

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи



БОЧКАРЕВ Валерий Вячеславович

Метод и алгоритмы поддержки принятия решений
на заключительных стадиях жизненного цикла
объектов использования атомной энергии

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации,
статистика (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

**Научный
руководитель**

Крянев Александр Витальевич
д.ф.-м.н., профессор, профессор каф.
Прикладной математики

Официальные оппоненты:

Ванина Елена Александровна
д.ф.-м.н., профессор

Ученый секретарь, ФГУП «Радон»
Государственная корпорация «Росатом»

Кореньков Владимир Васильевич
д.т.н., профессор

Научный руководитель Лаборатории
информационных технологий, ОИЯИ

Тихоновский Владислав
Леонидович, к.т.н

Первый заместитель генерального
директора, группа ГК АО «Неолант»

Защита состоится «25» декабря 2024 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета МИФИ.2.03 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское шоссе, 31).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <https://ds.mephi.ru> федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ».

Автореферат разослан « » 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета МИФИ.2.03

 /Климанов С.Г./

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одной из особенностей современного этапа развития атомной отрасли как в Российской Федерации, так и во всем мире является устойчивая тенденция увеличения числа объектов использования атомной энергии (ОИАЭ), достигающих заключительных стадий их жизненного цикла – эксплуатации в режиме окончательного останова и вывода из эксплуатации. В ближайшие годы предприятиям отрасли предстоит выполнить большой объем работ по подготовке к выводу и выводу из эксплуатации множества ОИАЭ различных категорий (блоков атомных станций, исследовательских реакторов, объектов ядерно-топливного цикла и др.), нормативный (проектный) срок эксплуатации которых истек или истекает в связи с исчерпанием ресурса их систем (элементов) либо по иным причинам.

Как правило, подготовка к выводу и вывод из эксплуатации ОИАЭ связаны с выполнением большого объема работ разнообразных видов (в том числе с обращением с радиоактивными отходами (РАО)) в условиях их взаимного влияния друг на друга, с применением сложных технологий и оборудования. Такие работы, наряду с высокой трудоемкостью и значительными затратами материально-технических и финансовых ресурсов на их проведение, сопряжены с радиационными опасностями для окружающей среды, населения и выполняющего работы персонала. В соответствии с положениями Федерального закона ФЗ-170 «Об использовании атомной энергии» (170-ФЗ), вывод из эксплуатации является одним из видов деятельности в области использования атомной энергии, подлежит лицензированию и должен выполняться в строгом соответствии с требованиями безопасности, содержащимися в федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии. Выполнение этих требований основано на подготовке, обосновании, принятии и реализации управленческих решений, как организационных,

так и технических, обеспечивающих безопасный вывод из эксплуатации ОИАЭ и связанное с ним обращение с РАО с минимально возможными затратами ресурсов. К таким решениям следует отнести прежде всего решения по выбору стратегии (варианта) вывода из эксплуатации, определению перечня планируемых организационных и технических мероприятий, последовательности и сроков их выполнения, применяемых при этом технологий и технических средств.

Необходимость управления множеством влияющих друг на друга специфичных производственных процессов при осуществлении вывода из эксплуатации требует обеспечения планирования и контроля выполнения работ с учетом их взаимосвязи и технологической последовательности на всех этапах. Задачи такого планирования включают как планирование и контроль стоимости и сроков работ, так и распределение ресурсов по времени и видам работ.

Основные виды процессов, осуществляемые при выводе из эксплуатации ОИАЭ:

- дезактивация и демонтаж (снос) оборудования, зданий, сооружений и строительных конструкций на площадке ОИАЭ;

- обращение с РАО, образующимися при выводе из эксплуатации;

- создание, при необходимости, дополнительных барьеров безопасности;

- реабилитация загрязненной территории площадки ОИАЭ.

Источниками опасностей при этом могут являться:

- активность отработавшего ядерного топлива;

- наведенная активность и загрязнение радионуклидами конструкционных материалов, оборудования и помещений ОИАЭ;
- наличие токсичных, пожароопасных и химически-активных веществ в технологических узлах и оборудовании ОИАЭ;
- неудовлетворительное техническое состояние оборудования, зданий и сооружений на площадке ОИАЭ к моменту начала работ по выводу из эксплуатации.

Накопленный к настоящему времени опыт выполнения проектов вывода из эксплуатации показывает, что реализация решений, основанных на экспертных оценках, на практике может приводить к негативным последствиям – вынужденному увеличению затрат, срыву плановых сроков завершения работ и другим. Основными причинами этого являются:

- важность учета погрешностей измерений, лежащих в основе исходных данных;
- трудности интерпретации, анализа и обработки больших объемов информации экспертами и согласования экспертных оценок в разных предметных областях.

Таким образом, задача принятия решений в области вывода из эксплуатации ОИАЭ является плохо формализуемой задачей принятия решений.

Необходимо более строгое математическое обоснование оптимальности разрабатываемых решений. Поскольку ОИАЭ и осуществляемые на ОИАЭ мероприятия по выводу из эксплуатации образуют сложную систему, решения по управлению которой приходится принимать в условиях критической зависимости результатов выполняемых расчетов от исходных данных об ОИАЭ и необходимости анализа больших объемов информации различной природы, то представляется целесообразным основывать поиск и обоснование таких решений на методах системного анализа, теории принятия решений, а также с применением системы поддержки принятия решений, реализуемой в виде программ для ЭВМ.

Цель диссертационной работы заключалась в разработке системного подхода к поддержке принятия решений по управлению выводом из эксплуатации и обращению с РАО на заключительных стадиях жизненного цикла ОИАЭ.

Для достижения поставленной цели в работе решается целый ряд задач, основные из которых представлены ниже.

1. Системный анализ совокупности мероприятий, осуществляемых при выводе из эксплуатации ОИАЭ и по обращению с РАО, разработка последовательности действий по подготовке управленческих решений, связанных с мероприятиями (процессами) вывода ОИАЭ из эксплуатации, а также разработка метода выбора оптимального решения.

2. Адаптация метода выбора оптимального варианта решения с учетом влияния погрешностей измерений при получении исходных данных и исследование полученного решения на устойчивость, разработка реализующего адаптированный метод алгоритма.

3. Проверка работоспособности разработанной последовательности действий, адаптированного метода и алгоритмов для поддержки принятия решений по выводу из эксплуатации ОИАЭ и обращению с РАО.

Ранее системы поддержки принятия оптимальных решений различной направленности рассматривались в работах О.И. Ларичева, Э.А. Трахтенгерца,

А.П. Еремеева, А.Б. Петровского, Г.В. Рыбиной, А.Ф. Сараева, О.В. Сизовой, П.В. Терелянского, Л.А. Трофимова и других авторов.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются процессы принятия управленческих решений, осуществляемые при выводе из эксплуатации

и обращении с РАО на заключительных стадиях жизненного цикла ОИАЭ. Предметом исследования являются вычислительные методы, алгоритмы и компьютерные программы, предназначенные для анализа и подготовки управленческих решений на заключительных стадиях жизненного цикла ОИАЭ.

Методы исследования. В работе использованы методы исследования операций, имитационного моделирования, теории оптимизации, статистические методы.

Научная новизна работы заключается в:

- разработке последовательности действий по подготовке управленческих решений при планировании, подготовке к выводу и выводе из эксплуатации ОИАЭ, а также при обращении с РАО;

- разработке процедур моделирования ОИАЭ и производственных процессов, осуществляемых в ходе вывода ОИАЭ из эксплуатации;

- разработке алгоритма выбора оптимального варианта решения с учетом результатов анализа решения на устойчивость;

- определении перечня факторов, характеризующих возможные варианты организационно-технических решений по выводу из эксплуатации и обращению с РАО.

Практическая значимость и реализация результатов работы

Теоретические и практические результаты работы использованы в целом ряде задач:

1. При разработке руководств по безопасности при использовании атомной энергии РБ-153-18 «Рекомендации по обоснованию выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии» (утв. приказом Ростехнадзора от 29.12.2018 № 666) и РБ-008-21 «Рекомендации по разработке концепции вывода из эксплуатации объекта использования атомной энергии» (утв. приказом Ростехнадзора от 30 июля 2021 г. № 265).

2. При разработке целого ряда программ для ЭВМ:

- 2.1 «Программное обеспечение выбора и анализа в динамическом режиме оптимального варианта процесса ВЭ ОИАЭ «Nuclear Dynamical Decommissioning Analysis («NDDA»)» (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021611627, 02.02.2021).

- 2.2 «Selection and stability of the optimal option for decommissioning a nuclear facility («SSOODNF»)» (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021612087, 11.02.2021).

- 2.3 «Программное обеспечение «Nuclear Decommissioning Alternative Modified Analysis («NDAMA»)» (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021663458, 17.08.2021).

- 2.4 «The program for selection and implementation of the temporary network schedule («SITNS»)» (Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021663476, 17.08.2021).

3. При проведении научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы по заказу ГК «Росатом» «Разработка системы поддержки принятия оптимальных решений (СППОР)», выполнявшейся в НИЯУ «МИФИ» по договору от 16.09.2019 № 313/1685-Д.

Основные положения, выносимые на защиту:

- последовательность действий по подготовке управленческих решений при осуществлении планирования, подготовки к выводу и выводу из эксплуатации ОИАЭ, а также при обращении с образующимися РАО, обеспечивающие их оптимальность и обоснованность;

- перечень факторов, характеризующих возможные варианты решений при осуществлении вывода ОИАЭ из эксплуатации и по обращению с РАО, обеспечивающих учет предъявляемых технико-экономических требований и требований ядерной и радиационной безопасности;

- адаптированный метод выбора оптимального варианта решения с учетом влияния неопределенности исходных данных и исследование полученных решений на устойчивость, обеспечивающие обоснование управленческих решений при осуществлении мероприятий по выводу из эксплуатации ОИАЭ и обращении с образующимися РАО.

Под «неопределенностью исходных данных» понимается:

- отсутствие численных оценок;

- неточность численных оценок (известны с погрешностью).

Источники «неопределенности исходных данных»:

- ограниченный объем обследований объекта, особенно задолго до вывода из эксплуатации;

- изменение значений параметров на протяжении эксплуатации объекта (в том числе за счет непредсказуемых аварий и нарушений);

- в процессе подготовки и принятия решений о выводе из эксплуатации, которые будут реализованы через много лет, используются прогнозные оценки исходных данных, точность которых снижается из-за погрешности прогнозирования.

Личный вклад автора

Разработана последовательность действий по формированию оптимального решения при осуществлении вывода из эксплуатации и обращении с образующимися РАО, предложен адаптированный метод выбора решения и исследование решения на устойчивость и, в рамках реализации адаптированного метода, разработаны алгоритмы расчета значений факторов возможных вариантов решений и их комплексной оценки.

Предложен перечень факторов возможных вариантов решений при осуществлении вывода из эксплуатации и обращению с образующимися РАО, разработан способ моделирования ОИАЭ и производственных процессов, осуществляемых в ходе вывода из эксплуатации.

При непосредственном участии автора создан ряд программ для ЭВМ, использованных для апробации разработанных автором последовательности действий, адаптированного метода и алгоритмов для поддержки принятия решений по выводу из эксплуатации и обращению с РАО для реальных ОИАЭ.

Соответствие работы паспорту научной специальности (направленности).

Исследование в рамках диссертационной работы соответствует пунктам 3, 4, 5, 9, 10 специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика» (технические науки): «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации»; «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации»; «Разработка специального математического

и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации»; «Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов».

Апробация работы

Основные результаты исследований были представлены и обсуждались на ряде конференций и мероприятий различного ранга.

1. Всероссийская конференция с международным участием «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем» (Москва, РУДН, 2014, 2015, 2018 гг.).

2. «Научная сессия НИЯУ МИФИ» (Москва, НИЯУ МИФИ, 2014, 2015 гг.).

3. Круглый стол «Оптимизация решений по безопасности при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии» (Госкорпорация «Росатом» совместно с ИБРАЭ РАН, 27–29 мая 2015 г.).

4. Международная научно-практическая конференция «Чернобыль – 30 лет спустя» (Санкт-Петербург, 14 апреля 2016 г.).

5. Научно-технический совет ФБУ «НТЦ ЯРБ» «Научно-методическое сопровождение мероприятий федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016 – 2020 годы и на период до 2030 года» (Москва, 17 ноября 2016 г.).

6. 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT) (Москва, 5-9 ноября 2018 г.).

7. VI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛАПЛАЗ-2020». (Москва, 2020 г.).

8. International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM) (USA, 2021).

9. AIP Conference Proceedings «Mathematical Model for Selecting the Optimal Option of Technological Processes for Decommissioning Nuclear Power Facilities Using the Monte Carlo Method», 2023.

Публикации. По теме диссертации имеется 26 публикаций. Основные результаты исследования опубликованы в 8 статьях в журналах из списка ВАК, 2 статьях списка Scopus и 18 публикациях в сборниках трудов конференций, препринтах и разделах монографий.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, библиографического списка из 75 наименований и двух приложений. Полный объем диссертационной работы составляет 126 страниц, включая 14 рисунков и 26 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований по теме диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, приведены научная новизна, практическая значимость результатов работы, положения, выносимые на защиту, личный вклад автора, апробация и публикации результатов работы.

В первом разделе рассмотрены требования нормативно-правовых актов в области использования атомной энергии к планированию, подготовке к выводу и выводу из эксплуатации ОИАЭ, а также к обращению с образующимися РАО (НП-091-14, НП-012-16, НП-001-15 и др.). Нормативно-правовые акты включают, в том числе, требования безопасности, выполнение которых предполагает принятие эксплуатирующей организацией управленческих решений и представление их в документах планирования вывода из эксплуатации на всем протяжении полного жизненного цикла ОИАЭ. Согласно положениям нормативно-правовых актов, в Российской Федерации принят подход к планированию, подготовке и осуществлению вывода из эксплуатации, представленный на рис. 1.

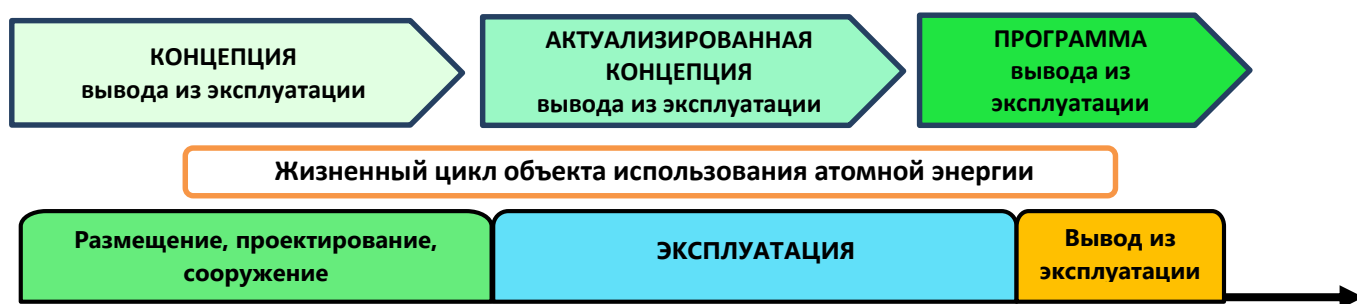


Рис. 1. Документы планирования вывода из эксплуатации, разрабатываемые в течение полного жизненного цикла ОИАЭ (подход РФ)

На ранних стадиях жизненного цикла (размещение, проектирование, сооружение) должна быть разработана концепция вывода из эксплуатации.

На стадии эксплуатации ОИАЭ должны быть обеспечены сбор, документирование и хранение в базе данных по выводу из эксплуатации ОИАЭ информации, важной для обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации, и актуальное состояние концепции вывода из эксплуатации.

На заключительных стадиях жизненного цикла ОИАЭ обеспечивается выполнение мероприятий и работ по подготовке к выводу и выводу из эксплуатации.

К планированию при подготовке к выводу из эксплуатации ОИАЭ относятся:

- разработка программы вывода из эксплуатации, содержащей в том числе перечень и сроки проведения основных мероприятий, последовательность и график выполнения этапов работ по выводу из эксплуатации;

- проведение комплексного инженерного и радиационного обследования ОИАЭ и актуализация программы вывода из эксплуатации;

- разработка проектной документации вывода из эксплуатации ОИАЭ, где предусмотрены в том числе конкретные виды работ по выводу из эксплуатации, последовательность и технологии их выполнения, необходимые людские, финансовые и материально-технические ресурсы.

На стадии вывода из эксплуатации предусмотрено уточнение программы вывода из эксплуатации, если радиационная обстановка препятствует безопасному и своевременному выполнению работ.

В отношении обращения с РАО, образующимися при выводе из эксплуатации, следует отметить, что обращение с РАО является, как показывает практика, одним из наиболее затратных и наиболее опасных с точки зрения радиационного фактора производственным процессом. При этом необходимость обеспечения радиационной безопасности при обращении с РАО не ограничивается временными рамками проекта вывода из эксплуатации ОИАЭ, а распространяется на весь период потенциальной опасности РАО – речь идет о защите в том числе и будущих поколений. Этим объясняется особая важность управленческих решений по обращению с такими РАО. Масштабность возможных негативных последствий при принятии ошибочных решений определяет необходимость в рамках настоящей работы более детального рассмотрения этого процесса, образующего самостоятельный технологический цикл, сопряженный с жизненным циклом ОИАЭ.

Согласно ст. 3 170-ФЗ, РАО относятся к объектам использования атомной энергии. Понятие стадий обращения с РАО в 170-ФЗ и иных нормативно-правовых актов явно не определено, однако основными общепринятыми среди них являются сбор и сортировка, кондиционирование, хранение, транспортирование и захоронение.

Требования к обращению с РАО при выводе из эксплуатации ОИАЭ установлены в НП-091-14, НП-058-14, НП-019-15, НП-020-15, НП-093-14, НП-055-14, НП-069-14. В них установлена необходимость радиационного контроля всех образующихся при выводе из эксплуатации материалов, отделения РАО от нерадиоактивных отходов, обеспечения физической защиты, учета и контроля РАО, находящихся на временном хранении в помещениях и на площадке ОИАЭ, общие и конкретные требования безопасности при обращении с удаляемыми и особыми РАО, с жидкими и твердыми радиоактивными отходами при их сборе, переработке, хранении, кондиционировании; установлены критерии приемлемости РАО для захоронения, требования безопасности при их захоронении и к пунктам захоронения.

Наряду с особенностями российской нормативно-правовой базы, в первом разделе приведен обзор отечественного опыта организации вывода из эксплуатации, а также связанного с ней обращения с эксплуатационными и образующимися при выводе из эксплуатации РАО. Рассмотрены подходы к организации такой деятельности эксплуатирующих организаций, относящихся к ведению Госкорпорации «Росатом», установленные в «Концепции вывода из эксплуатации ядерных установок, радиационных источников и пунктов хранения», утвержденной приказом Госкорпорации «Росатом» от 15.07.2014 № 1/645-П. Положения указанной «Концепции ...», детализируются в «Единых отраслевых методических указаниях по организации работ по выводу из эксплуатации объектов использования атомной энергии», утвержденных приказом Госкорпорации «Росатом» от 23.12.2019 № 1/1447-П. Основные требования, предъявляемые к решениям и мероприятиям на всех стадиях жизненного цикла ОИАЭ в интересах вывода из эксплуатации – снижение трудоемкости, коллективной дозы облучения и стоимости выполнения работ по выводу из эксплуатации и обращению с РАО. При этом дополнительно к установленным в федеральных нормах и правилах в области использования атомной энергии документам планирования предусмотрена разработка локальной концепции вывода из эксплуатации ОИАЭ и программы работ по выводу из эксплуатации ОИАЭ.

Цель локальной концепции – обоснование выбранного варианта вывода из эксплуатации и определение конечного состояния ОИАЭ после завершения работ по выводу объекта из эксплуатации. Для этого в ней отражают результаты выполнения следующих процедур:

- формирование возможных вариантов вывода из эксплуатации (на основе пяти так называемых «базовых» вариантов);
- определение этапов вывода из эксплуатации и выполняемых на них работ, оценка характеристик образующихся РАО;
- сравнительный анализ возможных вариантов вывода из эксплуатации по продолжительности работ, по расходам на содержание ОИАЭ за период вывода из эксплуатации, по затратам на вывод из эксплуатации;
- выбор варианта вывода из эксплуатации, описание конечного состояния по выбранному варианту (с указанием целевых показателей выполнения работ и критериев достижения конечного состояния). Следует отметить, что методические рекомендации не содержат однозначно определенных критериев выбора варианта вывода из эксплуатации – задача выбора методически не обеспечена.

Основной особенностью программы работ по выводу из эксплуатации ОИАЭ является структурирование работ по их основным видам:

- создание инфраструктуры вывода из эксплуатации (приобретение оборудования);
- демонтаж оборудования и инженерных систем;
- дезактивация систем и помещений;
- демонтаж (снос) строительных конструкций (зданий, сооружений);
- проведение промежуточных радиационных обследований;
- обращение с РАО, образующимися при выводе из эксплуатации;
- реабилитация территории;
- проведение заключительного обследования.

Наряду с отечественным, в первой главе рассмотрен зарубежный опыт организации вывода из эксплуатации ОИАЭ и обращению с РАО, отраженный в документах наиболее авторитетных международных организаций в этой области – Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) и Агентство по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ ОЭСР). В МАГАТЭ такой опыт аккумулирован в нормах безопасности МАГАТЭ «Вывод из эксплуатации установок, GSR часть 6» и «Вывод из эксплуатации атомных электростанций, исследовательских реакторов и установок ядерного топливного цикла, SSG-47», а в отношении обращения с РАО – в «Обращение с радиоактивными отходами перед захоронением, GSR часть 5» и «Захоронение РАО, SSR-5». В документах АЯЭ ОЭСР наибольший интерес представляют подходы, представленные в докладе «Подготовка к выводу из эксплуатации в ходе эксплуатации и после окончательного останова для вывода из эксплуатации, АЯЭ ОЭСР, № 7374».

Подход к планированию, подготовке и выводу из эксплуатации, принятый в МАГАТЭ, представлен на рис. 2.

Планирование вывода из эксплуатации начинается на этапе проектирования ОИАЭ, продолжается на протяжении всего жизненного цикла объекта и включает в себя, в том числе:

– подготовку первоначального плана вывода из эксплуатации («initial plan») и выбор стратегии вывода из эксплуатации (аналогичных отечественным концепции вывода из эксплуатации и выбранному варианту вывода из эксплуатации);

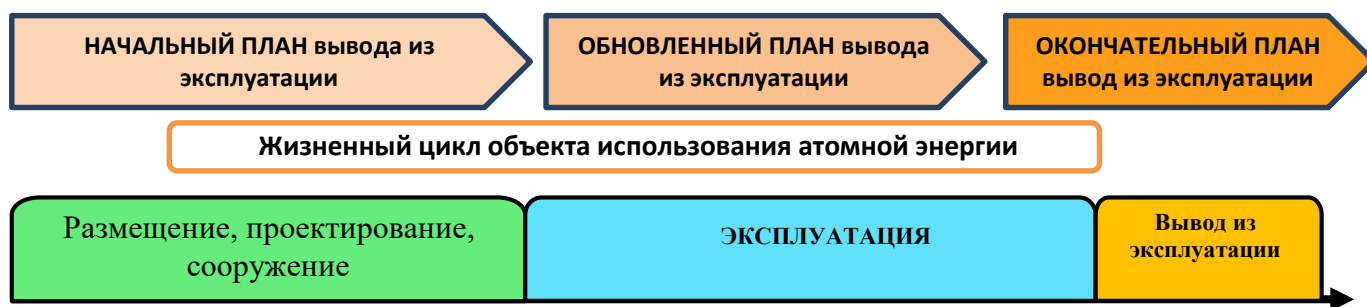


Рис. 2. Документы планирования вывода из эксплуатации, разрабатываемые в течение полного жизненного цикла ОИАЭ (подход МАГАТЭ)

– радиационное обследование ОИАЭ и подготовку окончательного плана вывода из эксплуатации («final plan»);

– оценку затрат на вывод из эксплуатации и определение обеспеченности проекта по выводу из эксплуатации финансовыми ресурсами.

Особенность подхода МАГАТЭ – акцент на требованиях актуальности планов вывода из эксплуатации на протяжении жизненного цикла ОИАЭ, проверки оптимальности выбранной стратегии вывода из эксплуатации и обеспечении достаточных финансовых ресурсов для реализации выбранной стратегии.

При планировании обращения с РАО внимание уделяется учету производительности существующих систем обращения с РАО и при необходимости заблаговременному строительству новых пунктов хранения и установок для переработки отходов.

В отношении требований безопасности, связанных с захоронением РАО всех типов, следует отметить подходы к выбору вариантов изоляции отходов – в соответствии с дифференцированным подходом, с учетом потенциальной опасности РАО и в соответствии с их классами.

Подход АЯЭ ОЭСР к планированию и подготовке к выводу из эксплуатации, основан на заблаговременном определении и обосновании стратегии вывода из эксплуатации, разрабатываемой как взаимоувязанная совокупность стратегий по отдельным направлениям деятельности:

- по обращению с ядерными материалами и отработавшим ядерным топливом;
- по обращению с материалами и отходами, в том числе с РАО;
- по реабилитации площадки;
- по демонтажу;
- модификации установки (адаптации инфраструктуры и систем обеспечения);
- технологическая стратегия,

а также стратегий организации управления выводом из эксплуатации и лицензирования.

Такой подход обеспечивает разделение процесса планирования и подготовки вывода из эксплуатации на отдельные подпроцессы еще на ранних стадиях жизненного цикла ОИАЭ, что является несомненным достоинством и стало причиной его внедрения в отечественную нормативную базу по выводу из эксплуатации при разработке, с участием автора, руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по разработке концепции вывода из эксплуатации объекта использования атомной энергии» РБ-008-21.

Анализ перечисленных подходов к выводу из эксплуатации ОИАЭ позволил сформировать перечень основных задач, решаемых при планировании, подготовке и выводе из эксплуатации ОИАЭ на протяжении полного жизненного цикла ОИАЭ, и решение которых требует обоснования и принятия управленческих решений.

Основными видами таких решений являются:

- выбор и обоснование выбранного варианта вывода из эксплуатации;
- разработка организационных и технических мероприятий по подготовке к выводу и выводу из эксплуатации, определение последовательности и сроков выполнения данных мероприятий;
- обоснование планируемых к применению технологий и технических средств.

Одним из условий, в которых приходится принимать перечисленные решения, является неопределенность исходных данных, а именно:

- результатов обследований площадки, технического состояния зданий и сооружений, систем (элементов) ОИАЭ, радиационной обстановки в помещениях, санитарно-защитной зоне и зоне наблюдения ОИАЭ;
- данных о нарушениях нормальной эксплуатации ОИАЭ (авариях), приведших к радиоактивному загрязнению площадки ОИАЭ;
- данных о проведенных ремонтах, заменах (демонтаже) элементов и систем, необходимых для вывода из эксплуатации ОИАЭ;
- данных о количестве и характеристиках накопленных РАО, о вместимости и свободных объемах пунктов хранения и хранилищ РАО на площадке ОИАЭ;
- результатов комплексного инженерного и радиационного обследования.

Другими потенциально важными особенностями принятия решений являются необходимость учета взаимного влияния мероприятий по подготовке к выводу и выводу из эксплуатации ОИАЭ и деятельности по эксплуатации иных ОИАЭ, расположенных на одной площадке или рядом с ней, на их безопасность, а также учета изменения со временем характеристик района и площадки размещения ОИАЭ.

С учетом изложенного, принятие решений в условиях неопределенности исходных данных, необходимости учета большого числа оказывающих на них влияние динамических факторов следует осуществлять с применением математических методов и алгоритмов, предназначенных для реализации в составе специализированных систем поддержки принятия решений.

На основе анализа современного уровня развития систем поддержки принятия решений сформулированы требования к методическому и математическому обеспечению специализированной системы поддержки принятия решений для вывода из эксплуатации ОИАЭ. Сделан вывод о том, что в основу построения такой системы целесообразно положить широко известный метод многофакторного

выбора оптимального варианта на конечном множестве альтернатив, обеспечив соответствующую адаптацию и доработку.

Во втором разделе на примере задачи по выбору варианта решений по выводу из эксплуатации ОИАЭ обосновывается перечень факторов, характеризующих возможные варианты решений, учитывающих предъявляемые к ним технико-экономические требования и требования ядерной и радиационной безопасности. Принятый принцип оценки возможных вариантов вывода из эксплуатации – соблюдение баланса между имеющимися ресурсами (финансовыми, материально-техническими, людскими и временными) и требованиями безопасности. Обоснована применимость такого подхода к другим принимаемым управленческим решениям, таким, например, как определение оптимальных схем обращения с РАО, оптимальных сценариев выполнения работ как в целом по проекту вывода из эксплуатации, так и в контексте отдельных этапов и даже отдельных видов производственных процессов (например, демонтажа, дезактивации), осуществляемых в отношении отдельных объектов, входящих в состав ОИАЭ. На основе оптимизированных таким образом схем и сценариев в дальнейшем формируются основные документы планирования – планы-графики выполнения работ, программа вывода из эксплуатации, проектная документация вывода из эксплуатации.

Сформулированы основные этапы решения задачи формирования оптимального управленческого решения (задачи принятия решения):

- формирование множества возможных вариантов решений и количественная оценка характеризующих их факторов;
- комплексная оценка каждого из возможных вариантов решений и предварительный выбор оптимального решения;
- исследование устойчивости предварительно выбранного варианта решения и окончательный выбор оптимального решения.

Первый этап включает следующие процедуры.

1. Анализ условий, в которых принимается решение, и требований к нему.
2. Подготовка перечней допущений и ограничений.
3. Определение перечня целевых показателей выполнения решения, а также критериев их выполнения.
4. Формирование возможных вариантов решений, основанное на подготовке различных сценариев реализации процессов вывода из эксплуатации (обращения с РАО). Структурными элементами сценария являются:
 - модель ОИАЭ (части ОИАЭ) (способ (процедура) моделирования основан на декомпозиции всего ОИАЭ и его площадки на образующие четырехуровневую иерархическую структуру, отдельные объекты и подобъекты, для которых в настоящей работе были разработаны типовые модели);
 - модели реализуемых на ОИАЭ (части ОИАЭ) производственных процессов (технологических операций) (предложенный способ (процедура) моделирования процессов и подготовки сценариев позволяет учитывать применяемые технологии, последовательность выполнения отдельных работ, место их выполнения, начальные и конечные состояния объектов, возможное взаимное влияние друг на друга осуществляемых производственных процессов).

5. Проверка выполнения установленных ограничений для сценариев и присвоение сценариям статуса возможных вариантов решений.

6. Количественная оценка факторов для каждого из возможных вариантов решений.

Поскольку при количественной оценке факторов в качестве исходных данных используются неизбежно имеющие погрешность значения параметров моделей ОИАЭ и входящих в их состав объектов и моделей реализуемых производственных процессов (технологических операций), то численные значения факторов возможных вариантов решений представляются в виде совокупности значений математического ожидания значений факторов и среднеквадратичного отклонения. Так, $K_{i,j}^p$ – фактор i -го вида (видами факторов являются «стоимость работ», «длительность работ» и «дозовая нагрузка на персонал») для p -го процесса, реализуемого по j -му сценарию, можно представить в следующем виде:

$$K_{i,j}^p = \{M(K_{i,j}^p); \sigma(K_{i,j}^p)\} \quad (1)$$

где $M(K_{i,j}^p)$ – значение математического ожидания $K_{i,j}^p$
 $\sigma(K_{i,j}^p)$ – значение среднеквадратичного отклонения $K_{i,j}^p$

Значения математического ожидания $M(K_{i,j}^p)$ и среднеквадратичного отклонения $\sigma(K_{i,j}^p)$, численно характеризующие фактор i -го вида возможного варианта решения (за исключением вида «длительность работ»), соответствующего j -му сценарию, рассчитывают по формулам:

$$M(K_{i,j}) = \sum_p M(K_{i,j}^p); \sigma^2(K_{i,j}) = \sum_p \sigma^2(K_{i,j}^p). \quad (2)$$

В качестве оценки значений математического ожидания и среднеквадратичного отклонения фактора «длительность работ» по заданному сценарию принимается полная (максимальная) продолжительность выполнения производственных процессов (технологических операций) по сценарию определенным с учетом продолжительности выполнения отдельных работ и их взаимозависимостей, применяя при этом метод критического пути.

Комплексная оценка каждого из возможных вариантов, их сопоставление и выбор оптимального проводится по результатам оценки значений их факторов и основывается на усовершенствованном варианте метода многофакторного выбора на конечном множестве альтернатив. Основные положения метода заключаются в следующем.

Под факторами понимаются, прежде всего, оценки количественных факторов оцениваемого варианта решения. Дополнительно, к факторам могут быть отнесены имеющие качественный характер разнообразные аспекты и условия, влияние которых на принимаемые решения лицом, принимающим решения, полагается значимым, а учет – необходимым.

Предлагаемый способ сравнения вариантов и выбора оптимального предполагает выполнение следующей последовательности действий:

- интерпретация качественно выражаемых факторов;
- нормализация (нормирование значений) факторов;
- определение коэффициентов приоритета факторов;

- оценка возможных вариантов решений и предварительный выбор оптимального решения;
- исследование предварительно выбранного варианта на устойчивость;
- окончательный выбор оптимального решения.

1. Числовая интерпретация качественно выражаемых факторов.

Для факторов, значения которых имеют качественный характер, проводят экспертную оценку их численных значений по числовой шкале от 0 до 100, при этом максимальное численное значение, равное 100, присваивается фактору, который, по мнению лица, принимающего решения, максимально значим при принятии решения (оказывает наиболее сильное влияние на принятие).

2. Нормирование значений факторов.

Пусть множество возможных вариантов решений включает m вариантов M_j , $j=1, \dots, m$. Для каждого варианта M_j имеется n факторов F_{ij} , $i=1, \dots, n$. При нормировании значений факторов осуществляется приведение факторов к безразмерной форме F_{ij}^H .

Для факторов, подлежащих максимизации (т.е. тех, высокие значения которых приоритетнее низких), используется формула:

$$F_{ij}^H = \frac{F_{ij} - F_{i,\min}}{F_{i,\max} - F_{i,\min}}, i = 1, \dots, n_1, j = 1, \dots, m. \quad (3)$$

Для факторов, подлежащих минимизации, используется формула:

$$F_{ij}^H = \frac{F_{i,\max} - F_{ij}}{F_{i,\max} - F_{i,\min}}, i = n_{1+1}, \dots, n, j = 1, \dots, m. \quad (4)$$

где: n_1 – число факторов;

$F_{i,\max}$ – максимальное значение i -го фактора всех m вариантов;

$F_{i,\min}$ – минимальное значение i -го фактора всех m вариантов.

3. Определение коэффициентов приоритета факторов.

Для получения значений коэффициентов приоритета факторов используются две схемы. Одна из них более удобна в случаях небольшого числа учитываемых факторов и экспресс-оценки («прямое ранжирование факторов»), другая – при учете многочисленных факторов и дающая лучшую точность оценки приоритетов («схема Саати»).

«Прямое ранжирование факторов».

Факторы ранжируются от самых значимых до тех, значения которых меньше всех других, по мнению эксперта (либо лицо, принимающее решение), влияют на выбор решения. Факторам одинакового уровня значимости присваивается одинаковый ранг. Далее, самому значимому фактору присваивается значение коэффициента приоритета W , равное 100%, а для остальных факторов значения задаются в процентах по отношению к наиболее значимому. Полученные таким образом значения коэффициентов приоритета нормируют на сумму, равную единице.

«Схема Саати».

Для попарного сравнения значимости учитываемых факторов формируется квадратная матрица Саати:

$$V = \begin{pmatrix} 1 & V_{12} & V_{13} & \dots & V_{1n} \\ 1/V_{12} & 1 & V_{23} & \dots & V_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/V_{1n} & 1/V_{2n} & 1/V_{3n} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Для определения значений коэффициентов приоритета W_i решают задачу на максимальное собственное значение матрицы Саати V :

$$V \vec{x}_{\max} = \lambda_{\max} \cdot \vec{x}_{\max}, \quad (6)$$

где $\vec{x}_{\max} = (x_{1\max}, \dots, x_{n\max})^T$ – собственный вектор, соответствующий максимальному собственному значению матрицы V .

Искомые коэффициенты приоритета $W_i, i = 1, \dots, n$ определяются после выполнения нормировки по соотношению:

$$W_i = \frac{x_{i\max}}{\sum_{j=1}^n x_{j\max}}, i = 1, \dots, n \quad (7)$$

В случае, если возникает необходимость учета мнений нескольких экспертов о приоритете факторов и оценки экспертов разнятся, следует для каждого элемента матрицы Саати использовать средние арифметические индивидуальных оценок.

Например, в случае оценки приоритетности факторов L экспертами получаем L заполненных матриц Саати:

$$V^{(l)} = \begin{pmatrix} 1 & V_{12}^{(l)} & V_{13}^{(l)} & \dots & V_{1n}^{(l)} \\ 1/V_{12}^{(l)} & 1 & V_{23}^{(l)} & \dots & V_{2n}^{(l)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/V_{1n}^{(l)} & 1/V_{2n}^{(l)} & 1/V_{3n}^{(l)} & \dots & 1 \end{pmatrix}, l = 1, \dots, L. \quad (8)$$

Путем усреднения элементов верхней треугольной части матрицы:

$$V_{ij} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L V_{ij}^{(l)}, i < j, i = 1, \dots, n, j = i + 1, \dots, n \quad (9)$$

формируют матрицу Саати V с усредненными элементами V_{ij} .

4. Оценка возможных вариантов решений и предварительный выбор оптимального решения.

После определения числовых значений коэффициентов приоритета $W_i, i = 1, \dots, n$ факторов $K_{ij}^H, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$ для каждого из m вариантов решений по формуле (10) рассчитывают значения комплексных показателей (средневзвешенное значение суммы нормализованных значений факторов с весами равными коэффициентам приоритета) для каждого из возможных вариантов решений:

$$K_j = \sum_{i=1}^n W_i \cdot F_{\text{mathit}ij}^H, j = 1, \dots, m. \quad (10)$$

где: F_{ij}^H – нормализованное значение i -го фактора для j -го варианта решения;

W_i – коэффициент приоритета i -го фактора;

m – число рассматриваемых вариантов решений;

n – число факторов, отобранных для сопоставления вариантов.

Предварительно выбранным вариантом оптимального решения является вариант, для которого комплексный показатель максимален:

$$K_{\text{опт}} = \max_j \{K_j\}, j = 1, \dots, m. \quad (11)$$

В общем случае для окончательного выбора оптимального решения следует провести исследование предварительно выбранного варианта на устойчивость в условиях неопределенности исходных данных, использующихся для оценки комплексного показателя. Однако описанный выше алгоритм (1) - (11) можно применять без исследования на устойчивость, например, в случаях:

- необходимости корректировки решений уже в ходе выполнения работ по выводу из эксплуатации и обращению с РАО, когда условия, влияющие на принятие решений, становятся более определенными;

- принятия частных решений (по выполнению отдельных этапов работ, производственных процессов, по работам на отдельных технологических участках, зданиях, сооружениях, помещениях и т.д., условия которых характеризуются достаточным уровнем определенности).

Во второй части второго раздела представлен подход к исследованию и оценке устойчивости выбранного варианта оптимального решения с учетом неопределенности исходных данных.

Процедура исследования основана на методе статистических испытаний (методе Монте-Карло), с помощью которого строятся гистограммы распределения комплексного показателя для каждого из рассматриваемых вариантов.

Такой подход распространяется также на исследование и оценку влияния на оптимальность предварительно выбранного варианта решения и со стороны факторов, имеющих качественный характер. Распределения значений таких факторов задаются путем экспертных оценок.

Адаптированный метод выбора оптимального варианта решения с учетом результатов анализа устойчивости возможных вариантов решений при выводе из эксплуатации и обращении с РАО основан на алгоритме, который состоит в многократной реализации с помощью метода Монте Карло значений факторов для каждого рассматриваемого варианта вывода из эксплуатации, ранжирования вариантов по комплексному показателю в порядке их убывания и подсчетом суммарного количества мест для каждого варианта. Она обеспечивает:

- ранжирование возможных вариантов решений по величине комплексного показателя;

- исследование всех возможных вариантов решений на устойчивость;

- выбор наилучшего среди вариантов и обоснование оптимальности варианта с учетом результатов анализа на устойчивость.

Исходные данные:

1. Число возможных вариантов решения, m .

2. Наименования и число факторов, F_{ij} , n .

3. Распределения значений факторов для каждого возможного варианта решения, F_{ij} .

Выходными данными рассматриваемого алгоритма являются значения, для каждого из возможных вариантов решений:

- комплексного показателя варианта, $K_j, j = 1, m$;
- показателя устойчивости варианта, St_{i*} .

Последовательность действий при реализации алгоритма следующая.

1. С помощью датчика нормального распределения разыгрывается набор значений факторов $F_{ijk}, k = \overline{1, N}$ для каждого из возможных вариантов, где k – номер розыгрыша).

Значения всех факторов, для каждого розыгрыша $k = \overline{1, N}$ отдельно, нормируют по соотношениям (3) и (4).

В результате нормирования указанным способом все нормированные значения F_{ijk}^H факторов всех возможных вариантов решений принадлежат интервалу $[0, 1]$.

2. Для каждого розыгрыша $k = \overline{1, N}$ и каждого из возможных вариантов решения согласно (15) рассчитывают комплексный показатель для каждого возможного варианта:

$$K_{ik} = W_1 \cdot F_{i1k}^H + \dots + W_n \cdot F_{imk}^H, j = 1, \dots, m \quad (12)$$

3. Для каждого розыгрыша $k = \overline{1, N}$ отдельно выполняют ранжирование значений комплексного показателя для всех возможных вариантов (13):

$$K_{(1)k} \geq K_{(2)k} \geq \dots \geq K_{(n)k} \quad (13)$$

(в (13) в скобках указан номер позиции) и рассчитывают сумму номеров позиций в (13) для каждого возможного варианта решения:

$$n_i^+ = \sum_{k=1}^N (n)_{(i_k)k}, i = \overline{1, n} \quad (14)$$

где: $(n)_{(i_k)k}$ – номер позиции i -го возможного варианта решения при k -м розыгрыше.

Возможный вариант i^* с наименьшим n_i^+ ($n_i^+ = \min_{i=1, n} \{n_i^+\}$) является оптимальным.

В случае, если для такого варианта сумма номеров позиций окажется равной числу розыгрышей ($n_{i^*}^+ = N$), то есть минимально возможному значению (когда значение комплексного показателя рассматриваемого варианта при ранжировании значений комплексного показателя для всех возможных вариантов при каждом розыгрыше оказывается на первой позиции), такой оптимальный вариант решения называется *абсолютно приоритетным* (или *абсолютно устойчивым*). В противном случае, когда $n_{i^*}^+ > N$, оптимальный вариант решения с номером i^* называется *относительно устойчивым*.

4. Рассчитывают показатель устойчивости варианта, величина которого пропорциональна частоте реализации таких розыгрышей, при которых данный вариант оказывается оптимальным:

$$St_{i*} = \frac{nN - n_i^+}{nN - N} \quad (15)$$

где: n – количество вариантов;
 N – количество розыгрышей;

n_i^+ – сумма позиций i -ого варианта по итогам N розыгрышей.

Диапазон возможных значений показателя St_{i*} – от 0 до 1. Если рассматриваемый оптимальный вариант решения с номером i^* абсолютно устойчивый, то показатель устойчивости равен 1. Чем больше (ближе к 1) значение показателя St_{i*} для оптимального варианта решения с номером i^* , тем устойчивее этот оптимальный вариант.

Для решения задач по сопоставительной оценке и анализу возможных решений по степени их устойчивости и дальнейшего принятия решения лицом, принимающим решения, по окончательному выбору варианта решения целесообразно ввести вербальную шкалу с качественной оценкой (см. табл. 1).

Оценки «абсолютная устойчивость» и «сильная устойчивость» позволяют считать соответствующий им возможный вариант решения достаточно устойчивым для его окончательного выбора.

Таблица 1. Вербальная шкала для оценки устойчивости оптимального варианта решения

Численное значение St_{i*}	Вербальное значение качественной оценки устойчивости решения
$St_{i*}=1$	решение абсолютно устойчиво
$0,8 < St_{i*} < 1$	сильная устойчивость решения
$0,6 < St_{i*} < 0,8$	средняя устойчивость решения
$St_{i*} < 0,6$	решение слабо устойчиво

В третьем разделе представлены результаты апробации разработанных схем, алгоритмов и процедур, реализованных с участием автора в ряде программ для ЭВМ, с целью проверки их работоспособности. Апробация проводилась на примерах задач по подготовке, выбору и обоснованию оптимальности решений по управлению выводом из эксплуатации и обращению с образующимися при этом РАО.

1. Подготовка решений по выводу из эксплуатации объекта ФГУП «Радон»

Объект – кирпичное двухэтажное сооружение с двумя подвальными помещениями, в котором ранее выполнялись научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в области переработки облученного ядерного топлива и плутония газофторидными (сухими) методами, в котором располагается около 90 помещений, в которых размещено технологическое оборудование – «горячие» камеры, исследовательские боксы, система водоочистки, вентиляционная система.

Была построена иерархическая модель объекта, проведено моделирование технологических операций по демонтажу и дезактивации оборудования, строительных конструкций, систем спецвентиляции и т.д., а также по обращению с образующимися РАО. При моделировании учитывались такие параметры как очередность выполнения работ, стоимость и время на единицу работы, общий объем работы, мощность дозы, получаемой персоналом, минимально требуемое число работников и их квалификация.

В качестве факторов возможных вариантов выполнения работ были определены стоимость, длительность и дозовая нагрузка на персонал (индивидуальная и коллективная).

Рассмотренные четыре возможных варианта решения, различающиеся численностью персонала и применяемым оборудованием (см. табл. 2).

Таблица 2. Рассмотренные возможные варианты решения

вариант 1	персонал (20 чел.) выполняет работы ручным инструментом
вариант 2	персонал (20 чел.) выполняет радиационно опасные работы при помощи дистанционно-управляемого демонтажного робота (Brokk), остальные работы – ручным инструментом
вариант 3	персонал (10 чел.) выполняет радиационно опасные работы при помощи Brokk, остальные работы – ручным инструментом
вариант 4	персонал (10 человек) выполняет радиационно опасные работы при помощи двух Brokk, остальные работы – ручным инструментом

Для всех возможных вариантов были рассчитаны и пронормированы значения их факторов. Расчет значений комплексного показателя проводился с учетом приоритетности факторов, устанавливаемых в соответствии со следующими различными подходами:

- равные приоритеты (равная значимость факторов);
- приоритет наименьшей стоимости работ;
- приоритет наименьшей длительности работ;
- приоритет минимальной индивидуальной дозовой нагрузки;
- приоритет минимальной коллективной дозовой нагрузки.

На рис. 3–7 представлены полученные распределения комплексного показателя по возможным вариантам выполнения работ по выводу из эксплуатации. Предварительно выбранными оптимальными вариантами являются те из них, для которых значения комплексного показателя максимальны. Результаты исследования данных вариантов на устойчивость позволили оценить устойчивость для большинства выбранных вариантов, в соответствии со шкалой, представленной в табл. 1, как сильную, за исключением варианта при приоритете минимальной индивидуальной дозовой нагрузки, для которого необходимы дополнительные исследования с уточненными входными данными.

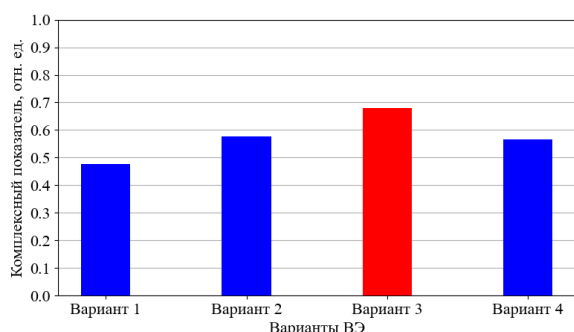


Рис. 3. Значения комплексного показателя для возможных вариантов при отсутствии приоритетных факторов. Оптимальный вариант – № 3

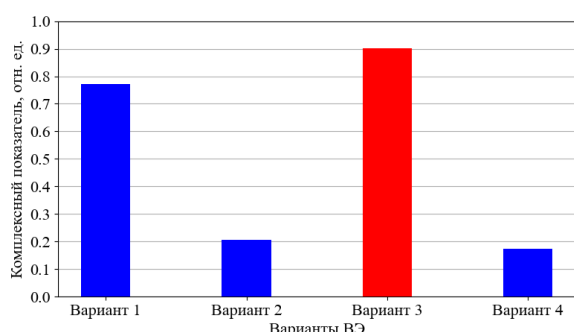


Рис. 4. Значения комплексного показателя для возможных вариантов при приоритете наименьшей стоимости работ. Оптимальный вариант – № 3

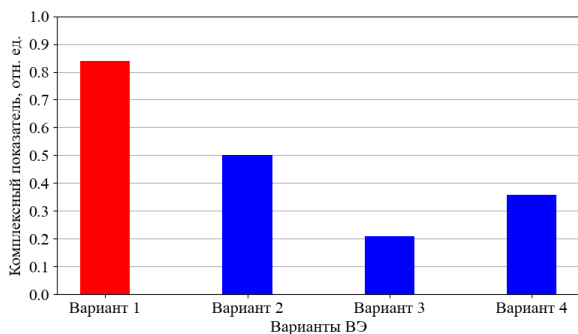


Рис. 5. Значения комплексного показателя для возможных вариантов при приоритете наименьшей длительности работ. Оптимальный вариант – № 1

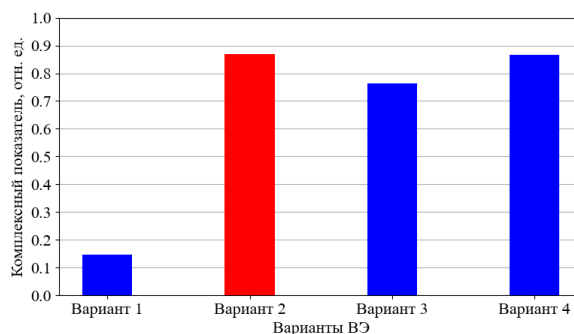


Рис. 6. Значения комплексного показателя для возможных вариантов при приоритете минимальной индивидуальной дозовой нагрузки. Оптимальный вариант – №2

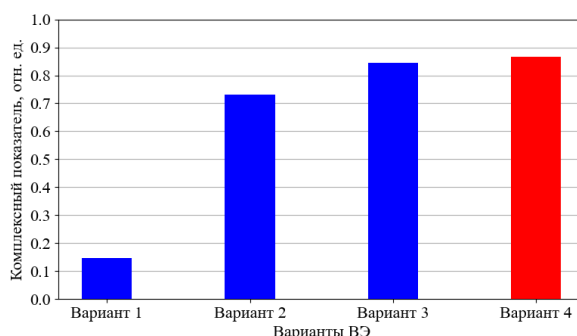


Рис.7. Значения комплексного показателя для возможных вариантов при приоритете минимальной коллективной дозовой нагрузки. Оптимальный вариант – №4

Наряду с задачей выбора и обоснования оптимального сценария реализации процесса вывода из эксплуатации всего объекта (здания) в целом, было выполнено решение частной задачи по определению оптимальных схем и сценариев выполнения работ в одном из помещений здания. Пол помещения – бетон, застелен пластиком с заходом на стены, имеющим множественные нарушения целостности. Стены помещения – силикатный кирпич, штукатурка, окрашенная до высоты 2 м масляной краской, далее – побелка. Потолок – железобетонные перекрытия, окрашен масляной краской.

В помещении остаются не демонтированными коробка (воздуховод) спецвентиляции. Источники излучения:

- пол, загрязненный радионуклидами Cs-137 и Co-60 в результате протечек, разливов радиоактивных веществ. Результаты комплексного инженерного и радиационного обследования свидетельствуют о проникновении радиоактивных веществ в бетон по всей площади пола помещения на глубину до 10 мм;

- внутренняя поверхность воздуховода спецвентиляции.

Планируемыми работами по выводу из эксплуатации являются:

- ликвидация радиоактивного загрязнения пола в помещении, включая демонтаж пластикового покрытия пола и дезактивацию бетонного пола;

- демонтаж воздуховодов спецвентиляции;

- обращение с образовавшимися РАО.

Осуществление указанных работ возможно по нескольким вариантам, отличающимся применяемыми технологиями и, соответственно, стоимостью, продолжительностью и дозовыми нагрузками на персонал.

Был определен возможный состав работ, применяемые технологии, требуемые ресурсы для их выполнения, меры по обеспечению радиационной безопасности, а также влияние на стоимость, продолжительность и дозовые нагрузки. Кратко работы и технологии заключаются в следующем.

1. Удаление пластикового покрытия пола и фрагментация пола. Технология безальтернативна – удаление и фрагментация с помощью ручного инструмента.

2. Дезактивация бетонного пола. Возможно применение трех технологий.

Вариант 1. Технология глубинной дезактивации – фрезерование бетона фрезеровательной электрической или дизельной машиной. Снимается слой 10 мм.

Вариант 2. Технология глубинной дезактивации – дистанционный скол на глубину 10 мм электрогидравлической демонстрационной машиной с дистанционным управлением, типа «Brokk-50», оснащенной пневматическими ударными головками.

Вариант 3. Технология глубинной дезактивации – ручной скол на глубину 10 мм ручным инструментом, пневматическими, гидравлическими отбойными молотками.

3. Радиационный контроль. После снятия 10 мм слоя бетона пола помещения проводится радиационный контроль остаточного загрязнения пола помещения путем измерений в узлах сети контрольных точек.

4. Демонтаж воздуховодов спецвентиляции. Технология выполнения – механическая резка отрезным армированным кругом.

5. Последемонтажная дезактивация фрагментов воздуховодов спецвентиляции.

Вариант 1. Выполняется пленочным методом поверхностной дезактивации с использованием пленочных составов ВЛ-501 и (или) «РАДДЕЗ-П».

Вариант 2. Дезактивацию не выполнять, фрагменты воздуховодов спецвентиляции передать на захоронение в качестве РАО.

6. Обращение с РАО и отходами, не относящимися к РАО. Передача на захоронение

В результате работ по дезактивации и демонтажу образуются загрязненные радиоактивными веществами отходы, относящиеся к твердым радиоактивным отходам – пластиковое покрытие, бетонная крошка, металл (в случае отказа от дезактивации материала вентиляционных коробов, а в случае выполнения дезактивации – «чистый» металл, подлежащий сдаче в металлолом).

Вариант 1. Выполняются работы по обращению с РАО: элементы пластикового покрытия помещают в первичную упаковку. Первичные упаковки транспортируют в узел обращения с РАО, где, в соответствии с группой отходов, укладывают в транспортные контейнеры. После их дозиметрического контроля, паспортизации, погрузки и радиационного контроля транспортного средства, контейнеры с РАО вывозят на специализированное предприятие.

Вариант 2. Выполняются работы по обращению с РАО, аналогичные перечисленным в варианте 1, за исключением обращения с дезактивированными фрагментами воздуховодов спецвентиляции.

Путем комбинирования вариантов осуществления отдельных операций сформированы шесть вариантов выполнения всего комплекса работ по выводу из эксплуатации помещения (табл. 3), характеризующиеся различными значениями стоимости, продолжительности и дозовых нагрузок на персонал.

Для возможных вариантов были рассчитаны значения их факторов. Их нормированные значения использованы для расчетов значений комплексного показателя для каждого из возможных вариантов (исходя из условия одинаковой значимости факторов). Распределение значений комплексного показателя для возможных вариантов вывода из эксплуатации представлено на рис. 8.

Из приведенных данных следует, что оптимальным вариантом является вариант 4 ($K_{\text{опт}}=0,792$). Результаты исследования данного варианта решения на устойчивость подтвердили устойчивость варианта.

2. Подготовка решений по обращению с материалами, загрязненными радионуклидами, при выводе из эксплуатации ПУГР И-1 АО «ОДЦ УГР»

В настоящее время, на площадке АО «ОДЦ УГР», в реакторном здании промышленного уран-графитового реактора (ПУГР) И-1, подлежащего выводу из эксплуатации, находятся материалы, загрязненные радионуклидами – сменные элементы конструкций

Таблица 3. Содержание возможных вариантов вывода из эксплуатации помещения

Работы, технологии (если применимо)		Возможные варианты решения					
		1	2	3	4	5	6
1. Удаление и фрагментация пластикового покрытия помещения с помощью ручного инструмента.	Ручной инструмент	+	+	+	+	+	+
2. Дезактивация бетонного пола	Фрезерование бетона	+	-	-	+	-	-
	Дистанционный скол («Брокк»)	-	+	-	-	+	-
	Ручной скол	-	-	+	-	-	+
3. Радиационный контроль остаточного загрязнения пола		+	+	+	+	+	+
4. Демонтаж воздуховодов спецвентиляции	Механическая резка отрезным армированным кругом	+	+	+	+	+	+
5. Последемонтажная дезактивация фрагментов воздуховодов спец вентиляции	Пленочный метод поверхностной дезактивации	+	+	+	-	-	-
6. Обращение с РАО	Пластиковое покрытие, бетонная крошка	+	+	+	-	-	-
	Пластиковое покрытие, бетонная крошка, металл вентиляционных коробов	-	-	-	+	+	+
7. Передача РАО на захоронение	Пластиковое покрытие, бетонная крошка	+	+	+	-	-	-
	Пластиковое покрытие, бетонная крошка, металл вентиляционных коробов	-	-	-	+	+	+
8. Сдача в лом металлических отходов, не относящихся к РАО		+	+	+	-	-	-

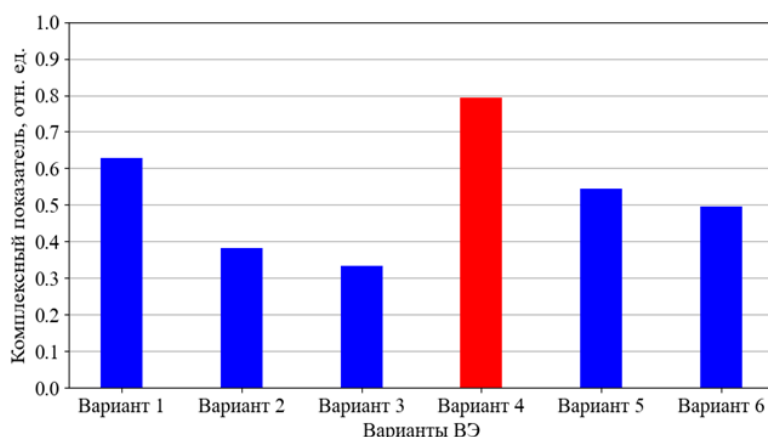


Рис. 8. Значения комплексного показателя для возможных вариантов вывода из эксплуатации в условиях равных приоритетов факторов

реактора (графитовые втулки, фрагменты каналов технологических трактов), а также накопленные при эксплуатации реактора отложения.

Необходимо принять решение по дальнейшему обращению с данными материалами, загрязненными радионуклидами – либо переработка и кондиционирование с передачей образовавшихся РАО национальному оператору по обращению с РАО для захоронения в специализированном пункты захоронения РАО, либо захоронение РАО в виде материалов, загрязненных радионуклидами совместно с особыми РАО, образовавшимися при эксплуатации ПУГР И-1. Рассматривались три возможных варианта решения:

- передача материалов, загрязненных радионуклидами, на захоронение во ФГУП «НО РАО»;
- размещение в помещениях ПУГР И-1 «без кондиционирования»;
- размещение материалов, загрязненных радионуклидами, в помещениях ПУГР И-1 с их «кондиционированием».

Среди факторов, влияющих на выбор варианта обращения с РАО, учитывались как количественные факторы («прогнозируемая индивидуальная доза облучения населения», «оценка значения коллективной эффективной дозы персонала», «затраты на обращение с материалами, загрязненными радионуклидами», «продолжительность реализации выбранного варианта»), так и качественные факторы, численные оценки которых были получены методом экспертного опроса. К таким факторам были отнесены технические, экологические, радиационные, социально-политические, финансовые и временные факторы, а также факторы, связанные с лицензированием деятельности в области использования атомной энергии, несущие риски при подготовке и осуществлении деятельности по реализации принимаемого решения.

С помощью схемы Саати были определены значения коэффициентов приоритета факторов, которые затем были использованы для расчета значений комплексного показателя для каждого из рассматриваемых вариантов решения по обращению с материалами, загрязненными радионуклидами (представлены на рис. 9).

Из результатов следует, что оптимальным вариантом обращения с материалами, загрязненными радионуклидами, является вариант 2 – материалы, загрязненные радионуклидами не перерабатываются, а размещаются во вне реакторных помещениях реакторного здания ПУГР И-1 в транспортный упаковочный комплект ТУК-44.

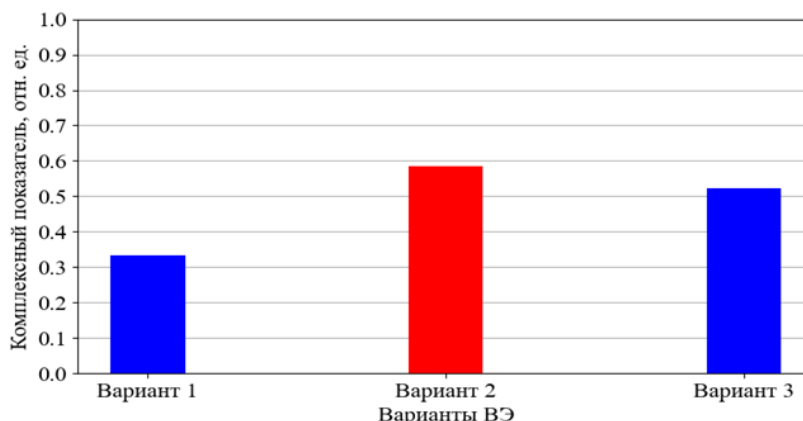


Рис. 9. Значения комплексного показателя для возможных вариантов решения по обращению с материалами, загрязненными радионуклидами

3. Подготовка решений по выбору оптимального варианта обращения с РАО ООО «КГМК»

При переработке руд участка Буранный Томторского редкометалльного месторождения на Краснокаменском гидрометаллургическом комбинате (ООО «КГМК») ежегодно образуется около 55 тыс. куб. м технологических и эксплуатационных РАО шестого класса, подлежащих, согласно требованиям федеральных норм и правил в области использования атомной энергии, регламентирующих обращение с РАО, захоронению в приповерхностный пункт захоронения РАО. Возникает задача определения способа их размещения с учетом оценки безопасности возможных вариантов размещения – в существующие хвостохранилища совместно с отходами ПАО «ППГХО» либо новый объект, в хвостохранилище «Верхнее» или «Среднее», ПРОРАО или пункт захоронения РАО, владелец РАО – ПАО «ППГХО», ФГУП «НО РАО» или ООО «КГМК». Всего было подготовлено 14 возможных вариантов размещения РАО.

Как и в случае с выбором решения по обращению с материалами, загрязненными радионуклидами при выводе из эксплуатации ПУГР И-1 АО «ОДЦ УГР», определение коэффициентов приоритета факторов, влияющих на решение, осуществлялось также с помощью схемы Саати. Полученные значения комплексного показателя для рассматриваемых возможных вариантов обращения с РАО ООО «КГМК» представлены на рис. 10.

Из результатов следует, что оптимальным вариантом обращения с РАО является вариант 12 – размещение РАО ООО «КГМК» осуществляется в существующее хвостохранилище (хвостохранилище «Среднее») совместно с отходами ПАО «ППГХО», реализация решения осуществляется без проектирования новых объектов, владелец – ФГУП «НО РАО».

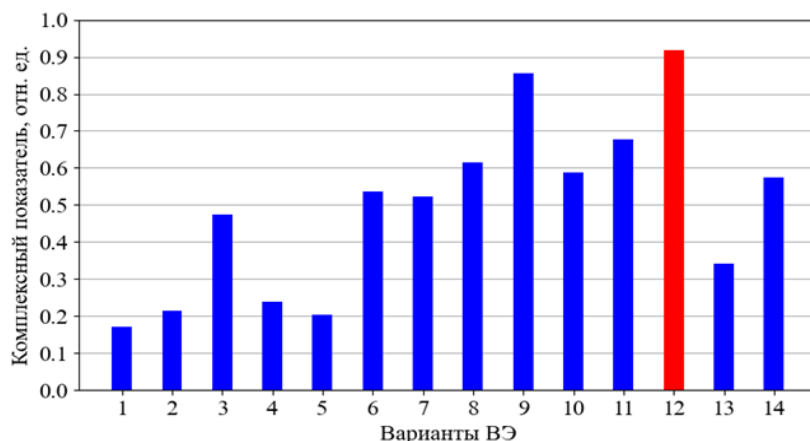


Рис. 10. Значения комплексного показателя для вариантов решения по обращению с РАО ООО «КГМК»

В **Заключении** подводятся итоги и формулируются основные результаты, полученные при выполнении настоящей работы.

Основные результаты работы представлены ниже.

1. На основе анализа требований нормативно-правовых актов в области использования атомной энергии, отечественного опыта организации вывода из эксплуатации, рекомендаций МАГАТЭ и АЯЭ ОЭСР сформулированы требования к методическому и математическому обеспечению специализированной СППР при планировании, подготовке к выводу и выводе из эксплуатации ОИАЭ, а также к обращению с образующимися РАО.

2. Разработана последовательность действий по подготовке управленческих решений по выводу из эксплуатации ОИАЭ и обращению с РАО, а также метод выбора оптимального решения, включая:

- алгоритм формирования множества возможных вариантов решений и оценки их показателей;

- процедуры моделирования ОИАЭ и производственных процессов, осуществляемых в ходе вывода из эксплуатации;

- предложения по перечню показателей возможных вариантов решений, к которым отнесены «стоимость реализации варианта вывода из эксплуатации», «длительность реализации варианта вывода из эксплуатации» и «дозовая нагрузка на персонал, реализующий процесс вывода из эксплуатации»;

- алгоритмы расчета значений показателей возможных вариантов решений с учетом их приоритета, задаваемого лицом, принимающим решения (предложены две схемы:

- а) «прямое ранжирование факторов», более удобное в случаях небольшого числа учитываемых факторов;

- б) «схема Саати», применяемая при необходимости учета значительного числа факторов и дающая лучшую точность оценок);

- алгоритм комплексной оценки возможных вариантов вывода из эксплуатации ОИАЭ.

3. Выполнена адаптация метода выбора оптимального варианта решения по выводу из эксплуатации ОИАЭ и обращению с образующимися РАО для учета влияния неопределенности используемых исходных данных и исследования

решения на устойчивость для обеспечения обоснованности решения. Разработан реализующий адаптированный метод алгоритм, основанный на применении метода статистических испытаний (Монте-Карло) для получения распределения значений показателей рассматриваемых возможных вариантов вывода из эксплуатации и их последующем сравнении для выбора оптимального варианта вывода из эксплуатации.

4. Проведена апробация разработанной последовательности действий, адаптированного метода и алгоритмов для поддержки принятия решений по выводу из эксплуатации ОИАЭ и обращению с РАО, реализованных в ряде программ для ЭВМ. Апробация проводилась на примерах задач по подготовке, выбору и обоснованию оптимальности решений по управлению выводом из эксплуатации и обращению с образующимися РАО на предприятиях ФГУП «Радон», АО «Сибирский химический комбинат» и АО «Концерн Росэнергоатом». Подтверждено, что разработанное методическое и математическое обеспечение позволяет вырабатывать обоснованные решения, оптимальные по затратам финансовых, материально-технических и временных ресурсов и при условии соблюдения норм и требований ядерной и радиационной безопасности.

Публикации по теме диссертации:

Статьи в журналах списка Scopus

1. Abakumova A.S., Bochkarev V.V., Ivanov V.V., Kryanev A.V. Analysis of the Stability of Choosing the Decommissioning Option for Objects of Atomic Energy Use. Physics of Particles and Nuclei Letters, v. 16, № 1, 2019, pp. 70-74.
2. Bochkarev, V.V., Brilliantov, B.D., Ivanov, V.V., Klimanov, S.G., Kryanev, A.V. Optimal Decision Support System under the Decommissioning of Nuclear Facilities. Physics of Particles and Nuclei Letters, 2022, 19(6), pp. 826–833.

Статьи в журналах списка ВАК

3. Абрамова А.А., Дорофеев А.Н., Бочкарев В.В. и другие. К вопросу оценки объема ядерного наследия в атомной промышленности и на иных объектах мирного использования атомной энергии в России. Ядерная и радиационная безопасность, № 3(73), 2014.
4. Хамаза А.А., Бочкарев В.В. и другие. О возможности применения комплексного показателя потенциальной опасности в качестве основы дифференцированного подхода к регулированию безопасности объектов «ядерного наследия». Ядерная и радиационная безопасность, № 1(79), 2016.
5. Абакумова А.С., Бочкарев В.В., Крянев А.В. Обоснование выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Ядерная и радиационная безопасность, № 3(87), 2018.
6. Абакумова А.С., Бочкарев В.В., Крянев А.В. Анализ устойчивости выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Письма в ЭЧАЯ, 2019, Т.16, №1 (220), с.76-83.
7. Бочкарев В.В., Бриллиантов Б.Д., Крянев А.В. Применение математических методов при выборе оптимального варианта обращения с радиоактивными отходами. Ядерная и радиационная безопасность 4(98), 2020, с. 36-46.
8. В.В. Бочкарев, Б.Д. Бриллиантов, А.В. Крянев и другие. Структура системы поддержки принятия оптимальных решений при выводе из эксплуатации

объектов использования атомной энергии. Вестник НИЯУ «МИФИ». 2020, т. 9, № 3, с. 256-261.

9. Бочкарев В.В., Бриллиантов Б.Д., Климанов С.Г., Крянев А.В., Смирнов Д.С. Обоснование оптимальных технических и организационных решений при выводе из эксплуатации ОИАЭ с учетом обеспечения ЯРБ, Радиоактивные отходы, вып. 4, с. 60-64, 2021.
10. Бочкарев В.В., Б.Д. Бриллиантов, С.Г. Климанов, А.В. Крянев, Д.С. Смирнов, С.А. Смирнов. Особенности разработки системы моделирования и поддержки принятия решений при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии. Ядерная и радиационная безопасность 1(107), 2023, с. 28-38

Другие публикации по теме диссертации

11. Бочкарев В.В., Крянев А.В., Ханбикова Д.Т. «Схема ранжирования ядерно и радиационно опасных объектов с использованием нечетких чисел». «Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем»: материалы Всероссийской конференции с международным участием, Москва, РУДН, 20-24 апреля 2015 г., с. 225-227, ISBN 978-5-209-05753-6.
12. В.В. Бочкарев, И.А. Устинина. Круглый стол «Оптимизация решений по безопасности при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии» 27 – 29 мая 2015 г. Госкорпорация «Росатом» совместно с ИБРАЭ РАН. Тезисы докладов: «О состоянии работ по переработке ФНП» и «Об определении состава и границ ЯРОО для целей ВЭ».
13. Бочкарев В.В., Абакумова А.С. «О необходимости дифференцированного подхода к регулированию безопасности объектов «ядерного наследия». Сборник тезисов международной научно-практической конференции Санкт-Петербург 14 апреля 2016 года «Чернобыль – 30 лет спустя. Радиационно-гигиенические аспекты преодоления последствий аварии на ЧАЭС», УДК 614.876, ББК 5126, ФБУН научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, 2016.
14. Бочкарев В.В. и др. Доклад на НТС Дивизиона ЗСЖЦ.: «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016 – 2020 годы и на период до 2030 года» по подготовке к выводу и выводу из эксплуатации объектов ядерного наследия и по обращению с особыми радиоактивными отходами» от 29 ноября 2016 г.
15. Абалкина И.Л., Барчуков В.Г., Бочкарев В.В., Ведерникова М.В., Дорогов В.И., Кочетков О.А., Крышев И.И., Линге И.И., Панченко С.В., Савин М.Н., Уткин С.С., под общей редакцией Линге И.И. «Научно-техническое пособие по подготовке обосновывающих материалов для принятия решения об отнесении радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам». Москва: ИБРАЭ РАН, 2014, 157 с.
16. А.А. Абрамов, А.Н. Дорофеев, А.А. Хамаза, В.В. Бочкарев и др. Заключительный том трехтомной монографии «Проблемы ядерного наследия и пути их решения», посвященный завершающему этапу жизненного цикла объекта использования атомной энергии — выводу из эксплуатации. «Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Вывод из эксплуатации». Под общей редакцией академика РАН Л.А. Большова, Н.П. Лаверова, чл.-кор. РАН И.И. Линге. М.: 2015, 316 с.
17. Valeriy V. Bochkarev, Alexandr V. Kryanev, Dmitry S. Smirnov. Mathematical decision support model for the decommissioning of nuclear power facilities. 10th

International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2018, pp. 453-458.

18. В.В. Бочкарев, Б.Д. Бриллиантов, А.В. Крянев. Структура системы поддержки принятия оптимальных решений при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии. VI Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии – ЛАПЛАЗ-2020». Сб. научных трудов, 2020, с. 123.
19. Batsulin A.A., Bochkarev V.V., Brilliantov B.D., Klimanov S.G., Litvinenko O.Yu., Mamai D.V., Sliva D.E., Smirnov D.S., Smirnov S.A., Stryapushkin P.A., Tereshkin V.I., Khanbikova D.T., «The structure of the support system for making optimal decisions during the decommissioning of nuclear facilities» Int. J. of Nuclear Governance, Economy and Ecology, Vol. 5, No. 1, 2021.
20. Bochkarev, V.V., Brilliantov, B.D., Klimanov, S.G., Kryanev, A.V. Mathematical Model for Selecting the Optimal Option of Technological Processes for Decommissioning Nuclear Power Facilities Using the Monte Carlo Method. AIP Conference Proceedings, 2023, DOI: 10.1063/5.0164343.
21. Проект изменений в федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации блока атомной станции (НП-012-16)», Ростехнадзор, 2024.