному воздуху, выявленным путям миграции неводной жидкой фазы в трещиноватых породах и т. п.

КМП на этапе проведения работ по очистке/реабилитации территории

На данном этапе КМП может быть использована в качестве ориентира в целях:

- организации работ по экскавации грунта и документации данных;
- организации работ в рамках программы поэтапной реабилитации площадки;
- организации работ по реабилитации на отдельных участках площадки;
- оперативного реагирования на отклонения условий на площадке от первоначально установленных;
- оптимизации систем очистки.

Данный этап включает проведение работ по поддержанию работоспособности различных систем очистки, их техническому обслуживанию и проведению мониторинга. При этом все более и более информативно наполненная КМП позволяет поддерживать уверенность заинтересованных сторон в правильном выборе подхода к проведению работ, выявлять потенциальные проблемы, а также выступает в качестве основы для планирования работ в будущем.

Сама информационная платформа и средства управления данными на этом этапе мало отличаются от тех, что использовались на предыдущем этапе. При этом одной из основных задач КМП становится оценка показателей результативности проведенных

работ и сравнение полученных результатов с параметрами, заложенными при проектировании.

Так, например, данные об изменении концентраций загрязняющих веществ в мониторинговых скважинах могут указать на процессы истощения источника загрязнения или иные процессы, влияющие на эффективность применения выбранного метода очистки. Кроме того, КМП позволяет дать еще более точную оценку объему работ, предусмотренных проектом, и убедиться в том, что выбранные технологии и методы проведения работ оптимальны по уровню затрат и сложности используемых систем. Также могут быть выявлены отдельные участки площадки, для которых потребуется реализация дополнительных мер, например, зоны источника выброса или остаточного загрязнения и т. п. При этом, по мере реализации или оптимизации тех или иных мероприятий по очистке, корректировки в технические требования к соответствующей системе и рабочие протоколы вносятся в режиме реального времени, что позволяет адаптировать КМП к малейшим изменениям условий на площадке.

По мере реализации выбранной стратегии реабилитации и достижения поставленных задач элементы КМП могут быть использованы при разработке официальной документации – отчетов с описанием достигнутых результатов в ходе выполнения работ на площадке.

КМП после завершения работ по реабилитации

Даже после окончания всех работ по очистке и реабилитации КМП может найти применение в решении целого ряда вопросов:

- КМП может служить основой для использования статистических методов оценки эффективности и результативности проведенных мероприятий;
- на основании КМП можно описать и официально задокументировать наиболее эффективные методики выполнения мероприятий по очистке и реабилитации и их организации;
- КМП позволяет задокументировать данные о выполненных работах, в том числе информацию о месте их проведения, масштабах, объемах и активности отходов, оставленных на площадке, применяемых мерах ведомственного и технического контроля и т. п.;
- КМП позволяет облегчить планирование деятельности по повторному использованию площадки благодаря формированию детализированной базы знаний о геологических и гидрогеологических условиях на площадке, а также химических и физических характеристиках.

Таким образом, КМП является мощным универсальным инструментом, который может существенно облегчить процесс принятия решений на всем протяжении реализации проектов по реабилитации и очистке загрязненных территорий. Построение и развитие КМП на основе единой информационной платформы обеспечивает эффективную интеграцию новых сведений в уже имеющиеся базы данных. Кроме того, такие модели помогают заинтересованным сторонам выделить ключевые процессы и элементы проекта, важные с точки зрения принятия решений.

1.5.3. Использование КМП в проектах по очистке грунтовых вод и почвы на крупных площадках

КМП лежит в основе особого системного подхода, разработанного американскими специалистами для повышения эффективности принятия решений в процессе проведения работ по очистке грунтовых вод и почвы на крупных площадках, характеризующихся множественными неопределенностями. Подход основывается на выявлении «конечных состояний» площадки (итоговых показателей выполнения работ), коими могут быть установленные цели проведения реабилитации или сценарии, определенные на основе риск-ориентированного подхода и нормативных требований по защите здоровья человека и окружающей среды [207].

Проблема загрязнения почвы и грунтовых вод в США остается чрезвычайно актуальной и по сей день. Несмотря на успехи, достигнутые в этой области за последние 40 лет, задача восстановления качества грунтовых вод до уровня, при котором разрешено их неограниченное использование, во многих случаях невыполнима.

В 2013 году Командование сухопутных войск США по защите окружающей среды приняло участие в научном проекте Национального исследовательского совета по изучению проблем технического и организационного характера, возникающих при осуществлении подобных работ. Результаты исследования свидетельствуют о том, что в виду имеющихся технических ограничений многие площадки даже спустя 50–100 лет проведения работ по очистке не смогут быть выведены из-под регулирующего контроля. В отчете Совета приводится перечень из 1 260 таких площадок, характеризующихся комплексным загрязнением грунтовых вод.

Под сложностью загрязнения понимаются такие факторы, как наличие проблем, связанных с доступом к водоносным горизонтам, большая глубина и/или мощность загрязненных зон, большая площадь ареала загрязнения, неоднородность загрязнения, ограничивающая эффективность применения тех или иных методов очистки. Кроме того, сложность загрязнения может быть обусловлена наличием значительных неопределенностей, имеющих отношение как к пониманию того, каким образом распределены загрязняющие вещества в окружающей среде, и особенностей их поведения, так и ответной реакции подземной среды на применение тех или иных технологий очистки. Также к группе «сложных» площадок следует отнести те, где на проведение работ по очистке может уйти очень много времени (десятки лет).

Как уже говорилось ранее, нормативные требования к установлению целей очистки определены в двух законах – в Законе о сохранении и восстановлении ресурсов (RCRA) и Законе о действиях в отношении окружающей среды, компенсации и ответственности (закон о Суперфонде)*. В них также кратко описаны основные этапы работ по очистке почвы и грунтовых вод. Тем не менее, при реализации таких проектов обязательно учитываются особенности конкретной площадки и ее сложность. С другой стороны на каждом этапе работ следует предусмотреть механизмы адаптации проекта к условиям, меняющимся по мере осуществления мероприятий по очистке и мониторингу площадки, и формированию все более детализированного представления о ней (итеративный подход).

* см. § 1.2.

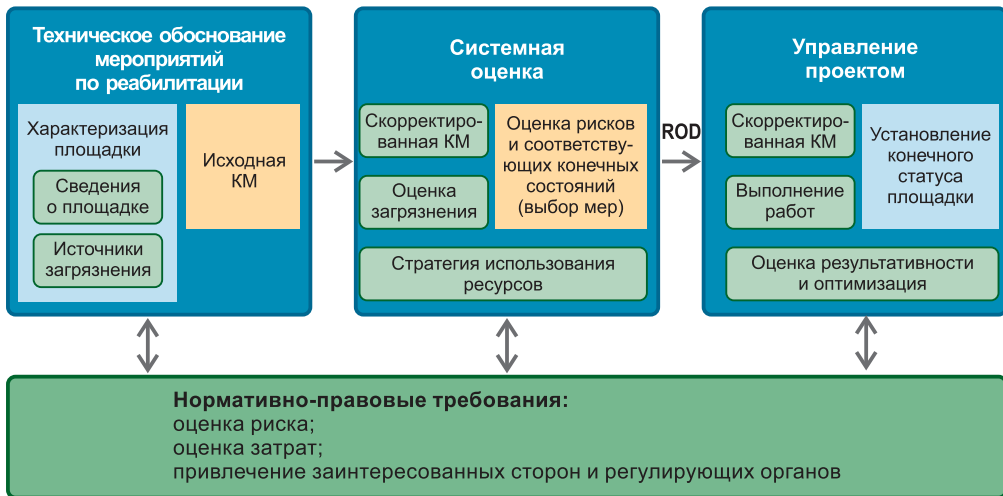


Рис. 1.150. Системный подход к определению конечных состояний после завершения работ по реабилитации площадки

Для этих целей американскими специалистами была разработана специальная схема, позволяющая облегчить процедуру принятия решений по реабилитации сложных площадок с загрязнением почвы и грунтовых вод. В ее основе лежит итеративно обновляемая и совершенствуемая КМП, описывающая связанную с этой площадкой «систему» явлений, событий и процессов, которые позволяют комплексно описать поведение загрязняющих веществ, показатели эффективности применения конкретных методов очистки и способов контроля миграции радиоактивных веществ.

Как показано на рис. 1.150, схема, состоящая из четырех взаимосвязанных элементов, включает три основных этапа: сбор информации, выбор конкретных мер по очистке площадки и осуществление работ по очистке площадки.

Техническое обоснование мероприятий по реабилитации

Отправной точкой любого проекта по реабилитации загрязненных территорий является характеристика площадки с целью получения необходимой информации о проблемах, которые могут возникнуть при проведении работ по очистке, и оценки обуславливаемых загрязнением рисков, что соответствует этапам предварительной оценки и характеристики исходного состояния площадки согласно процедуре CERCLA. Информация, полученная в ходе характеристики, используется для построения исходной КМП, в которой были бы отражены сведения об источниках загрязнения, пространственном распределении загрязняющих веществ в окружающей среде, гидрологических характеристиках площадки и возможном воздействии выявленного загрязнения на состояние окружающей среды и здоровье человека (рис. 1.151).

Кроме того, концептуальная модель должна описывать прогнозируемое поведение загрязняющих веществ, параметры их миграции, факторы, которые могут повлиять на поведение загрязняющих веществ, пути облучения и обусловленные загрязнением риски. При этом КМП используется как основа для разработки аналитической или численной моделей, обосновывающих выбор оптимального подхода к проведению работ на площадке.

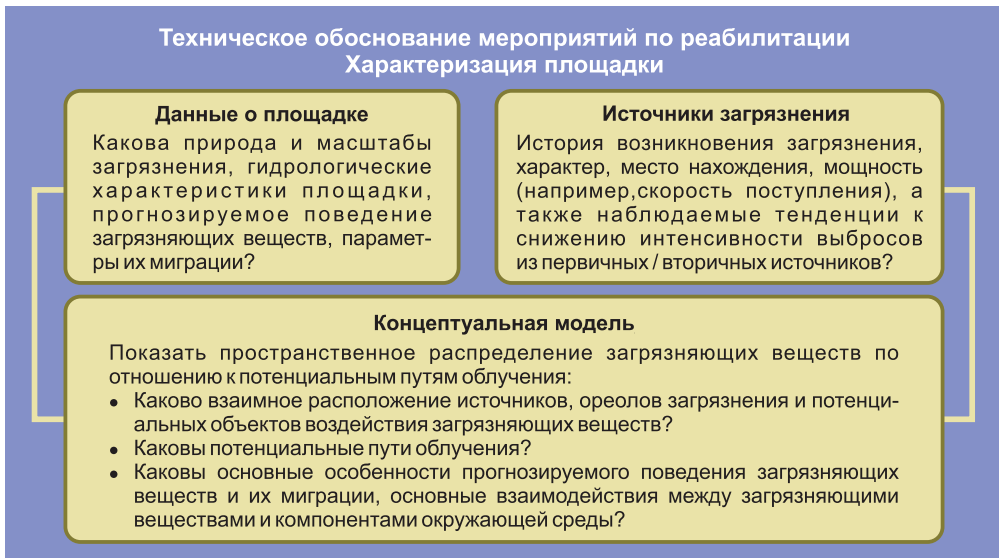


Рис. 1.151. Структура технического обоснования мероприятий по реабилитации

Системная оценка

На основании полученной в ходе характеристики площадки информации проводится системная оценка возможных подходов к осуществлению работ по реабилитации. Наглядно процедура оценки представлена на рис. 1.152 (стр. 318).

Ключевым элементом такой оценки является анализ текущих уровней и путей облучения, а также подходов к проведению работ по реабилитации площадки в контексте использования материальных и финансовых ресурсов и осуществления ведомственного контроля или других мер, которые могут быть приняты для снижения радиационного воздействия в ходе осуществления работ по реабилитации.

Системное управление работами на площадке

Системное управление работами по реабилитации является неотъемлемой частью разработанной схемы. Данный элемент включает разработку проекта по реабилитации, выполнение работ, мониторинг состояния площадки, оптимизацию проекта, принятие решений об организации работ в долгосрочной перспективе или о закрытии площадки в зависимости от заранее установленных конечных целей проведения работ.

При разработке плана работ по реабилитации площадки необходимо предусмотреть меры, которые позволили бы оценить эффективность работ с точки зрения: обеспечения защиты от воздействия ионизирующего излучения; шагов, предпринятых для снижения риска в будущем; информации, необходимой для выбора дальнейших действий по реабилитации или оценки возможности достижения поставленных целей (рис. 1.153, стр. 319).

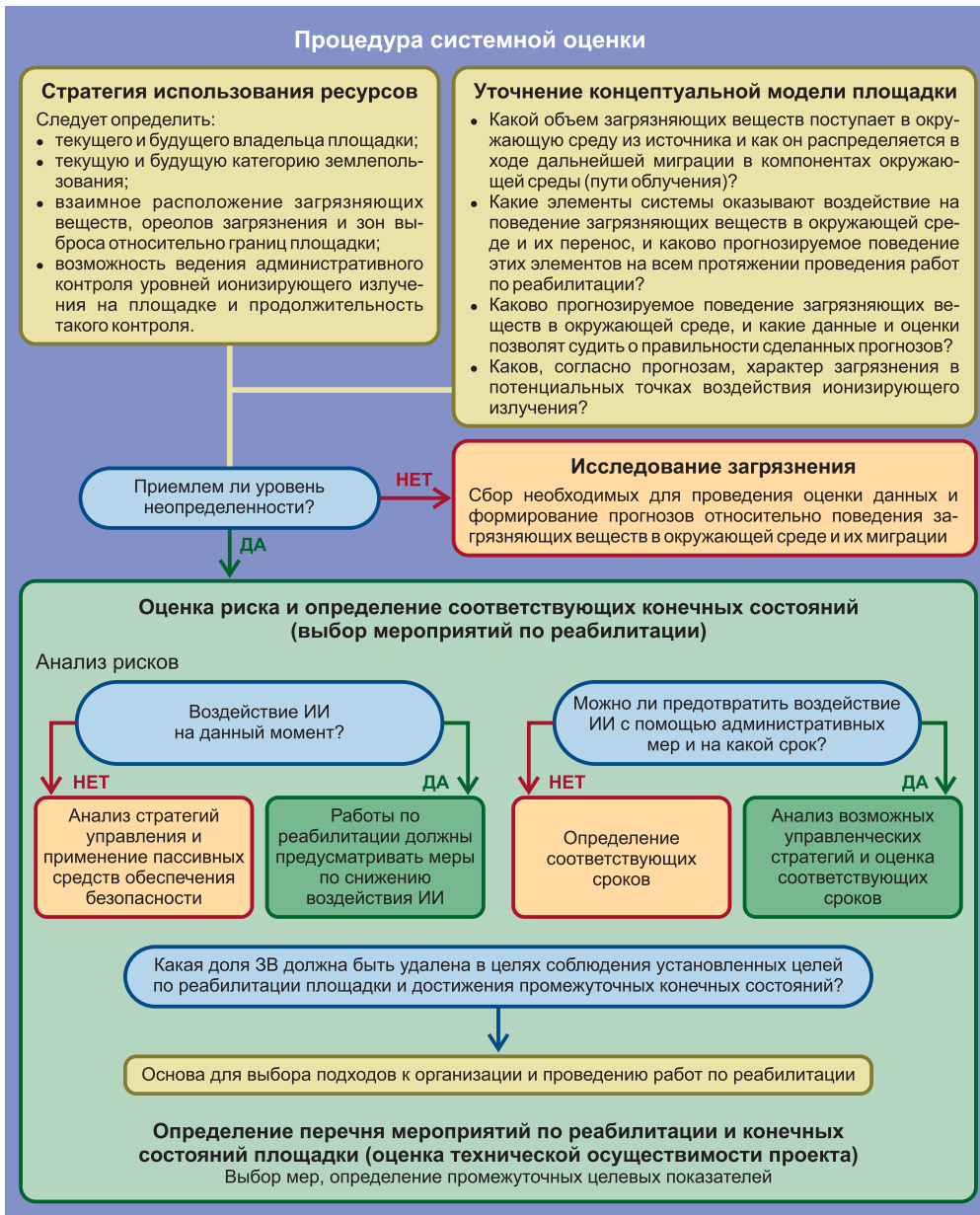


Рис. 1.152. Системная оценка возможных подходов к осуществлению работ по реабилитации (ИИ – ионизирующие излучения, ЗВ – загрязняющие вещества)



1.5.4. Применение «шаблонного» подхода в проектах по реабилитации ядерного наследия

Накопленный США опыт в сфере реабилитации и очистки радиационно и химически загрязненных площадок позволил Министерству энергетики США разработать обобщенный подход, благодаря которому на основании схожести характеристик разных площадок или же особенностей загрязнения окружающей среды на разных объектах в пределах одной площадки можно существенно упростить разработку соответствующих стратегий реабилитации. Он получил название «шаблонного» подхода* [208].

Применение шаблонного подхода позволяет существенным образом сэкономить финансовые и временные ресурсы при выполнении работ по очистке и реабилитации на группе площадок, где применялись схожие методы обращения с отходами (например, траншейное захоронение ЖРО и т. п.), одни и те же компоненты окружающей среды загрязнены примерно одинаковым набором загрязняющих веществ. При этом так называемая «типовая» проблема для группы площадок может быть выявлена, используя [209]:

- архивные данные о характере промышленной деятельности на площадке (например, на площадках размещались отходы с одной промышленной установки);
- данные о характере загрязнения (например, на нескольких площадках находятся установки, содержащие радиоактивный шлам);
- информацию о загрязненных компонентах окружающей среды (например, почва);
- сведения о способе размещения отходов (например, полигон захоронения ТРО).

* англ. plug-in approach.

После выявления «типовых» проблем, основываясь на их масштабе, особенностях и сложности, экспертная группа переходит к анализу наиболее перспективных мер, направленных на их решение. Если схожая проблема уже была решена в ходе реализации проектов по реабилитации в прошлом, то оценивают эффективность принятия подобных мер на рассматриваемой площадке или группе площадок. Если нет, то из группы площадок, характеризующихся схожими проблемами, выбирают «ведущую» – т. е. наиболее репрезентативную для данной группы. В этом случае целесообразность применения предлагаемого набора мер сначала оценивается для «ведущей» площадки, а полученные выводы служат основой для принятия решений по остальным площадкам из группы.

После определения перечня потенциально эффективных мер по реабилитации и очистке переходят к составлению «краткого описания» (или «профиля»*) выбранных мер или технологий очистки (табл. 1.65). В таком описании должны быть определены условия, наличие или отсутствие которых обеспечивают эффективность применения рассматриваемой меры. Эти условия включают как технические факторы, так и организационные аспекты. Кроме того, на данном этапе выявляются все неопределенности, при столкновении с которыми потребуется скорректировать выбранные меры в целях поддержания их эффективности.

Табл. 1.65. Пример «профиля» для технологий очистки загрязненных территорий [209]

Технология	Параметр профиля	Граничные условия	Значимость параметра
Обработка почвы методом паровой экстракции (ППЭ)	Загрязнение вадозной зоны	Присутствие галогенпроизводных углеводородов	Прошлый опыт показывает, что ППЭ является наиболее эффективным методом удаления галогенпроизводных углеводородов
	Проницаемость почвы в вадозной зоне	Свыше 1·10 ⁻⁴ дарси	При меньшей проницаемости почвы уменьшится интенсивность перемещения пара сквозь пористую среду, что приведет к снижению экономической эффективности применения данной технологии
	Процент водонасыщения	Менее 60 %	При проценте насыщения выше 60 % уменьшается поровый объем, что приведет к снижению экономической эффективности применения данной технологии
	Влияние на грунтовые воды	На данный момент воздействие на грунтовые воды не наблюдается	Если загрязнение затронуло грунтовые воды, то потребуются их очистка
	Постоянная Генри для загрязняющего вещества	Более 100 атм/молярная доля	При более низком значении постоянной снизится интенсивность перехода вещества из жидкой фазы в паровую, что приведет к снижению экономической эффективности применения данной технологии
	Давление паров для загрязняющего вещества	Более 1,0 мм рт. ст. при t = 20°C	При давлении ниже заявленного интенсивность парообразования упадет до уровня, при котором ППЭ окажется экономически неэффективным методом

* англ. remedy profile.

Технология	Параметр профиля	Граничные условия	Значимость параметра
Установка покрытия	Загрязнение вадозной зоны	Плотные жидкости не в водной фазе, полуплетучие вещества, металлы, неорганические соединения	Очистить почву от этих загрязняющих веществ очень сложно, поэтому установка покрытия рассматривается в качестве наиболее очевидного и эффективного метода
	Площадь установки покрытия	Менее 9,7 га	Для большей площади покрытия потребуется провести дополнительный анализ возможности обеспечения его стабильности
	Глубина загрязнения	Более 3 м ниже поверхности земли	При меньшей глубине проникновения загрязняющих веществ наиболее экономически эффективным способом реабилитации является экскавация почвы и ее обработка
	Воздействие от возведения конструкций покрытия	Не повлияет на экологически чувствительные среды	Дополнительный анализ потребуется в случае, если будет установлено, что покрытие может оказать негативное влияние на экологически чувствительные среды
	Будущий характер землепользования	Могут накладываться ограничения	Технологию целесообразно использовать в случае, если планируется наложить определенные ограничения на землепользование, что связано с необходимостью долгосрочного технического обслуживания и контроля состояния покрытия

Обычно в «краткое описание» включают:

- уровень эффективности технологии;
- предельные значения по концентрациям загрязняющих веществ (превышение определенных пределов по концентрации загрязняющих веществ может исключить возможность применения тех или иных мер);
- категорию землепользования (к примеру, такие требования, накладываемые на землепользование, могут запрещать оставление отходов на площадке);
- анализ затрат;
- анализ проблем организационного характера (например, герметизация установки может в дальнейшем помешать осуществлению ее технического обслуживания);
- особенности гидрологии и геологические характеристики.

Следует понимать, что чем шире диапазон условий, охватываемых конкретной технологией (т. е. выше уровень робастности), тем меньше может быть общих характеристик у рассматриваемых площадок. При этом допустимый уровень неопределенностей в характеристиках площадки тем выше, чем меньше они способны повлиять на эффективность применения рассматриваемой технологии.

Табл. 1.66. Пример оценки технологий реабилитации в рамках «шаблонного» подхода [144]

Параметр профиля	Граничные условия	Условия на площадке	Анализ применимости	Информационные потребности
Технология паровой экстракции загрязняющих веществ из почвы				
Загрязнение vadозной зоны	Присутствие галогенпроизводных углеводородов (ГУ)	Галогенпроизводные углеводороды (ГУ)	По имеющимся сведениям в первую очередь требуется очистка от ГУ	нет
Проницаемость почвы в vadозной зоне	Свыше 1×10^{-4} дарси	Имеются участки, имеющие коэффициент проницаемости как выше, так и ниже определенного граничными условиями	По результатам прошлых обследований грунта, проницаемость некоторых камер загрязненного грунта не позволит реализовать данную технологию	Вместо дополнительного отбора проб было решено провести лабораторные исследования, позволяющие оценить экономическую целесообразность применения технологии паровой экстракции загрязняющих веществ из почвы
Процент водонасыщения	Менее 60 %	45–50 %	По результатам прошлых обследований грунта, данный параметр отвечает установленным требованиям	нет
Влияние на грунтовые воды	На данный момент воздействия на грунтовые воды нет	Отсутствует воздействие загрязняющих веществ на грунтовые воды	По результатам анализа отобранных ранее проб свидетельствуют о соблюдении этого критерия	нет
Постоянная Генри для загрязняющего вещества	Более 100 атм/молярную долю	Более 100 атм/молярную долю	По результатам прошлых обследований грунта, данный параметр отвечает установленным требованиям	нет
Давление паров для загрязняющего вещества	Более 1,0 мм рт.ст для Hg при $t = 20^\circ\text{C}$	Более 1,0 мм рт.ст для Hg при $t = 20^\circ\text{C}$	По результатам прошлых обследований грунта, данный параметр отвечает установленным требованиям	нет

Параметр профиля	Граничные условия	Условия на площадке	Анализ применимости	Информационные потребности
Технология установки покрытия				
Загрязнение вадозной зоны	Плотные жидкости не в водной фазе, полелетучие вещества, металлы, неорганические соединения	Происходит миграция полихлорированных ди-фенилов, хрома и свинца в грунтовые воды в концетрациях, превышающих допустимые уровни риска	По имеющимся сведениям миграция загрязняющих веществ в грунтовые воды потенциально возможна. Условия на площадке соответствуют требованиям.	нет
Площадь установки покрытия	Менее 9,7 га	3–4,5 га	По имеющимся сведениям вероятность миграции загрязняющих веществ за пределы площадки размером в 11 га крайне мала. Условия на площадке соответствуют требованиям.	Сбор дополнительных сведений необходим не для подтверждения соответствия условий на площадке заявленным требованиям, а для определения точной площади зоны, на которой будет установлено покрытие
Глубина загрязнения	> 3 м ниже поверхности земли	Отсутствует воздействие загрязняющих веществ на грунтовые воды	Результаты анализа отобранных ранее проб свидетельствуют о соблюдении этого критерия	нет
Воздействие от возведения конструкций покрытия	Не повлияет на экологически чувствительные среды	На площадке нет экологически чувствительных сред	По результатам проведенной экологической экспертизы, ни один из видов растительного или животного мира, обитающих в пределах данной площадки, не относится к редким или исчезающим. Кроме того, мала вероятность, что в скором времени они таковыми станут. Условия на площадке соответствуют требованиям.	нет
Будущий характер землепользования	Могут быть наложены ограничения	В дальнейшем площадку планируется использовать исключительно в промышленных целях	За площадкой закреплен статус промышленного землепользования, в дальнейшем менять его не планируется. Условия на площадке соответствуют требованиям	нет

Следующий этап предусматривает разработку платформы для применения «шаблонного» подхода к группе площадок. С этой целью разрабатывается методология оценки отдельных площадок, которая позволяет определять пригодность выбранных мер для реализации на схожих площадках. Иными словами – определить, подпадает ли площадка под условия, приведенные в профиле. При такой оценке особое внимание следует уделять именно тем характеристикам площадки, которые могут действительно повлиять на эффективность работ. Например, в случае обработки почвы методом паровой экстракции сведения о воздухопроницаемости почвы и летучести загрязняющих веществ будут представлять наибольший интерес, в то время как данные об уровне вымываемости загрязняющих веществ не будут иметь столь большого значения. Пример такой оценки представлен в табл. 1.66 (стр. 322).

Итогом проведенной оценки может стать принятие одного из трех решений:

- Характеристики площадки отвечают требованиям, приведенным в «профиле», и критерии применения рассматриваемой технологии реабилитации соблюдены, т. е. реализации конкретных мероприятий на группе площадок дается зеленый свет.
- Характеристики площадки не отвечают требованиям, приведенным в «профиле». В этом случае специалисты должны оценить возможность применения рассматриваемой технологии после ее технической доработки и модернизации, что позволит расширить диапазон условий, включенных в «профиль». К примеру, закачка определенных химических веществ в условиях повышенной температуры может повысить летучесть органических веществ, тем самым повысив эффективность процесса обработки почвы методом паровой экстракции.
- Характеристики площадки не отвечают требованиям, приведенным в «профиле» (даже в случае технической оптимизации выбранной технологии), и рассматриваемая технология не может быть применена для площадки или группы площадок. Возможным решением в данном случае может стать применение сразу нескольких технологий реабилитации, для каждой из которых должен быть составлен свой «профиль».

Список литературы к главе 1

1. Fat Man and Little Boy: The first two production weapons, U.S. Department of Energy.
2. U.S. Congress, Office of Technology Assessment, Complex Cleanup: The Environmental Legacy of Nuclear Weapons Production, OTA-O-484 (Washington, DC: U.S. Government Printing Office, February 1991).
3. Linking Legacies Connecting the Cold War Nuclear Weapons Production Processes to Their Environmental Consequences, The U.S. Department of Energy Office of Environmental Management, January 1997.
4. Cleaning Up Nuclear Weapons Complex, An Update for States 2008 Edition, NGA, Center for Best Practices, 2008.
5. Military Nuclear Wastes in the United States, Robert Alvarez, Senior Advisor, Friends of the Earth, December 1, 2012.
6. Introduction to DOE Environmental Liabilities, May 2013, www.energy.gov/sites/prod/files/2013/.../Environmental-Liability-101-2013.pdf
7. Voices of the Manhattan Project, Oak Ridge, <http://www.manhattanprojectvoices.org/location/oak-ridge>
8. Manhattan Project Signature Facilities, K-25 Gaseous Diffusion Process Building, Oak Ridge, Tennessee, http://www.atomicarchive.com/History/sites/K_25.shtml
9. Manhattan Project Signature Facilities: Making the Atomic Bomb, Y-12, <http://www.atomicarchive.com/History/mp/p4s4.shtml>
10. The Manhattan Project: an interactive history, DOE, Office of History and Heritage Resources, http://www.osti.gov/manhattan-project-history/Events/1942-1944_pu/final_reactor_x-10.htm
11. Radionuclides releases into Clinch River from White Oak Creek on the Oak Ridge Reservation – an assessment of quantities released, off-site radiation doses, and health risks, TASK 4 Report, Oak Ridge Health Studies, 1999.
12. The Management of Radioactive Waste at the Oak Ridge National Laboratory: Technical Review, Board on Radioactive Waste Management Commission on Physical Science, Mathematics, and Resources, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC, 1985.
13. Releases of Contaminants from Oak Ridge Facilities and Risks to Public Health, final report of the Oak Ridge Health Agreement Steering Panel, Leo Williams, 1999.
14. Oak Ridge Reservation, Annual Site Environmental Report 2012, DOE/ORO/2445, Chapter 3, 2012.
15. East Tennessee Technology Park, DOE Environmental Management Program, Fact Sheet, 2006.
16. Cleanup Progress, Annual Report to the Oak Ridge Community, DOE, 2013.
17. East Tennessee Technology Park, DOE Fact Sheet, July 2015.
18. New EM Facility Treats Groundwater at Oak Ridge, <http://energy.gov/em/articles/new-em-facility-treats-groundwater-oak-ridge>
19. Oak Ridge Reservation, Annual Site Environmental Report 2012, DOE/ORO/2445, Chapter 4, 2012.

20. Strategic Plan for Mercury Remediation at the Y-12 National Security Complex Oak Ridge, Tennessee, DOE/OR/01-2605&D1, March 2013.
21. DOE Awards Contract to Legacy Waste Plant Design, Nuclear World News, 12 May 2015.
22. Oak Ridge Reservation, Annual Site Environmental Report 2012, DOE/ORO/2445, Chapter 5, 2012.
23. Risk-based end state vision for the Oak Ridge Reservation, DOE, 2003.
24. Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0, Landfill caps are used for contaminant source control, <http://www.frtr.gov/matrix2/section4/4-27.html>
25. Oak Ridge National Laboratory, DOE Environmental Management Program, Fact Sheet, December 2012.
26. Bill McMillan, Oak Ridge National Laboratory Portfolio Plan, Oak Ridge Office of Environmental Management, April 10, 2013.
27. Characterization of Remote-Handled Transuranic Waste for the Waste Isolation Pilot Plant: Final Report, Board on Radioactive Waste Management, Division on Earth and Life Studies, National Research Council, DOE, 2002.
28. TRU Waste Management – Past, Present, and Future at Oak Ridge National Laboratory, K. M. Billingsley, K. P. Guay, J. R. Trabalka, G. L. Riner, WM'01 Conference, February 25-March 1, 2001, Tucson, AZ.
29. Transuranic Waste Processing Fact Sheet September 2008, DOE Environmental Management Program.
30. DOE: Plant for processing hot sludge to cost \$100M, December 2013 <http://www.lebanondemocrat.com/article/state-government/298546>
31. Craig H. Benson, PhD, PE; William H. Albright, PhD; David P. Ray, PE; and John Smegal, Review of the Environmental Management Waste Management Facility (EMWMF) at Oak Ridge, Independent Technical Review Report: Oak Ridge Reservation, February 2008.
32. Dawn Huotary, DOE facility disposes of 1.4 million tons of waste, June 2012, <http://oakridgetoday.com/2012/06/13/doe-facility-disposes-of-1-4-million-tons-of-waste/>
33. Frank Munger, Proposed Oak Ridge landfill would cost \$817 million; DOE says off-site disposal would triple the price, October 2013. <http://knoxblogs.com/atomic-city/2013/10/17/proposed-oak-ridge-landfill-cost-817m-doe-says-site-disposal-triple-price/>
34. Contractors, U.S. Department of Energy's Oak Ridge Office of Environmental Management, <http://energy.gov/orem/about-us/contractors>
35. R. E. Gephart A Short History of Hanford Waste Generation, Storage, and Release, Pacific Northwest Laboratory, October 2003.
36. D. Harvey, History of the Hanford Site 1943-1990, Pacific Northwest Laboratory, 1996.
37. The Release of Radioactive Material from Hanford: 1944-1972. Environmental Health Programs Report. Hanford Health Information Network. 1999.
38. Hanford Projects and Facilities, <http://www.hanford.gov/page.cfm/ProjectsFacilities>
39. Heeb C. M. Radioactive Releases to the Atmosphere from Hanford Operations, 1944–1972. Battelle. Pacific Northwest Laboratory, Richland, January 1994.

40. Hanford Site: Cleanup Completion Framework, DOE Richland Operations Office, Richland, January 2013.
41. Remedial Investigation Work Plan for Hanford Site Releases to the Columbia River; DOE Richland Operations Office, Richland, September 2008.
42. P. W. Griffin, 105-DR Reactor Interim Safe Storage Project Final Report, Bechtel Hanford Inc., January 2003.
43. J. G. Morse, Information Exchange for Deep Vadose Zone Remediation Technologies, Richland, June 2011.
44. Developing a Lasting Groundwater Solution at Hanford: CH2M Hill's 200 West Pump and Treat System, Tania Reyes-Mills, <http://ndreport.com/developing-a-lasting-groundwater-solution-at-hanford/>
45. Hanford Site Environmental Report for Calendar Year 2014, DOE Richland Operations Office, Richland, September 2015.
46. The Hanford Cleanup: the First 20 years, Oregon Department of Energy, July 2009.
47. An Update on the Hanford Site and Cleanup Progress, September 2013, <http://energy.gov/articles/update-hanford-site-and-cleanup-progress>
48. 2013 Hanford Lifecycle Scope, Schedule and Cost Report, fact sheet, DOE, February 2013
49. Hanford Site 2014 Economic Outlook, 2014 Tri-Cities Economic Outlook forum, January 2014
50. 2014 Hanford Lifecycle Scope, Schedule and Cost Report, fact sheet, DOE, February 2014
51. S. Korenkiewicz, 2013 Lifecycle Scope, Schedule and Cost Report, DOE Richland Operations Office, Richland, 6 June 2013.
52. Savannah River Site, Facts About the Savannah River Site, Savannah River Nuclear Solutions, January 2011.
53. SRS History Highlights, <http://www.srs.gov/general/about/history1.htm>
54. Plutonium: The First 50 Years, United States Plutonium Production, Acquisition, and Utilization from 1944 through 1994, DOE/DP-0137. U.S. Department of Energy. February 1996.
55. Savannah River Site Environmental Report for 1999, Westinghouse Savannah River Company, 1999.
56. P Reactor at SRS, <https://www.flickr.com/photos/51009184@N06/6195847930/in/photostream/>
57. K Area Complex, Savannah River Facts, Savannah River Nuclear Solutions, November 2011.
58. L Area Complex, Savannah River Facts, Savannah River Nuclear Solutions, October 2011.
59. F Canyon and FB Line, Savannah River Facts, Savannah River Nuclear Solutions, November 2011.
60. H Canyon, Savannah River Facts, Savannah River Nuclear Solutions, February 2012.
61. Mixed Oxide Fuel Fabrication Facility, <http://www.cbi.com/project-profiles/mixed-oxide-fuel-fabrication-facility/>

62. Hetrick, C. S. and D. K. Martin. 1990. Radioactive releases at the Savannah River Site (1954 –1988). Westinghouse Savannah River Company, Aiken, SC Report # WS-RC-RP-89-737.
63. Radioactivity from Military Installations sites and Effects on Population Health, Edited by: Rene J.C.Kirchmann & Arrigo A. Cigna, RADSITE project, 2003.
64. Evans, A.G., L.R. Bauer, J.S. Haselow, D.W. Hayes, W.L. McDowell and J.B. Pickett. 1992. Uranium in the Savannah River Site Environment. WSRC-RP-92-315. Aiken, SC: Westinghouse Savannah River Company. SRS Phase II Database MJC199405137.
65. Crawford, T.V. and P.L. Roggenkamp. 1983. 1981 Tritium Offsite Releases and Doses. DPST-83-337-DV. SRS Phase II Database HRM1994081931. March 11.
66. Jacobsen, W.R. 1972. Tritium Effluent Reduction Programs at the Savannah River Plant. Environmental Analysis and Planning. DP-MS-72-66. SRS Phase II Database MJC1994090839.
67. Christensen, E.J. and D.E. Gordon, eds. 1983. Technical Summary of Groundwater Quality Protection Program at Savannah River Plant. Volume I and II. DPST-83-829. SRS Phase II Database SKR1993101316 and TFW1993092914. December.
68. Advice on the Department of Energy's Cleanup Technology Roadmap: Gaps and Bridges, National Research Council. Advice on the Department of Energy's Cleanup Technology Roadmap: Gaps and Bridges. Washington, DC: The National Academies Press, 2009.
69. Liquid Nuclear Waste Tank Farms, Savannah River Remediation Fact Sheet, May 2012.
70. Defense Waste Processing Facility, Savannah River Remediation Fact Sheet, May 2012.
71. Saltstone Facilities, Savannah River Remediation Fact Sheet, May 2012.
72. Interim Salt Waste Processing: Actinide Removal Process and Modular Caustic Side Solvent Extraction Unit, Savannah River Fact Sheet, Savannah River Nuclear Solutions, May 2012.
73. SRS Transuranic Waste Program, Savannah River Fact Sheet, Savannah River Nuclear Solutions, February 2011.
74. Savannah River Site Groundwater Management Strategy and Implementation Plan Savannah River Nuclear Solutions, LLC, February 2011.
75. Thermal Treatment: In Situ, Overview, http://www.clu-in.org/techfocus/default.focus/sec/Thermal_Treatment%3A_In_Situ/cat/Overview/
76. Military Nuclear Wastes in the United States, Robert Alvarez, December 1, 2012.
77. Savannah River Cleanup Costs Rise, <http://www.abqjournal.com/3615/blogs/nm-science/savannah-river-cleanup-costs-rise.html>
78. MOX plant cost revised to \$7.7 billion, with three-year delay, <http://chronicle.augusta.com/news/metro/2013-03-20/mox-plant-cost-revised-77-billion-three-year-delay>
79. <http://www.atomicheritage.org/index.php/component/content/article/42-resources-tab-/150-los-alamos-nm-project-y.html>
80. LA-UR-97-4765, Overview of Los Alamos National Laboratory—1997, Site-Wide Environmental Impact Statement Project Office Environment, Safety, and Health Division, Los Alamos National Laboratory, March 1998.
81. Draft Final Report of the Los Alamos Historical Document and Assessment (LAHDRA) Project, June 2009.

82. Early Reactors From Fermi's Water Boiler to Novel Power Prototypes, Merle E. Bunker, LOS ALAMOS SCIENCE Winter/Spring 1983.
83. Draft Final Report of the Los Alamos Historical Document and Assessment (LAHDRA) Project, Chapter 5: Reactor Development and Operations at Los Alamos, June 2009.
84. Jackie Travers, B.S., Ekaterina Alexandrova, B.A., and Marvin Resnikoff, Ph.D, An Assessment of Los Alamos National Laboratory Waste Disposal Inventory Los Alamos, New Mexico, November 2009.
85. Cleanup at the Los Alamos National Laboratory – The Challenges – 9493, Susan G. Stiger, Ken Hargis, Michael Graham, WM2009 Conference, March 1-5, 2009, Phoenix, AZ.
86. Los Alamos National Laboratory, Office of Environmental Management, <http://energy.gov/em/los-alamos-national-laboratory>
87. TA-21 Cleanup Project, Los Alamos National Laboratory, <https://www.lanl.gov/community-environment/environmental-stewardship/cleanup/sites-projects/ta21-cleanup.php>
88. Los Alamos Cleanup At the Crossroads: Treat All Los Alamos Lab Radioactive Wastes Consistently, Nuclear Watch, New Mexico, March 25, 2016. <http://www.nukewatch.org/watchblog/?p=2209>
89. Los Alamos National Laboratory's 3,706 TRU Waste Campaign – TRU Reclassified Material Disposition Program and Disposal Options at WCS Resulting in Significant Cost and Schedule Savings, Lee Beesop, Mike Romero, DOE, Los Alamos National Security, WM2014 Conference, March 2 – 6, 2014, Phoenix, Arizona, USA. <http://www.wmsym.org/archives/2014/papers/14650.pdf>
90. Watchdog Sues Feds Over Los Alamos Nuke Waste Removal, Public News Service, May 2016 <http://www.publicnewsservice.org/2016-05-31/environment/watchdog-sues-feds-over-los-alamos-nuke-waste-removal/a52160-1>
91. Success Story, Fernald Preserve, U.S. EPA Region 5, June 2010.
92. Nuclear Legacies: Communication, Controversy, and the U.S. Nuclear Weapons Complex, Bryan C. Taylor, William J. Kinsella, Stephen P. Depoe, Meribeth S. Metzler, Lexington Books, 2008.
93. «Safety of the High-Level Uranium Ore Residues at the Niagara Falls Storage Site» Льюистон, Нью-Йорк (Вашингтон, округ Колумбия: Нэшнл Акэдими Пресс, 1995 г.).
94. Институт исследований энергетики и окружающей среды Энергетика и Безопасность № 37 (2006) www.ieer.org/ensec/no-37/no37russ/
95. Radioactive Waste Management and Contaminated Site Clean-up. Processes, Technologies and International Experience, Edited by William E. Lee , Michael I. Ojovan and Carol M. Jantzen, Woodhead Publishing Limited, 2013.
96. The Role of Land Use in Environmental Decision Making at Three DOE Mega-Clean-up Sites: Fernald, Rocky Flats, and Mound -11595, Marc Jewett and Moses Jaraysi, WM2011 Conference, February 27 – March 3, 2011, Phoenix, AZ Fernald Preserve, Harrison, Ohio, Fact Sheet, U.S. Department of Energy, Office of Nuclear Legacy Management, 2010.
97. Killing Our Own, The Disaster of America's Experience with Atomic Radiation, 1945-1982, Harvey Wasserman & Norman Solomon, Delta Book, New York, 1982.

98. A September 11th Catastrophe You've Probably Never Heard About, Andrew Cohen, September 2012, <http://www.theatlantic.com>
99. A Timeline of More than 50 Years of Rocky Flats History, Patricia Buffer, July 2003.
100. Rocky Flats Closure Legacy, Special Nuclear Material Removal Project, www.lm.doe.gov/land/sites/co/rocky_flats
101. Making the Impossible Possible. Closing Rocky Flats – Ahead of Schedule and Under Budget By Ed Bodey, Radwaste Solutions, September/October 2005.
102. Nuclear Cleanup of Rocky Flats:: DOE Can Use Lessons Learned to Improve Oversight of Other Sites' Cleanup Activities, GAO Report to Congressional Requesters, GAO-06-532, United States Government Accountability Office, July 2006.
103. Rocky Flats Closure Project, Making the Impossible Possible, Jeffrey Kerridge, CH2M Hill, Society of American Military Engineers 2-2007.
104. Rocky Flats Closure Legacy, Decommissioning, Режим доступа: www.lm.doe.gov/land/sites/co/rocky_flats, Свободный. - Загл. С экрана. – Яз. англ.
105. Final Rocky Flats Cleanup Agreement, United States Environmental Protection Agency and the State of Colorado, United States Department Consent Order of Energy, Rocky Flats Environmental Technology Site CERCLA VIII – 96 – 21, July 19, 1996. Режим доступа: <http://www.em.doe.gov/ffaa/rfcercla.html> 6/5/00, Свободный. - Загл. С экрана. – Яз. англ.
106. Mound Plant (USDOE) former nuclear development Superfund site, Режим доступа: <http://theenergylibrary.com/node/11672>, Свободный. - Загл. С экрана. – Яз. англ.
107. Radioactive Waste Management and Contaminated Site Clean-up, Processes, Technologies and International Experience, William E. Lee, Michael I. Ojovan, Carol M. Jantzen, Woodhead Publishing Limited, USA, 2013.
108. Technologies for Environmental Clean-up: Toxic and Hazardous Waste Management, A. Avogadro, R.C. Ragaini, Environmental Management, Volume 2, Springer Science + Business Media, 1994.
109. RCRA, Resource Conservation and Recovery Act, Basic Practice Series, John W. Teets, Dannis Reis, Danny G. Worrell, Section of Environment, Energy and Resources Book Publications Committee, 2003.
110. 25 Years of RCRA: Building on Our Past to Protect Our Future, Office of Solid Waste and Emergency Response, EPA, 2005.
111. RCRA Corrective Action: Case Studies Report, United States Environmental Protection Agency, April 2013.
112. Toxic Substance Control Act, Environmental Law, Richard A. Mears, November 18, 2002.
113. Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act: A Summary of Superfund Cleanup Authorities and Related Provisions of the Act, David M. Bearden, Congressional Research Service, June 14, 2012.
114. CERCLA Remedy Selection: Abandoning the Quick Fix Mentality, Linly Ferris, David Rees, Ecology Law Quarterly, Vol. 21, Issue 3, Article 4, June 1994.
115. Cleanup Levels for CERCLA Remedial Actions, David M. Buxbaum, 2014.
116. Overview of the Present Hazard Ranking System, EPA factsheet.

117. The Superfund Site Assessment Process, EPA factsheet.
118. Rules of Thumb for Superfund Remedy Selection, U.S. Environment Protection Agency, Office of Solid Waste and Emergency Response, EPA 540-R-97-013, August 1997.
119. Superfund at 25: What Remains to Be Done, Katherine N. Probst, Resources for the Future, 2005.
120. Number of NPL Site Actions and Milestones by Fiscal Year as of 2015, U.S. Environmental Protection Agency.
121. NPL Status Totals by Status and Milestone as of September 26, 2016, U.S. Environmental Protection Agency.
122. Superfund: Funding and Reported Costs of Enforcement and Administration Activities, GAO Report, 2008.
123. Accelerating Cleanup: Paths to Closure, U.S. Department of Energy Report, 1998.
124. Best Practices for Risk-Informed Remedy Selection, Closure, and Post-closure Control for DOE's Contaminated Sites, William Levitan Associate Deputy Assistant Secretary For Site Restoration Office of Environmental Management, DOE EM, January 2014.
125. Waste Inventory Record-Keeping Systems (WIRKS) in the United States of America, Douglas Tonkay Office of Commercial Disposition Options United States Department of Energy, 2005.
126. CRS Report for Congress, Radioactive Waste Streams: Waste Classification for Disposal, Anthony Andrews, December 2006.
127. 10 C.F.R. 61 «LICENSING REQUIREMENTS FOR LAND DISPOSAL OF RADIOACTIVE WASTE», 1987.
128. 40 CFR Part 191 «ENVIRONMENTAL RADIATION PROTECTION STANDARDS FOR MANAGEMENT AND DISPOSAL OF SPENT NUCLEAR FUEL, HIGH-LEVEL AND TRANSURANIC RADIOACTIVE WASTES».
129. Fuel Cycle to Nowhere: U.S. Law and Policy on Nuclear Waste, Richard Burleson Stewart, Jane Bloom Stewart, Vanderbilt University Press, Nashville, 2011.
130. Federal Facilities on the National Priorities List (NPL), by Agency, U.S. Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov/fedfac/federal-facilities-national-priorities-list-npl-agency#doe>
131. Federal Facility Compliance Act, Section 103, 1992.
132. Federal Facility Compliance Act, Section 102, 1992.
133. Resource Conservation and Recovery Act, Section 7002(a).
134. Cleaning up the Department of Energy's Nuclear Weapons Complex, a CBO Study, May 1994.
135. Improving the Environment: An Evaluation of the DOE's Environmental Management Program, An Evaluation of DOE's Environmental, Management Program, National Academy Press, Washington, D.C. 1995.
136. Linking Legacies: Connecting the Cold War Nuclear Weapons Production Processes to Their Environmental Consequences, the U.S. Department of Energy, Office of Environmental Management, report to Congress, January 1997.

137. Rethinking the Challenges of High-Level Nuclear Waste, Strategic Planning for Defense High-Level Waste and Spent Fuel Disposal, Russell Jim, Robert Alvarez, Brian Barry, May 2007.
138. High-tech price tag for INL waste unit: \$800 million and rising, Idaho Statesman, May 2015.
139. DOE unlikely to meet deadline for startup of waste treatment facility, NPG of Idaho, September 2016, - Режим доступа: <http://www.localnews8.com/news/kifi-top-story/doe-unlikely-to-meet-deadline-for-startup-of-waste-treatment-facility/80385917> . Свободный. – Загл. С экрана. –Яз. англ.
140. Nuclear Waste Technical Review Board Overview: Office of Environmental Management, Ken Picha, Office of Environmental Management, U.S. Department of Energy, April 2013.
141. Separate repository for US military waste? World Nuclear News, October 2014.
142. The World of Nuclear Waste, the Generalist, John May, December 2015.
143. Fifth National Report for the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and the Safety of Radioactive Waste Management, U.S. Department of Energy, Office of Environmental Management, DOE/EM – 0654, Rev. 4, September 2014.
144. Cleaning up the Nation's Waste Sites: Markets and Technology Trends EPA, Environmental Protection Agency, EPA 542-R-96-005, Washington, D.C.: EPA, Office of Solid Waste and Emergency Respons, 1997.
145. A Compendium of Cost Data for Environmental Remediation Technologies, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-2205, August 1996.
146. Soil and Groundwater Remediation, Carol Townsend, Robert Sherrill, Sage Environmental Consulting, November 2012.
147. Corrective Measures Selective Process, Remedial Technologies Overview, Session 3, Environmental Protection Agency.
148. Landfill Cap, Soil Containment Remediation Technology, Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0, FRTR.
149. Groundwater Pumping/Pump and Treat, Ex- Situ Groundwater Remediation Technology, Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0, FRTR.
150. B-2 Hanford Site Groundwater Monitoring and Performance Report: 2009, Appendix B, Vol. 2.
151. Solidification/Stabilization, Ex-Situ Remediation Technology, Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0, FRTR.
152. Soil Vapor Extraction, In Situ Soil Remediation Technology, Remediation Technologies Screening Matrix and Reference Guide, Version 4.0, FRTR.
153. Hanford Site Groundwater Monitoring and Performance Report for 2009, Vol. 2, Chapter 21, M.J. Hartman, Richland Operations Office, U.S. Department of Energy, DOE/RL-2010-11, 2010.
154. Determination of the Distribution and Inventory of Radionuclides within a Savannah River Site Waterway, R.A. Hiergesell, M.A. Phifer, WM2013 Conference, February 24-28, 2013, Phoenix, Arizona, USA.

155. Testimony on the Value of the Savannah River Ecology Laboratory, F. Ward Whicker, PhD, Colorado State University, July 17, 2007.
156. Par Pond Fish, Water, and Sediment Chemistry, M.H. Paller, Westinghouse Savannah River Company, Savannah River Site, WSRC-TR-96-208, 1996.
157. Oak Ridge National Laboratory Technology Logic Diagram, Volume 1 Technology Evaluation, Remedial Action Plan B, September 1993.
158. Resource Management Plan for the Oak Ridge, Reservation: Wetlands on the Oak Ridge Reservation, (V.28), ORNL/NERP-5/V28, Martin Marietta Energy Systems, Inc, Oak Ridge National Laboratory, 1991.
159. Fixing White Oak Dam's high-rain vulnerability, Frank Munger, April 2010.
160. White Oak Dam Fortified, Energy Department Upgrades Earthen Stone Structure for Worst-Case Scenarios, Frank Munger, December 2010.
161. Research Opportunities for Deactivating and Decommissioning Department of Energy Facilities, Committee on Long-Term Research Needs for Deactivation and Decommissioning at Department of Energy Sites, Board on Radioactive Waste Management, National Research Council, the National Academies Press, 2001.
162. Radioactive and Short on Cash to Pay for Closure, Isaac Arnsdorf, Bloomberg, May 2015.
163. Power Reactors, U.S. NRC, Page Last Reviewed/Updated Tuesday, June 28, 2016, по материалам сайта: <http://www.nrc.gov/reactors/power.html>, доступ: свободный, заглавие с экрана, язык: английский.
164. Америке снова нужен уран: почему «вторая экономика мира» закрывает свои АЭС, Федеральное Агентство Новостей, 20.05.2016, по материалам сайта <http://finobzor.ru/show-13108-amerike-snova-nuzhen-uran-pochemu-vtoraya-ekonomika-mira-zakryvaet-svoi-aes.html>, доступ: свободный, заглавие с экрана, язык: русский.
165. Power Reactors Decommissioning Status, U.S. NRC, <http://www.nrc.gov/images/reading-rm/doc-collections/maps/power-reactors-decommissioning-sites.png>, доступ: свободный, заглавие с экрана, язык: английский.
166. Status of Decommissioning Program, 2015 Annual Report, Division of Decommissioning, Uranium Recovery, and Waste Programs Office of Nuclear Material Safety and Safeguards U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555-0001.
167. Decommissioning US DOE Nuclear Facilities, Edward G. Delaney, Decommissioning Nuclear Facilities, IAEA Bulletin, winter 1985.
168. Backgrounder on Decommissioning Nuclear Power Plants, U.S. NRC, <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/decommissioning.html>, доступ: свободный, заглавие с экрана, язык: английский.
169. Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series No. 2, IAEA, 2016 Edition, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2016.
170. Decommissioning Status for Shut Down US Nuclear Power Reactors, Nuclear Energy Institute, Based on NRC materials, Updated on April 2016, по материалам сайта: <http://www.nei.org/Knowledge-Center/Nuclear-Statistics/US-Nuclear-Power-Plants/Decommissioning-Status-for-Shut-Down-US-Nuclear-Po>, доступ: свободный, заглавие с экрана, язык: английский.

171. Hallam Nuclear Power Facility, по материалам сайта: <http://www.slideshare.net/wernerbird/nebraska-30599741> , доступ: свободный, заглавие с экрана, язык: английский.
172. Piqua, Ohio, Decommissioning Reactor Site, DOE Office of Legacy Management, Fact Sheet, December 2015.
173. BONUS, Puerto Rico, Piqua Ohio, Decommissioning Reactor Site, DOE Office of Legacy Management, Fact Sheet, October 2015.
174. Locations of Power Reactor Sites Undergoing Decommissioning, U.S. Nuclear Regulatory Commission, April 12. Accessed July 1, 2016.
175. Nuclear Decommissioning: Paying More for Greater Uncompensated Risks, Christina Simeone, Kleinman Center for Energy Policy, August 8, 2016.
176. Status of Decommissioning Program: 2015 Annual Report. SECY-15-0151, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC: U.S. NRC, 2015.
177. Nuclear Decommissioning: Planning, Execution and International Experience, Edited by Michele Laraiia, Woodhead Publishing Series in Energy: Number 36, Woodhead Publishing Limited, 2012.
178. NRC Sites Undergoing Decommissioning, NRC, по материалам сайта: <http://www.nrc.gov/info-finder/decommissioning/power-reactor/> , доступ: свободный, заглавие с экрана, язык: английский.
179. DOE Real Property, Better Data and More Proactive Approach Needed to Facilitate Property Disposal, GAO-15-305, February 2015.
180. Taking Stock: a Look at the Opportunities and Challenges Posed by Inventories from the Cold War Era, a Report of the Materials in Inventory, DOE/EM-0275, January 1996.
181. Central Internet Database, U.S. Department of Energy, Office of Environmental Management, <http://cid.doe.gov/Pages/AboutCID.aspx>
182. Programmatic Environmental Assessment (PEA) for the Recycle of Scrap Metal Originating From Radiological Areas, DOE/EA-1919, 2012
183. Improving the Scientific Basis for Managing DOE's Excess Nuclear Materials and Spent Nuclear Fuel, Committee on Improving the Scientific Basis for Managing Nuclear Materials and Spent Nuclear Fuel through the Environmental Management Science Program, Board on Radioactive Waste Management, the National Academies Press, 2003.
184. Overview of Depleted Uranium Hexafluoride Management Program, Depleted Uranium Hexafluoride Management Program, 2001.
185. US DOE Awards Depleted Uranium Contract, World Nuclear News, 30 September, 2016, - Режим доступа <http://www.world-nuclear-news.org/WR-US-DOE-awards-depleted-uranium-contract-3009168.html> . Свободный. – Загл. С экрана. –Яз. англ.
186. Report of the Plutonium Disposition Working Group: Analysis of Surplus Weapon Grade Plutonium Disposition Options, U.S. Department of Energy, April 2014.
187. Supplement Release Limits for the Direct Reuse of Lead in Shielding Products by the Department of Energy, R.L. Coleman, J.S. Bogard, Oak Ridge National Laboratory, Life Sciences Division, ORNL/TM-2001/36, August 2001.
188. Asset or Waste»: Beneficial Reuse of Radiologically Encumbered Lead Stocks, R.W. Meehan, M. Lee Bishop, DOE, WM-4274, WM'04 Conference, February 29 – March 4, Tucson, AZ.

189. U.S. Uranium Down-blending Activities: Fact Sheet, NISA, National Nuclear Security Administration, March 2012.
190. Highly Enriched Uranium Inventory, Amounts of Highly Enriched Uranium in the United States, U.S. Department of Energy, Office of Security and Safety Performance Assurance, January 2006.
191. Department of Energy: Enhanced Transparency Could Clarify Costs, Market Impact, Risk, and Legal Authority to Conduct Future Uranium Transactions, Report to Congressional Requesters, United States Accountability Office, GAO-14-291, May 2014.
192. CERCLA Remedy Selection, adapted from EPA's May, 1995 OSWER Directive No. 9355.7-04, 1995.
193. Rocky Flats Closure, Project Description, CH2M Hill, 2006.
194. Rocky Flats Closure Legacy, Environmental Restoration Project, Режим доступа: www.lm.doe.gov/land/sites/co/rocky_flats, Свободный. - Загл. С экрана. – Яз. англ.
195. Mound Plant (USDOE), Режим доступа: <http://www.epa.gov/Region5/superfund/npl/ohio/ОН6890008984.html>, Свободный. - Загл. С экрана. – Яз. англ.
196. Mound Site, Key Facilities, Режим доступа: <http://www.globalsecurity.org/wmd/facility/mound-facility.htm>, Свободный. - Загл. С экрана. – Яз. англ.
197. Infrastructure Issues and Technology Approaches for Achieving Successful Rolling Stewardship», Case studies and lessons learned by Legacy Management, Dave Geiser, US Department of Energy, January 10, 2014, Режим доступа: <http://dels.nas.edu/resources/static-assets/nrsb/miscellaneous/Geiser.pdf>, Свободный. - Загл. С экрана. – Яз. англ.
198. History of the Mound Advanced Technology Center Режим доступа: <http://www.daytondailynews.com/news/news/local/history-of-the-mound-advanced-technology-center/nNHwj/>, Свободный. - Загл. С экрана. – Яз. англ.
199. Nuclear Site Remediation and Restoration during Decommissioning of Nuclear Installations, a Report by the NEA Co-operative Programme on Decommissioning, Radioactive Waste Management, OECD 2014.
200. Integrated Approach to Planning the Remediation of Sites Undergoing Decommissioning, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-3.3, IAEA, Vienna, 2009.
201. Remediation of the Melton Valley Watershed at Oak Ridge National Lab: an Accelerated Closure Success Story, Charlie Johnson & Jeff Cnage, WM Conference, February 24-28, 2008, Phoenix, AZ.
202. Closeout of the Melton Valley Completion Project at the Oak Ridge National Laboratory, Rudy Bonilla & Charlie Johnson, WM Conference, February 24-28, 2008, Phoenix, AZ.
203. Advocate, Melton Valley Cleanup Status & Strategy, Oak Ridge Site Specific Advisory Board, Issue 26, April 2007.
204. Remediation Process Optimization: Identifying Opportunities for Enhanced and More Efficient Site Remediation, Technical and Regulatory Guide, The Interstate Technology & Regulatory Council Remediation Process Optimization Team, September 2004.

205. Environmental Cleanup Best Management Practices: Effective Use of the Project Life Cycle Conceptual Site Model, Office of Solide Waste and Emergency Response (5102G), United States Environmental Protection Agency, EPA 542-F-11-011, July 2011.
206. Innovations in Site Characterization Case Study: the Role of a Conceptual Site Model for Expedited Site Characterization Using the Triad Approach at the Poudre River Site, Fort Collins, Colorado, United States Environmental Protection Agency, November 2006.
207. Systems-Based Framework for Remediation Endpoints, Hope Lee, Michael Truex, Dawn Wellman and others, WM2014 Conference, March 2-6, 2014, Phoenix, Arizona, USA.
208. DOE Development of Generic Approaches to Site Remediation, Richard Dailey, Kevin Kytola, 1998.
209. The Plug-In Approach: A Generic Strategy to Expediting Cleanup, Office of Environmental Management, DOE, May 1999.