DOI: 10.25283/2587-9707-2022-1-16-27 УДК 621.039

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СТОИМОСТИ ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Д. Ф. Ильясов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Статья поступила в редакцию 24 декабря 2021 г.

В настоящее время значимой проблемой при планировании деятельности по обращению с радиоактивными отходами в атомной промышленности является прогнозирование стоимости работ по удалению накопленных радиоактивных отходов, отнесенных к категории удаляемых согласно Федеральному закону 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами». Обусловлено это в первую очередь ограниченностью исходных данных о радиоактивных отходах, размещенных в пунктах хранения длительное время назад. В связи с этим целью настоящего исследования является разработка и апробация методов оценки стоимости обращения с радиоактивными отходами в условиях неопределенности исходных данных. Для достижения поставленной цели приведена обобщенная финансово-экономическая модель оценки затрат на различных этапах обращения с радиоактивными отходами и выявлены параметры, оказывающие наибольшее влияние на них. Описан подход к анализу неопределенностей и расчету интервальных оценок затрат на обращение с радиоактивными отходами с заданными вероятностями с применением метода Монте-Карло. Описанные методы апробированы на примере оценки затрат на удаление радиоактивных отходов с площадки ФГУП «РАДОН» (г. Сергиев Посад) и их последующего захоронения.

Ключевые слова: *радиоактивные отходы, обращение с отходами, удаление, захоронение, стоимость, затраты, неопределенность, статистический анализ, метод Монте-Карло.*

Введение и актуальность

Проблема получения возможно точных предварительных оценок затрат на обращение с радиоактивными отходами (РАО) чрезвычайно актуальна для эксплуатирующих организаций в атомной промышленности, и над ее решением уже продолжительное время работают в международных научных сообществах, таких как МАГАТЭ и Агентство по ядерной энергии (АЯЭ при ОЭСР) [1—4]. В России за счет средств из федерального бюджета в рамках ФЦП ЯРБ-2 за период 2016—2020 гг. в среднем кондиционировалось около 5—6 тыс. м^3 РАО в год и затрачивалось около 2,5 млрд руб. При определении стоимости государственного контракта на проведение подобных работ, с одной стороны, необходимо обеспечить рыночный уровень рентабельности для организаций-исполнителей контрактов, с другой — максимально эффективно расходовать средства федеральных и специальных резервных фондов. Ошибки на этапе планирования могут нарушить эти принципы и привести к неэффективности деятельности одной из сторон: для заказчика — в случае значительной переоценки стоимости, для исполнителя — в случае

недооценки затрат на работы, что приведет в конечном итоге к превышению затрат над выручкой.

Основной причиной, обуславливающей ошибки в предварительных оценках стоимости, являются неточность исходных данных и неопределенности различных параметров, необходимых для выполнения расчетов. В рамках настоящей статьи описывается общий подход к решению задачи оценки стоимости работ по обращению с РАО, в том числе приведения их к критериям приемлемости для захоронения, временному хранению, перевозке и захоронению, в условиях неопределенности информации с применением вероятностно-статистических методов.

Разработанный методический инструментарий апробирован на примере оценки стоимости удаления РАО с основной площадки хранения ФГУП «РАДОН».

Финансово-экономическая модель оценки стоимости работ по обращению с РАО

Для начала целесообразно описать общую процедуру оценки стоимости работ по удалению РАО из пункта хранения (ПХ) на этапе предварительного планирования, сформировать финансово-экономическую модель и установить, какие параметры влияют на эту оценку. Итоговая стоимость контракта в результате конкурсных процедур определяется по минимальной предложенной цене среди организаций, участвующих в закупках, которая, в свою очередь, определяется затратным методом, поэтому задачу целесообразно рассматривать в разрезе оценки расходов на выполнение работ потенциальными исполнителями контракта. Схематично эта процедура представлена на рис. 1.

Нулевой этап (подготовительный): сбор и систематизация исходных данных о ПХ и размещенных в них РАО, проведение дополнительных исследований для уточнения данных, подготовка документации. Затраты, как правило, определяются ресурсным методом: трудозатраты персонала, выполняющего подготовку данных и необходимой документации, накладные расходы, а также расходы на услуги по дополнительным исследованиям (если необходимо), отбору проб и т. д. На этапе планирования затраты (или их некоторые статьи) также могут быть рассчитаны косвенными методами, например, как доля от общих затрат или затрат на группу работ.

Этап 1 состоит из операций по извлечению РАО, радиационного контроля и характеризации отходов. Затраты на каждую операцию упрощенно определяются как произведение объема извлекаемых РАО на удельную стоимость выбранной технологии (на 1 м^3 отходов). Расценки на выполнение различных операций устанавливаются индивидуально всеми потенциальными исполнителями работ и оцениваются, как правило, ресурсным методом (с учетом трудозатрат, амортизации машин, материальных затрат и т. д.).

Перед началом этапа 2 необходимо учитывать, что физический объем отходов после извлечения может увеличиться (разрыхление), следовательно, в расчете следует определить коэффициент изменения объема после этой операции. В зависимости от параметров отходов (категории, типа, состояния, если отходы ранее подвергались каким-то способам переработки) определяется схематическая/упрощенная технологическая карта переработки, которая может быть представлена в виде ориентированного графа последовательностей выполнения операций по кондиционированию РАО. Стоит отметить, что на этом этапе важной частью является прогнозирование изменения объемов образования различных типов отходов, включая вторичные, после каждой операции. С учетом технических и технологических особенностей и в соответствии с установленными методиками, для всех операций устанавливаются коэффициенты изменения совокупного объема РАО (например, после прессования или фрагментации металлических отходов совокупный объем может сократиться в 1,5 раза) и образующиеся после операции отходы сортируются по типам (например, после жидкостной дезактивации или сжигания отходов). Эти параметры определяются либо экспериментальным путем, либо исходя из технических характеристик используемого оборудования. Для РАО, содержащихся в конкретном ПХ, следует определить установки, на которых будет осуществляться их переработка, и при необходимости учесть транспортные расходы, а также стоимость (амортизацию) контейнеров, используемых при этом, и затраты на их дезактивацию.

На этапе 3 после сортировки по итогам характеризации РАО (после переработки) устанавливается их класс согласно критериям [5] перед кондиционированием для захоронения. На данном этапе для целей планирования необходимо спрогнозировать распределение отходов на классы в соответствии с требованиями по захоронению. Отметим, что на эту классификацию в большей степени влияет радионуклидный состав, который по опыту работ может варьироваться в широком диапазоне, что приводит к необходимости прогнозирования его разброса от упаковки к упаковке. Практика показывает,

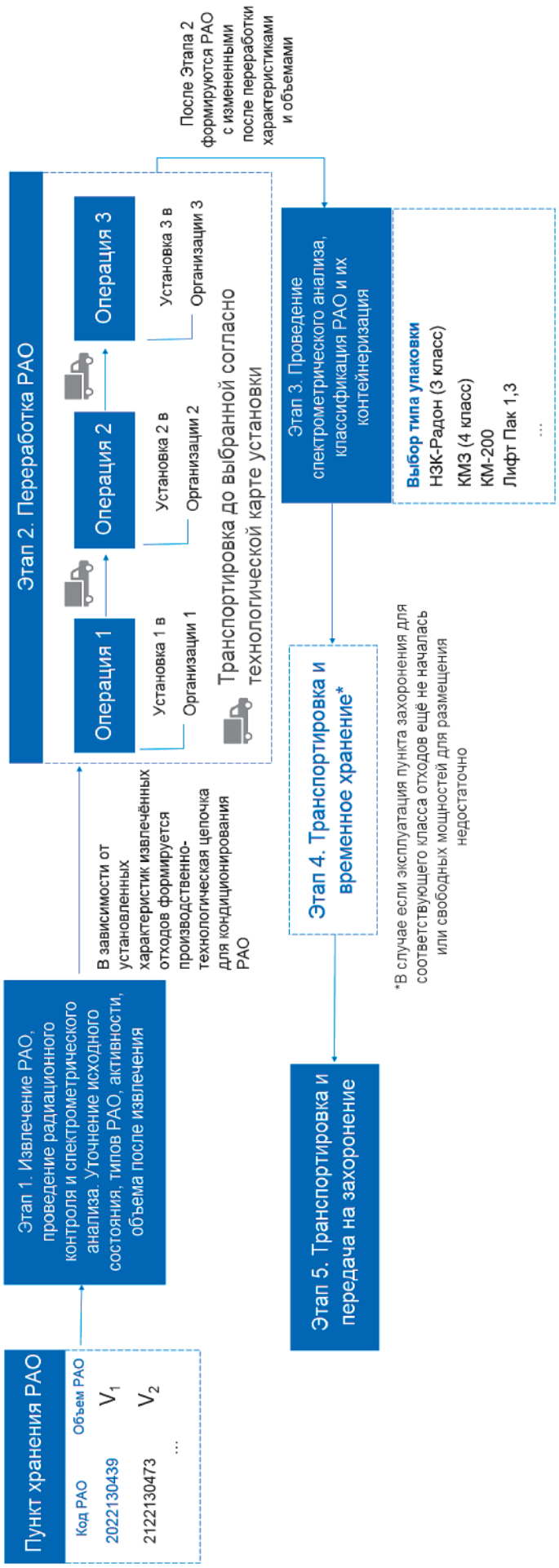


Рис. 1. Схема обращения с РАО для определения совокупной стоимости работ

что удельные активности РАО, извлеченных из одного ПХ, могут отличаться на порядки, как и доля радионуклидов, определяющих класс РАО. При этом зачастую на этапе планирования известна только средняя удельная активность РАО, находящихся в ПХ.

В зависимости от класса и типа РАО, с учетом требований по безопасности, подбирается тип упаковки для их изоляции. У каждой из них свои характеристики по внешнему и внутреннему объему контейнера, а также средние параметры его заполняемости. Прогнозы образования отходов и их параметры, а также характеристики упаковки позволяют оценить необходимое количество закупаемых контейнеров для размещения образовавшихся отходов и рассчитать совокупный внешний объем всех упаковок. Общие затраты на контейнеризацию оцениваются исходя из закупочной (рыночной) стоимости одного контейнера соответствующего типа, а также стоимости операции его загрузки РАО.

Затраты на этапах 4 и 5 определяются исходя из брутто-объема упаковки. Затраты на транспортировку (автомобильным или железнодорожным транспортом) определяются с учетом объема перевозки и расстояния между пунктами отправки и назначения. Расценки устанавливаются транспортной компанией, которую предполагается привлечь для перевозки, или внутренними расценками организации, выполняющей контракт (если имеются собственные мощности). Затраты на временное хранение РАО оцениваются с учетом тарифа (руб./м^3 год) организации, принимающей РАО на временное хранение. Стоимость передачи на захоронение РАО определяется с учетом тарифов, устанавливаемых Федеральной антимонопольной службой [6].

В результате, на основании описанной процедуры формирования общих затрат на обращение с РАО, определены основные источники неопределенности финансово-экономической модели:

1. Отсутствие информации о параметрах отходов, размещенных в ПХ, или различия между фактическими и закладываемыми в сметный расчет параметрами отходов (тип, состояние, категория), активности и объемом.
2. Отклонение фактического состава операций по обращению с РАО от запланированного по причине несоответствия реальных и предполагаемых параметров отходов.
3. Неопределенности (вариация) коэффициентов, характеризующих изменение объемов и параметров отходов до и после операции по обращению с РАО.
4. Разброс удельной активности образующихся РАО перед этапом кондиционирования.
5. Неопределенность содержания радионуклидов в РАО (радионуклидный состав), что усложняет процедуру прогнозирования объемов образования РАО по классам.
6. Вариация показателя заполняемости контейнеров, следовательно, и неточности при расчете количества необходимой упаковки для изоляции РАО.
7. Неопределенность в количестве рейсов и железнодорожных составов при осуществлении перевозки отходов.
8. Риск задержки ввода в эксплуатацию мест захоронения РАО или отсутствие на полигоне свободных мощностей, что приведет к дополнительным затратам на временное хранение.
9. Вариация стоимости ресурсов и затрат на операции (рыночные и финансовые риски).
10. Изменение ценности денег во времени, что актуально для долгосрочных проектов, в которых необходимо учитывать процентные и инфляционные риски.

Применение вероятностно-статистических методов для оценки совокупной стоимости работ в условиях наличия различного рода рисков и неопределенности исходных данных

Входные параметры для расчетов на этапе планирования могут быть определены неточно, в результате чего получить конкретную обоснованную оценку стоимости работ невозможно. В связи с этим целесообразно применить вероятностно-статистические методы для учета неопределенностей и получения интервальных стоимостных оценок с заданной вероятностью.

В рамках настоящей статьи анализ неопределенностей предполагается проводить на основе моделирования методом Монте-Карло (Monte-Carlo Simulation) [7], который позволяет для математической модели с неопределенными значениями входных параметров, задавая вероятностные распределения этих параметров и при необходимости связи между ними (корреляцию), получить возможные распределения экономических оценок. Для этого набор факторов, влияющих на результирующий показатель, необходимо генерировать большое число раз по установленным вероятностным законам. Полученный в рамках одной итерации набор значений подставляется в модель и фиксируется результат. В конечном итоге после проведения заранее установленного количества итераций образуется выборка, которая подвергается статистическому анализу: оценка распределения (функции и

Таблица 1. Метод генерации значений для различных факторов в модели оценки стоимости работ по обращению с РАО

Фактор модели	Закон распределения для генерации значений фактора в модели	Метод оценки параметров закона распределения
Удельные стоимости операций / расценки / тарифы	Равномерный закон распределения с параметрами $U(a; b)$	a — ожидаемая стоимость работ – 5 %; b — ожидаемая стоимость работ + 10 %
Радионуклидный состав или доля радионуклида, вносящего основной вклад при определении класса отходов	Равномерный закон распределения с параметрами $U(a; b)$	Параметры a и b определяются экспертным путем с учетом имеющейся технической документации и исторических справок о размещенных РАО
Доли отходов, кондиционируемых в рамках единого технологического процесса, если структура их соотношения по типам не определена однозначно	Предположим, что имеется k вариантов технологий для кондиционирования РАО. Для каждого из них на основе равномерного распределения $U(a_i; b_i)$, генерируется значение доли. Полученный набор значений нормируется для соблюдения ограничения по равенству сумме долей 1	Параметры a_i и b_i, характеризующие диапазон доли РАО, которые кондиционируются согласно i-й технологии, определяются экспертным путем с учетом имеющейся технической документации и исторических справок о размещенных РАО
Коэффициенты изменения объема отходов после операции	Равномерный закон распределения $U(a; b)$ или логнормальный — с параметрами $\log N(m;\sigma)$	Для равномерного закона a — минимальное значение, b — максимальное значение параметра, определенные экспериментальным путем; для логнормального (если распределение ассиметрично) параметры m и σ находят методом моментов для определенных экспериментальным путем значений доверительных интервалов распределения коэффициентов с заданной вероятностью
Процент заполняемости контейнеров	Равномерный закон распределения с параметрами $U(a; b)$	Параметры a и b определяются на основе экспериментальных данных
Распределение объемов отходов по удельной активности на этапе контейнеризации	Логнормальный закон с параметрами $\log N(m;\sigma)$ или подбор другого распределения из семейства гамма-распределений	m — натуральный логарифм средней удельной активности РАО в ПХ согласно технической документации; σ — среднеквадратическое отклонение для логнормального распределения, оцениваемое на базе анализа работ на аналогичных объектах

плотности), отклонений, математического ожидания, доверительных интервалов и т. д.

Основной сложностью при реализации данного метода является выявление законов распределения для генерации значений варьируемых параметров. В табл. 1 представлены некоторые рекомендации по подбору законов распределения, сформированные на основе анализа практического опыта работ по обращению с РАО и некоторых гипотез.

Интервальная оценка затрат на выполнение работ по обращению с РАО на примере площадки ФГУП «РАДОН» (г. Сергиев Посад) для варианта «удаление РАО»

Согласно данным первичной регистрации радиоактивных отходов и установления мест их размещения, проводимой в 2013—2014 гг. по дополнительному соглашению в рамках Государственного контракта № Н.4п.23.12.08.147 от 19.02.2008 «Инвентаризация состояния ядерно и радиационно опасных объектов и выработка технических решений в отношении объектов атомной отрасли» (далее — Первичная регистрация), на площадке ФГУП «РАДОН» расположены следующие пункты хранения РАО: хранилища ХТО № 1—36, хранилища скважинного типа СБД-1 и СБД-2, сооружение БЖ (блок емкостей для ЖРО), здание № 69 и сооружение 103. Общий объем РАО, находящихся в перечисленных ПХ на момент проведения Первичной регистрации (2013—2014 гг.), составляет около 130,3 тыс. м^3. К 2020 году в рамках выполнения работ по мероприятию «8.1. Безопасное удаление радиоактивных отходов из пунктов хранения, подготовка к захоронению, транспортировка к пункту захоронения и захоронение» Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016—2020 годы и на период до 2030 года» (далее — ФЦП ЯРБ-2) из пунктов хранения ФГУП «РАДОН» частично извлечены и приведены к критериям приемлемости для захоронения накопленные РАО, в том числе около 1410 м^3 РАО из сооружения БЖ (работы по госконтрактам Д.4ш.244.20.18.1062 от 14.12.2018 и Д.4ш.244.20.18.1021 от 06.03.2018), а также удалены РАО из ХТО № 2.

Большой массив данных о площадке ФГУП «РАДОН» (г. Сергиев Посад) был получен в

результате построения интегральной информационной модели площадки, включающей 3D-модели объектов и трехмерную детализированную гидрогеологическую модель площадки [8].

Данная площадка представляет большой интерес для анализа эффективности различных вариантов обращения с накопленными РАО, ввиду того что, согласно Первичной регистрации, размещенные на ней отходы имеют статус «решение отложено до 2030 г.». В рамках настоящей статьи представлен расчет стоимости удаления РАО с площадки ФГУП «РАДОН» (г. Сергиев Посад) для хранилищ ХТО № 1—36, хранилищ скважинного типа СБД-1 и СБД-2, сооружения БЖ (блок емкостей для ЖРО). Для реализации описанного выше алгоритма в качестве исходных данных используются значения, представленные в табл. 2 [9].

Таблица 2. Входные параметры для моделирования и приблизительные диапазоны их варьирования (стоимостные показатели в ценах 2019 года) [9]

Распределение объемов РАО по типам (по звеньям ПТЦ)	
Распределение РАО по типам для соответствующих ПТЦ*	**Интервал**
ХТО № 1–29, 36	
Доля извлеченных из ПХ неметаллических РАО	70–85 %
Доля извлеченных из ПХ металлических РАО, в том числе:	15–30 %
направляемых на фрагментацию и прессование	5–15 %
направляемых на прессование	70–90 %
направляемых на переупаковку	5–15 %
Сооружение БЖ	
Доля извлеченной из ПХ мазутной фазы	15–30 %
Доля извлеченных из ПХ ЖРО	15–20 %
Доля извлеченных из ПХ ТРО	50–70 %
ХТО № 30–34	
Доля извлеченных из ПХ РАО в 200-литровых бочках	15–30 %
Доля извлеченных из ПХ РАО в контейнерах, в том числе:	70–85 %
в исправной таре	85–95 %
в таре, подлежащей ремонту	2–5 %
в неисправной таре	3–10 %
Стоимость операций по обращению с РАО, без НДС	
Операция	**Удельн. стоим., тыс. руб./м³**
Извлечение ТРО	4–88,5
Сортировка	10–12,5
Контрольные измерения (взвешивание, дозиметрические измерения, отбор проб и прочее)	0,5–1,4
Упаковка (контейнеризация)	8–10

Окончание таблицы 2

Операция	**Удельн. стоим., тыс. руб./м³**
Цементирование	55–75
Фрагментация	50–70
Прессование	8–20
Паспортизация	3–8
Ремонт контейнеров	9–11
Извлечение ТРО из скважин	8–9
Откачка мазутной фазы	25–29
Отбор проб и анализ мазутной фазы	6,5–7,5
Подготовка к сжиганию мазутной фазы	235–260
Паспортизация упаковок с мазутной фазой	0,8–0,9
Сжигание мазутной фазы	155–175
Кондиционирование водной фазы (цементирование)	60–75
Отбор и анализ проб	4–4,5
Упаривание ЖРО	6–6,5
Взвешивание контейнеров с твердой фазой	0,2
Дозиметрический контроль контейнеров	0,55–0,6
Спектрометрический контроль контейнеров	2,4–2,6
Кондиционирование твердой и жидкой фаз (цементирование)	39–45
Дезактивация наружных поверхностей контейнеров с кондиционированными РАО	0,4–0,5
Паспортизация упаковок с кондиционированными РАО из емкостей БЖ	9–11
Оформление актов приема-передачи упаковок РАО на хранение	0,5–0,6
Средние коэффициенты увеличения объема РАО для операций по переработке	
Коэффициент	**Значение**
КИО* для операции цементирования	1,3–1,5
КИО для операции омоноличивания методом цементирования	1,1–1,2
КИО для операции прессования	0,35–0,45
КИО для операции сжигания	0,025–0,035
КИО для операции упаривания	0,02–0,04
Стоимость контейнеров	
Название упаковки	**Стоимость, тыс. руб.**
Контейнеры типа НЗК-150-1,5П	222–272
Контейнеры типа КМЗ-РАДОН	158–194
100-литровые бочки	1,9–2,4
Доля радионуклидов в РАО, размещенных в ХТО	
Радионуклидный состав (в основном бета-излучающие и трансурановые радионуклиды) определен на основе изучения исторических справок о размещенных в ПХ отходах, диапазоны колебания процентного соотношения установлены по данным об извлеченных РАО из ХТО № 2 ФГУП «РАДОН» в 2018 г.	

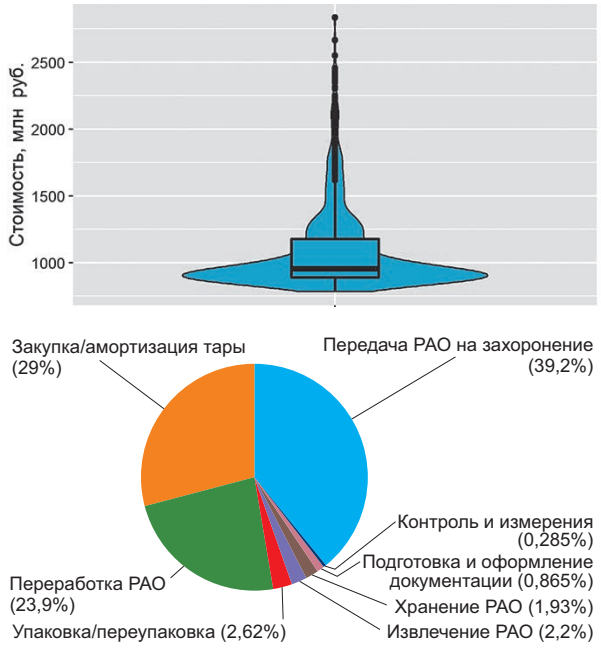
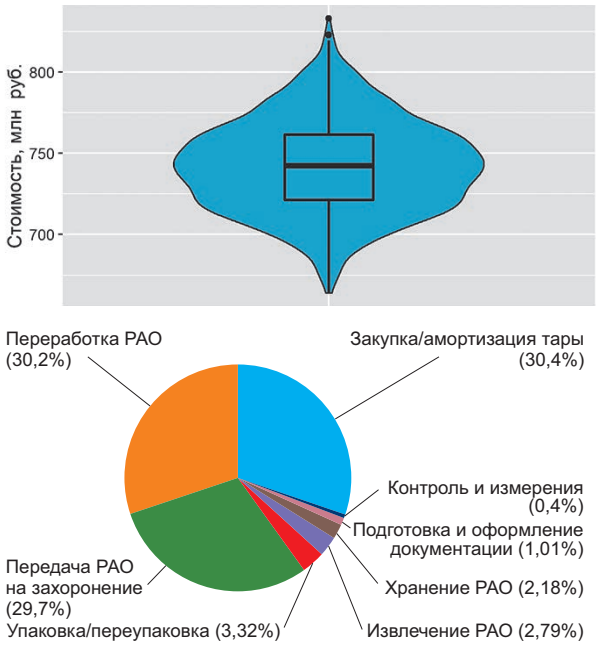
* ПТЦ — производственно-технологический цикл
* КИО — коэффициент изменения (увеличения) объема отходов

В качестве исходных данных для получения параметров распределения объемов контейнеризированных РАО по удельной активности использовались результаты, полученные по итогам их удаления из ХТО № 2 ФГУП «РАДОН». Разброс удельной активности среди контейнеров с извлеченными РАО составил от 26 до 19 000 Бк/г, с наибольшим количеством (около 85 %) — в диапазоне от 100 до 900 Бк/г. На основе этих данных оценен параметр σ для логнормального распределения, который с 95 %-й доверительной вероятностью варьируется в диапазоне от 0,8 до 1,4 с математическим ожиданием 1. Для моделирования распределения извлеченных из прочих ХТО ФГУП «РАДОН» РАО используется распределение $\log N(m; \sigma)$, где в качестве параметра m применяется натуральный логарифм от среднего значения удельной активности РАО в ПХ, а в качестве параметра σ — оцененное для ХТО № 2 значение.

В табл. 3 представлены результаты моделирования затрат на удаление РАО из ХТО № 8 и № 21 ФГУП «РАДОН» без учета НДС и иных отчислений. Ключевым фактором, влияющим на неопределенность результата, является близость средней удельной активности РАО к граничному значению их отнесения между классами. Коэффициент вариации для ХТО № 8 (средняя удельная активность РАО близка к границе классификации между 3 и 4 классами) составляет около 29,5 %, в то время как для ХТО № 21 (однозначно все извлеченные РАО будут отнесены к 4 классу) — около 5 %. Это обуславливается достаточно большой разницей в стоимости захоронения между классами (в 2020 году 158 тыс. руб./м^3 — для 3 класса и 49 тыс. руб./м^3 — для 4 класса), а также в соотношении внутреннего и внешнего объемов упаковки для изоляции различных классов отходов (у контейнера для размещения 3 класса РАО НЗК-150-1,5П внутренний объем — 1,5 м^3, внешний объем — 3,74 м^3, у контейнера для размещения 4 класса РАО КМЗ-РАДОН внутренний объем — 3,1 м^3, внешний объем — 3,835 м^3), что влияет на итоговый объем РАО, передаваемых на захоронение (тариф оценен на 1 м^3 внешнего объема упаковки). Доля затрат на передачу РАО на захоронение и закупку контейнеров для медианных сценариев для ХТО № 8 составляет ~ 70 %, а для ХТО № 21 — ~ 60 %.

В результате совокупная стоимость удаления РАО с площадки ФГУП «РАДОН» (хранилища ХТО № 1—36 (кроме ХТО № 2), хранилища

Таблица 3. Сравнение результатов моделирования стоимости* удаления РАО из ХТО № 8 и № 21, в ценах 2019 года

ХТО № 8	ХТО № 21
	
Ожидаемая стоимость удаления – 1080 млн руб.	Ожидаемая стоимость удаления – 750 млн руб.
Среднеквадратическое отклонение стоимости – 320 млн руб.	Среднеквадратическое отклонение стоимости – 28 млн руб.
Доверительный интервал – 90 % от 838 до 1790 млн руб.	Доверительный интервал – 90 % от 700 до 800 млн руб.

*Без НДС и прочих отчислений

скважинного типа СБД-1 и СБД-2, сооружение БЖ) без НДС и различных отчислений с вероятностью 90 % составит от 28,2 до 67,5 млрд руб. в ценах 2019 года, математическое ожидание — 42,1 млрд руб. Полученный в условиях большой неопределенности исходных данных результат демонстрирует важность проведения предварительных работ по уточнению параметров и характеристик РАО в ПХ для повышения точности стоимостных оценок.

Представляется интересным и рассмотрение подходов к построению динамических моделей и экономического анализа различных сценариев вывода из эксплуатации ПХ на площадке ФГУП «РАДОН». Проанализируем сценарий удаления 2000 м^3 РАО в год начиная с 2030 года. В этом сценарии длительность удаления всех РАО из рассматриваемых ПХ составит около 70 лет. На рис. 2 представлено распределение затрат на обращение с РАО во времени для данного сценария.

Проведем стресс-тестирование данного сценария в части нагрузки на инфраструктуру по переработке и захоронению РАО. На рис. 3—5 представлена нагрузка на основные установки по переработке РАО (доверительные 90 %-е интервалы для объемов РАО, направляемых на установки). На установку прессования в среднем приходится от 300 до 500 м^3 в год за периоды 2030—2041 гг. и 2070—2103 гг. Пиковым является период 2042—2069 гг. (на ФГУП «РАДОН» размещена установка прессования «Суперкомпактор»).

На установку фрагментации в среднем приходится от 40 до 70 м^3/год РАО, при этом в пиковый период (2042—2069 гг.) нагрузка может возрастать до 100—120 м^3/год. На ФГУП «РАДОН» находятся 2 установки фрагментации РАО, годовые мощности которых составляют 250 и 740 м^3/год. На рис. 5 представлена нагрузка на установку цементирования, которая в среднем составляет 1500—2 500 м^3/год. Наибольшая нагрузка приходится на 2069—2070 гг., когда объем РАО, поступающих на переработку, достигает 3,3 тыс. м^3/год. Миниблочная растворосмесительная установка на ФГУП «РАДОН» имеет максимальную мощность 5 540 м^3/год, а с учетом

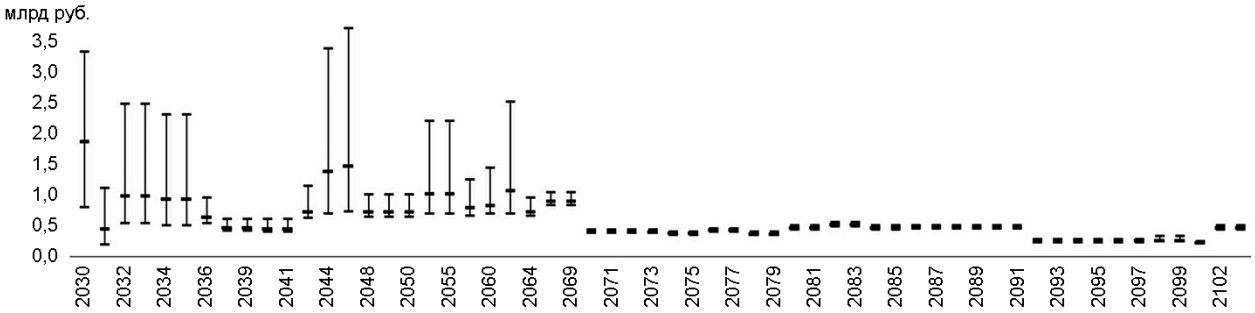


Рис. 2. Распределение затрат на удаление РАО с площадки ФГУП «РАДОН» (90 %-е доверительные интервалы)

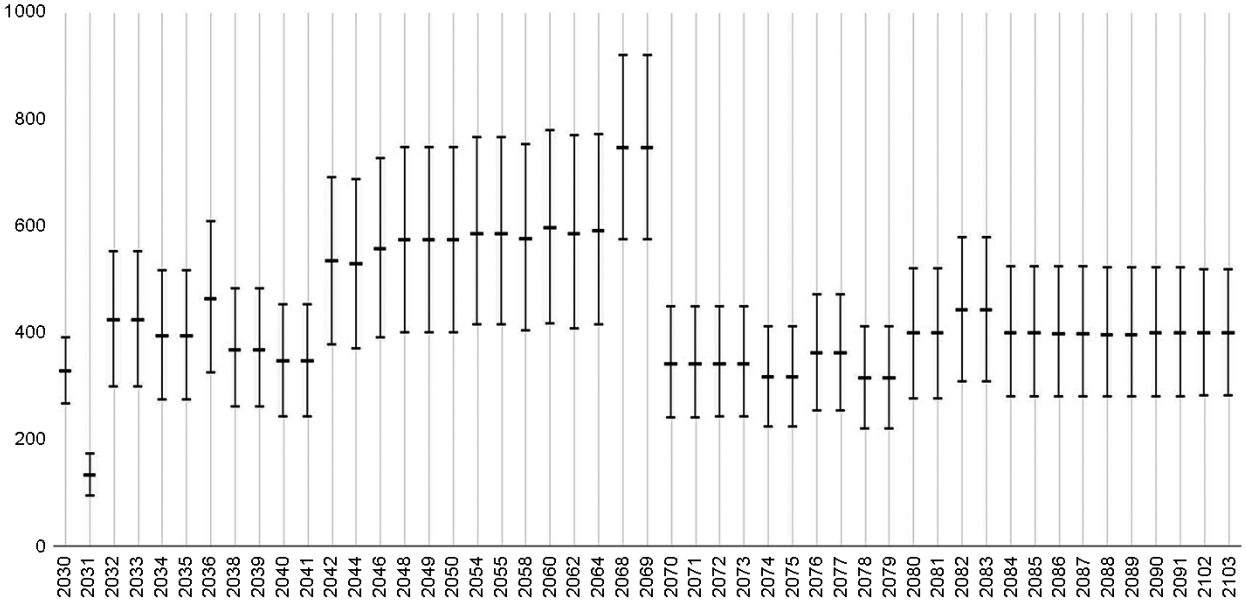


Рис. 3. Ожидаемая нагрузка на установку прессования по годам (м^3)

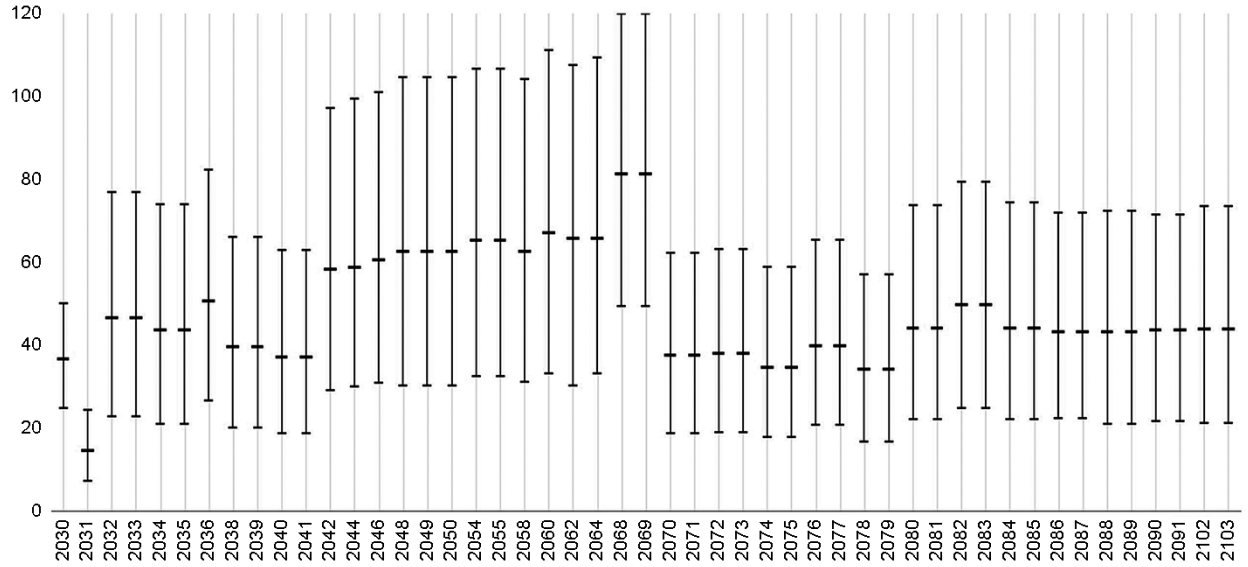


Рис. 4. Ожидаемая нагрузка на установку фрагментации по годам (м³)

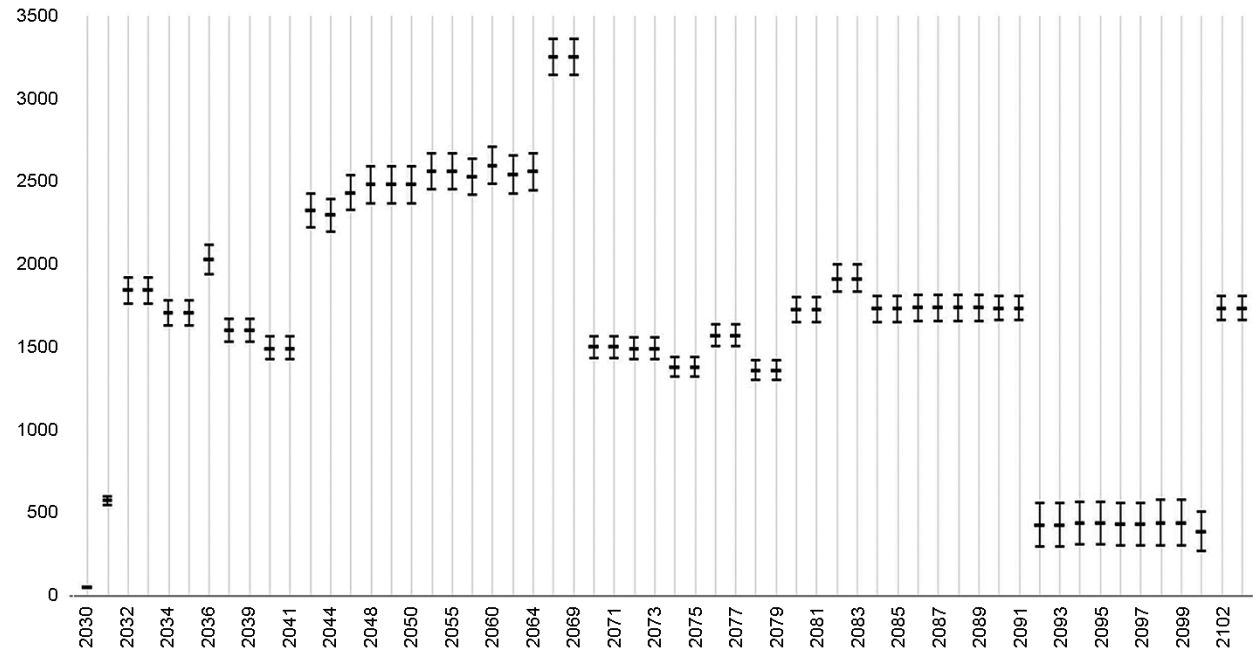


Рис. 5. Ожидаемая нагрузка на установку цементирования по годам (м³)

текущей загруженности — среднюю свободную мощность около 2500 м³/год. Таким образом, если у предприятия сохранятся текущие темпы выполнения работ по кондиционированию РАО на других площадках, то существует риск, что мощности установки будет недостаточно для переработки РАО, извлеченных из пунктов хранения площадки ФГУП «РАДОН». В результате, с учетом проведенного стресс-тестирования нагрузки на инфраструктуру, следует сделать вывод, что на период 2040—2070 гг. целесообразно подкорректировать план по удалению РАО.

Результаты расчетов объемов РАО для передачи на захоронение представлены на рис. 6. За период 2030—2100 гг. на захоронение будет передано (ожидаемое значение) брутто-объема около 150 тыс. м³ РАО 4 класса и 25 тыс. м³ РАО 3 класса. Для кондиционирования извлекаемых РАО необходимо в среднем около 700 шт. контейнеров КМЗ-РАДОН и 200 шт. НЗК в год. В случае принятия решения об удалении РАО с площадки ФГУП «РАДОН» необходимо будет учитывать эти объемы при сооружении новых пунктов захоронения.

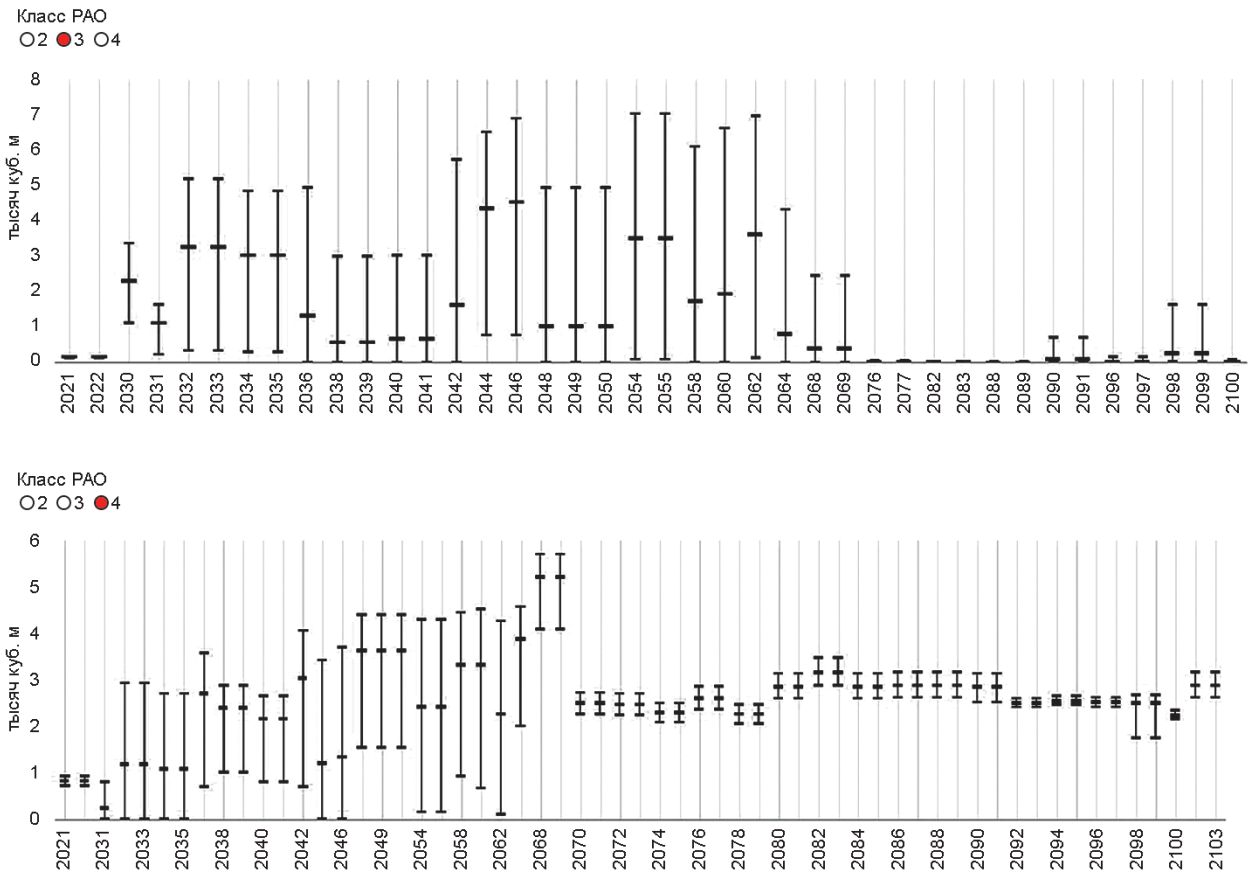


Рис. 6. Прогноз образования отходов для передачи на захоронение по классам (м³)

Заключение

Используемые в рамках исследования подходы к финансово-экономическому планированию в условиях неопределенности исходных данных, базирующиеся на моделировании методом Монте-Карло, позволяют провести обоснованные интервальные оценки:

- стоимости работ по обращению с РАО;
- нагрузки на инфраструктуру по переработке РАО (объем отходов, которые необходимо переработать с применением конкретной установки или технологии);
- количества закупаемых контейнеров по типам для захоронения;
- объема упакованных РАО для захоронения по классам.

Представленные в рамках настоящей работы результаты демонстрируют высокую чувствительность общих затрат на обращение с РАО к их исходным параметрам, в частности радионуклидному составу, что позволяет сделать вывод о важности проведения дополнительных исследований для уточнения их исходных параметров для минимизации неопределенностей перед финансово-экономическим планированием.

Полученные результаты статистического анализа оценки стоимости удаления РАО для конкретных пунктов хранения и динамического моделирования целесообразно использовать для проведения стресс-тестирования достаточности инфраструктуры по переработке и для захоронения РАО, а также для планирования их развития в будущем.

Литература

1. *Lokhov A., Urso M. E., Cameron R.* OECD/NEA study: on The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle. 2013. 193 p. DOI: 10.1051/jtsfen/2013lev02. — URL: https://www.semanticscholar.org/paper/OECD%2FNEA-study%3A-Economics-of-the-Back-end-of-the-Lokhov-Urso/097714f751675a0bd23ddaced398d38e614c32d9#related-papers.

2. OECD Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants / OECD. — 2016. — 260 p.

3. IAEA Cost Considerations and Financing Mechanisms for the Disposal of Low and Intermediate Level Radioactive Waste / IAEA. 2007. 46 p. — URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1552_web.pdf.

4. IAEA Data Analysis and Collection for Costing of Research Reactor Decommissioning / IAEA. 2017.

126 p. — URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1832_web.pdf.

5. Постановление Правительства РФ от 19 октября 2012 г. № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов».

6. Приказ Федеральной антимонопольной службы от 28 декабря 2017 года № 1812/17 (с изменениями на 15 ноября 2018 года) «Об установлении тарифов на захоронение радиоактивных отходов классов 1, 2, 3, 4, 6 на период с 2018 по 2022 годы и тарифов на захоронение радиоактивных отходов класса 5 на 2018 год».

7. *Михайлов Г. А., Войтишек А. В.* Статистическое моделирование. Методы Монте-Карло : учебное пособие для бакалавриата и магистратуры. – М. : Юрайт, 2018. 371 с.

8. *Лужецкий А. В., Невров Ю. В., Ведерникова М. В. и др.* О создании интегральной информационной модели для определения стратегии развития промышленного комплекса по обращению с радиоактивными отходами ФГУП «РАДОН» // Радиоактивные отходы. 2020. № 1 (10). С. 101—112. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-101-112.

9. *Ильясов Д. Ф., Иванов А. Ю., Кузнецова Е. О. и др.* Сравнительный анализ стоимости операций по обращению с РАО на российском и международном рынках // Радиоактивные отходы. 2020. № 4 (13). С. 14—21. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-14-21.

Информация об авторе

Ильясов Дамир Фатович, кандидат экономических наук, научный сотрудник, Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН (115191, Москва, Большая Тульская ул., д. 52), e-mail: idf@ibrae.ac.ru.

Библиографическое описание статьи

Ильясов Д. Ф. Методы оценки стоимости обращения с радиоактивными отходами в условиях неопределенности исходных данных // Радиоактивные отходы. 2022. № 1 (18). С. 16—27. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-1-16-27.

METHODS OF RADIOACTIVE WASTE MANAGMENT COSTS ESTIMATION UNDER INITIAL DATA UNCERTAINTY

Ilyasov D. F.

Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Article received on December 24, 2021

When plans are developed regarding further management of RW generated by nuclear sector, it appears quite hard to forecast the cost associated with the removal of the accumulated waste categorized as removable RW according to the Federal law № 190 On Radioactive Waste Management which is currently seen as a big challenge. Primary this is due to the limited initial data on the radioactive waste placed into storage facilities a long time ago. In this regard, this study aims to develop and test methods that can be used to assess the cost of radioactive waste management given the initial data uncertainty. Therefore, it presents a generalized financial and economic model providing cost assessment at various stages of RW management and identifies the parameters having the greatest impact on it. It

also describes an approach that can be used to evaluate the uncertainties and to calculate the interval estimated radioactive waste management costs with given probabilities based on the Monte Carlo method. The discussed methods have been tested based on a case study that involved cost assessment for waste removal from the site of the Federal State Unitary Enterprise RADON (Sergiev Posad) and its subsequent disposal.

Keywords: *radioactive waste, waste management, removal, disposal, cost, expenses, uncertainty, statistical analysis, Monte Carlo method.*

References

1. Lokhov A., Urso M. E., Cameron R. OECD/NEA study: on The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle. 2013. 193 p. DOI: 10.1051/jtsfen/2013lev02. — URL: https://www.semanticscholar.org/paper/OECD%2FNEA-study%3A-Economics-of-the-Back-end-of-the-Lokhov-Urso/097714f751675a0bd23ddaced398d38e614c32d9#related-papers.
2. OECD Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants / OECD. 2016. 260 p.
3. IAEA Cost Considerations and Financing Mechanisms for the Disposal of Low and Intermediate Level Radioactive Waste. IAEA. 2007. 46 p. — URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1552_web.pdf.
4. IAEA Data Analysis and Collection for Costing of Research Reactor Decommissioning. IAEA. 2017. 126 p. — URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1832_web.pdf.
5. Government Decree of the Russian Federation of October 19, 2012 No. 1069 "On Criteria Used to Categorize Solid, Liquid and Gaseous Waste as Radioactive Waste, Criteria Used to Categorize Radioactive Waste as Non-Removable Radioactive Waste and Removable Radioactive Waste and Criteria for Removable Radioactive Waste Classification". (In Russian).
6. Order of the Federal Antimonopoly Service of December 28, 2017 No. 1812/17 (as amended on November 15, 2018) "On the Disposal Tariffs for Radioactive Waste of Classes 1, 2, 3, 4, 6 Approved for 2018—2022 and Disposal Tariffs for Radioactive Waste of Class 5 for 2018". (In Russian).
7. Mikhailov G. A., Voytishek A. V. *Statisticheskoye modelirovaniye. Metody Monte-Karlo : Uchebnoye posobiye* [Statistical Modeling. Monte Carlo Methods: Textbook]. 1st ed. Moscow, Yurayt Publ., 2018. 371 p.
8. Luzhetsky A. V., Nevrov Yu. V., Vedernikova M. V. et al. O sozdanii integral'noy informatsionnoy modeli dlya opredeleniya strategii razvitiya promyshlennogo kompleksa po obrashcheniyu s radioaktivnymi otkhodami FGUP «RADON» [Development of an Integral Digital Model of FSUE "RADON" Radioactive Waste Management Facility for Strategic Decision-Making]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2020, no. 1 (10), pp. 101—112. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-1-101-112.
9. Ilyasov D. F., Ivanov A. Yu., Kuznetsova E. O., Budunova A. S., Stepanyan P. O., Mikhailenko A. A. Sravnitel'nyy analiz stoimosti operatsiy po obrashcheniyu s RAO na rossiyskom i mezhdunarodnom rynkakh [Comparative Cost Analysis of Radioactive Waste Management Operations in the Russian and International Markets]. *Radioaktivnyye otkhody — Radioactive Waste,* 2020, no. 4 (13), pp. 14—21. DOI: 10.25283/2587-9707-2020-4-14-21.

Information about the author

Ilyasov Damir Fatovich, PhD in economics, Scientific Researcher, Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (52, Bolshaya Tulskaya st., Moscow, 115191, Russia), e-mail: idf@ibrae.ac.ru.

Bibliographic description

Ilyasov D. F. Methods of Radioactive Waste Managment Costs Estimation under Initial Data Uncertainty. *Radioactive Waste,* 2022, no. 1 (18), pp. 16—27. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-1-16-27. (In Russian).