

СТРУКТУРА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕШЕНИЙ ПРИ ВЫВОДЕ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

© 2020 г. В. В. Бочкарев^{1,2}, Б. Д. Бриллиантов^{1,2}, А. В. Крянев^{1,3,*}, А. А. Бацулин^{1,2}, С. Г. Климанов¹, О. Ю. Литвиненко^{1,2}, Д. В. Мамай^{1,2}, Д. Е. Слива¹, Д. С. Смирнов¹, П. А. Стряпушкин^{1,2}, В. И. Терешкин^{1,2}, Д. Т. Ханбикова²

¹ Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409, Россия

² НТЦ ядерной и радиационной безопасности, Москва, 107140, Россия

³ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

*e-mail: avkryanev@mephi.ru

Поступила в редакцию 28.05.2020 г.

После доработки 01.07.2020 г.

Принята к публикации 07.07.2020 г.

В статье рассмотрена структура системы поддержки принятия оптимальных решений при выводе из эксплуатации объектов использования атомной энергии. В предлагаемой структуре предусмотрен анализ различных вариантов вывода из эксплуатации рассматриваемого объекта использования атомной энергии и выбор оптимального варианта вывода его из эксплуатации. В системе учитываются неопределенности в исходных данных, в том числе, неопределенности, которые описываются с помощью нечетких величин. Варианты вывода из эксплуатации оцениваются по нескольким частным показателям и сводятся к трем агрегированным показателям.

Ключевые слова: система, принятие решений, вывод из эксплуатации, объекты использования атомной энергии, оптимальный вариант, показатели, неопределенность

DOI: 10.1134/S2304487X20030025

1. ВВЕДЕНИЕ

Задача создания системы поддержки принятия оптимальных решений (СППОР) при выводе из эксплуатации (ВЭ) объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) является актуальной для организаций и подразделений управления использованием атомной энергией, в связи с деятельностью по разработке и реализации процесса ВЭ ОИАЭ, обоснованию безопасности и экономической целесообразности всех этапов по реализации ВЭ ОИАЭ [1–6]. Одной из актуальных частных задач ВЭ ОИАЭ является сравнение и выбор варианта ВЭ рассматриваемого ОИАЭ. Задача выбора варианта реализации ВЭ ОИАЭ является многокритериальной задачей, осложненной: неопределенными значениями оценок объемов производимых работ; неопределенностью используемых оценок экспертов; неопределенностью оценок последствий реализации того или иного варианта реализации ВЭ ОИАЭ; необходимостью учета возможных рисков и разного характера неопределенностей; многовариантными подходами к обращению с РАО, образующимися при демонтаже и дезактивации основного технологического оборудования и инженерной инфра-

структуры (оборудование, помещения, вентиляция, техническая канализация, транспортеры, промышленные площадки и т.д.).

Задача реализации выбранного варианта ВЭ является актуальной и для эксплуатирующих организаций, а также для проектных организаций на всех стадиях полного жизненного цикла ОИАЭ [7–14]. СППОР и заложенные в ней базы данных и расчетные компьютерные программы поддержки принятия оптимальных решений при управлении выводом из эксплуатации ОИАЭ — одна из важных дополняющих частей информационной системы ВЭ ОИАЭ.

2. СТРУКТУРА СППОР

Числовые значения показателей состояния ОИАЭ, на основе которых рассчитывается процесс ВЭ ОИАЭ, известны с неопределенностью, порождаемой неопределенностью исходных данных в расчетных моделях и экспертными оценками тех показателей, значения которых не могут быть рассчитаны, а оцениваются экспертами. Поэтому, для математического описания неопределенности в значениях входных данных и разработки схемы и основанного на ней алгоритма

оценки состояния ОИАЭ необходимо использовать, как аппарат теории вероятностей, когда входные данные получены расчетным путем, так и аппарат нечетких множеств, когда входные данные получены путем экспертных оценок [15–18]. В таком случае возникает дополнительная проблема оптимального объединения оценок показателей, при различном виде описания неопределенности. В рамках разработки методики и алгоритма оценки вариантов ВЭ ОИАЭ разработан и использован метод оптимального объединения оценок показателей.

Исходными данными состояния ВЭ ОИАЭ являются:

1) физические объемы конструкций и элементов, подлежащих дезактивации, демонтажу, упаковке, транспортировке, захоронению РАО (размеры — объем, площадь, длина и т.д., вес, вид материала и его состояние);

2) объемы (количество) радиоактивных веществ и их тип (твердые, жидкие);

3) интенсивность радиоактивного излучения и его тип (γ -излучение, α , β -частицы, периоды полураспада);

4) Набор технологических операций дезактивации, демонтажа, упаковки, транспортировки, захоронения с указанием стоимости работ, длительности и уровня надежности обеспечения ЯРБ. Причем даны характеристики неопределенности числовых показателей (стоимости, длительности, либо как случайных величин — нормальное или β -распределение, либо как нечетких величин — равномерные, треугольные, или трапециевидные). Уровень надежности может задаваться качественно (высоко надежная, надежная, умеренно надежная, слабо надежная, опасная). Тогда каждому уровню надежности присваивается числовое значение, например, 5, 4, 3, 1, 0 для каждого уровня соответственно.

В статье предложена структура СППОР по ВЭ ОИАЭ. В предлагаемой структуре предусмотрено наличие схемы анализа различных вариантов ВЭ ОИАЭ, основанной на многокритериальном подходе. В частности, наряду с обычными выводами из эксплуатации (до уровня “зеленой лужайки” и захоронением радиоактивных отходов на месте) объекта использования атомной энергии в модели предусмотрено их оптимальное сочетание с учетом экономической эффективности и обеспечения радиационной безопасности.

В СППОР учитываются неопределенности в исходных данных, в том числе данных, определяемых экспертно, неопределенность которых описывается с помощью нечетких множеств.

Расчетная часть СППОР оценивает выводимый объект по большому числу показателей, сводя их к нескольким агрегированным критериям, из которых наиболее значимыми являются сводный показатель потенциальной опасности и свод-

ный финансовый показатель с учетом уровней их неопределенности. Расчетная часть СППОР обеспечивает свертку показателей по каждой группе и дает итоговую оценку варианта вывода из эксплуатации, используя многокритериальный подход и степень неопределенности каждого частного показателя. Тем самым СППОР позволит получать исходные показатели реализации вариантов ВЭ ОИАЭ с помощью предварительных расчетов или с помощью экспертных оценок с учетом неопределенности их значений. Схема позволяет выбрать оптимальный вариант ВЭ ОИАЭ, соответствующий оптимальному соотношению критериев.

Ниже на рис. 1 приведена бло-схема структуры СППОР по ВЭ ОИАЭ.

В СППОР заложен принцип универсальности, реализуемый в наличии в СППОР блоков базы данных типовых: элементов выводимых из эксплуатации ОИАЭ различных категорий (блоков энергетических ядерных реакторов различных типов, исследовательских и промышленных ядерных реакторов, пунктов хранения радиоактивных отходов (РАО) и др.); технологических операций по ВЭ ОИАЭ; ресурсов, необходимых для реализации типовых технологических операций. Кроме этого, в базу данных СППОР включены блок нормативных требований обеспечения ЯРБ и блок типовых рисков в процессе ВЭ ОИАЭ.

Варианты ВЭ отличаются выбором разных технологических операций по дезактивации, демонтажу, упаковке, транспортировке, захоронению РАО и РАО.

Для реализации программы сравнения вариантов ВЭ ОИАЭ предполагается, что предварительно для рассчитываемых вариантов сравнения выбраны допустимые наборы технологических операций дезактивации, демонтажа, упаковки, транспортировки, захоронения, конкретные для каждого варианта ВЭ. Эти наборы технологических операций имеют разные стоимости работ, разные длительности работ, разные уровни надежности обеспечения безопасности и, прежде всего, ЯРБ, и для различных вариантов ВЭ подбирается определенный набор технологических операций, соответствующих рассматриваемому варианту.

Для определения варианта вывода из эксплуатации, как правило, используется многофакторный анализ показателей, которые влияют на выбор того или иного варианта. Следовательно, задачу по выбору и обоснованию варианта вывода из эксплуатации можно представить как задачу поиска оптимального решения в многокритериальном пространстве и условно разбить на следующие этапы:

1. Определение показателей, которые необходимо учитывать, и которые влияют на выбор того или иного варианта вывода из эксплуатации.

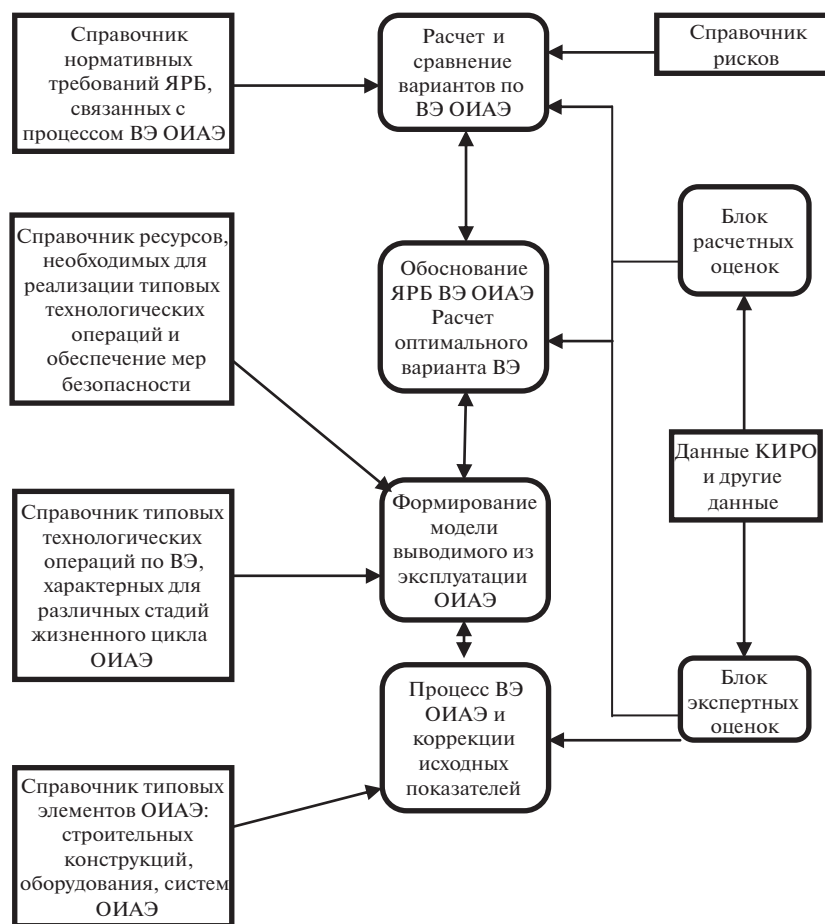


Рис. 1. Блок-схема программного комплекса СППОР по ВЭ ОИАЭ.

2. Проведение многофакторного анализа, решение задачи оптимизации.

3. Сравнительная оценка вариантов вывода из эксплуатации по полученным результатам многофакторного анализа.

4. Принятие обоснованного решения о выборе варианта ВЭ [19].

В представленной схеме предлагается следующий подход к выбору и обоснованию варианта ВЭ ОИАЭ: при сопоставлении рассматриваемых возможных вариантов ВЭ рекомендуется опираться на методы многофакторного выбора на конечном множестве альтернатив (вариантов выбора технологических операций ВЭ ОИАЭ), с учетом следующего минимального набора показателей:

- количественный показатель медико-социального обоснования соотношения польза–вред в соответствии с принципом обоснования;
- величины расходов, связанных с реализацией каждого из рассматриваемых вариантов ВЭ.

На этапе идентификация вариантов ВЭ ОИАЭ для каждого варианта ВЭ ОИАЭ определяются количественные значения каждого показателя.

Ниже приведен перечень показателей, характеризующих сравниваемые варианты ВЭ:

1. Финансово-экономический показатель (стоимость ВЭ).

2. Длительность ВЭ.

3. Три показателя обеспечения радиационной безопасности персонала, населения и окружающей среды.

Все показатели представляются неопределенными числовыми значениями и, следовательно, характеризуются средним ожидаемым значением и дисперсией (если неопределенность числовых значений описывается нечеткими числами (Fuzzy Sets), то они переводятся в эквивалентные случайные величины и для них подсчитываются дисперсии). Дисперсии (СКО) показателей являются также дополнительными показателями, характеризующими степень неопределенности средних ожидаемых значений. Поэтому в настоящем представлении каждый вариант ВЭ характеризуется в общем случае 10 показателями — 5 средними ожидаемыми значениями показателей и 5 их дисперсиями, причем только три из десяти показателей подлежат максимизации — средние ожидаемые значения третьего–пятого показателей, остальные показатели подлежат минимизации. Набор показателей может быть рас-

ширен с учетом конкретных характеристик ОИАЭ и места его расположения.

Примерный перечень дополнительных показателей, рекомендуемых для оценки при рассмотрении различных вариантов ВЭ и их комбинаций, представлен ниже. Помимо основных вышеперечисленных показателей можно и нужно учитывать ряд дополнительных показателей, которые в совокупности могут повлиять на принятие решения о выборе варианта ВЭ, а также повысить точность проводимых оценок и расчетов:

1. Возможность обращения (извлечения, переработки, кондиционирования, транспортирования к существующему пункту захоронения и захоронение) с накопленными и эксплуатационными отходами.

2. Техническая возможность демонтажа основного и вспомогательного оборудования, зданий и сооружений.

3. Возможность повторного использования основного и вспомогательного оборудования, зданий и сооружений.

4. Возможность удаления загрязненной почвы.

5. Необходимость наличия централизованных пунктов окончательной изоляции РАО.

6. Возможность переработки и захоронения образующихся нерадиоактивных отходов.

7. Полнота соответствия требованиям ядерной, радиационной и промышленной безопасности.

8. Наличие соответствующих ресурсов (финансовых, персонала и т.д.).

9. Наличие соответствующего нормативного правового обеспечения.

10. Социальные/политические факторы.

11. Возможность повторного использования территории ОИАЭ (части территории ОИАЭ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена структура СППОР при ВЭ ОИАЭ. Одной из основных функций, выполняемых СППОР, является в рамках многокритериального подхода и неопределенности исходных данных, выбор оптимального варианта набора технологических операций по ВЭ ОИАЭ. Предлагается минимальный набор основных критериев, определяющих выбранные варианты. Подчеркивается, что возможен учет дополнительных показателей для оценки при рассмотрении различных вариантов ВЭ. Создаваемая в рамках проекта СППОР дает возможность выбирать оптимальные решения на основе всех основных показателей ВЭ рассматриваемого объекта, таких как: стоимость, длительность и показатели, определяющие радиационную безопасность (обеспечение максимально возможного уровня защищенности персонала и населения от радиационного воздействия, недопущение выбросов и сбросов РВ в

окружающую среду в количествах, превышающих нормативы), оптимизируя эти показатели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абрамов А.А., Дорофеев А.Н., Комаров Е.А., Линге Ин.И., Абалкина И.Л., Ведерникова М.В., Бирюков Д.В., Иорданов А.С., Линге И.И., Ковальчук Д.В., Крючков Д.В., Уткин С.С., Алексахин Р.М., Хамаза А.А., Бочкарев В.В., Супатаева О.А., Кононов В.В., Тихоновский В.Л., Иванов О.П., Павленко В.И., Семенов С.Г., Чесноков А.В.* 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. Лаврова, чл.-кор. РАН И.И. Линге. М.: 2015, 316 с.
2. *Абалкина И.Л., Бирюков Д.В., Ведерникова М.В., Дорогов В.И., Илюшкин А.И., Иорданов А.С., Ковальчук Д.В., Линге И.И., Ободинский А.Н., Савкин М.Н., Самойлов А.А., Абрамов А.А., Дорофеев А.Н., Комаров Е.А., Линге Ин. И., Курындина Л.А., Бочкарев В.В., Хамаза А.А., Шадилов А.Е., Шарафутдинов Р.Б., Ковальчук А.А., Каманин А.Н., Куликов А.А., Иванова О.И., Косова О.Е., Лавров К.Н., Старкова М.В., Барчуков В.Г., Кочеткова О.А.* “Инвентаризация ядерно и радиационно опасных объектов. Ожидаемые результаты и перспективы их использования”. Москва, препринт ИБРАЭ РАН, № IBRAE-2014-05. 2014. 39 с.
3. *Абрамова А.А., Дорофеев А.Н., Комаров Е.А., Кудрявцев Е.Г., Большов Л.А., Линге И.И., Абалкина И.Л., Бирюков Д.В., Ведерникова М.В., Хамаза А.А., Шарафутдинов Р.Б., Бочкарев В.В.* К вопросу оценки объема ядерного наследия в атомной промышленности и на иных объектах мирного использования атомной энергии в России. Ядерная и радиационная безопасность. 2014. № 3 (73). С. 1—11.
4. Тезисы доклада “Научно-методическое сопровождение мероприятий федеральной целевой программы “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” в обеспечение мероприятия “Разработка и практическое использование при выводе из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов новых высокоэффективных технологий”. НТС ФБУ “НТЦ ЯРБ” от 17.11.2016 г.
5. Федеральная целевая программа “Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016—2020 годы и на период до 2030 года”.
6. International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations, IAEA, 2012. 195 p.
7. Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants. IAEA, 2016. 260 p.
8. Financing the Decommissioning of Nuclear Facilities. IAEA, 2016. 23 p.
9. *Емец П.Е., Ковалевич О.М., Крянев А.В., Шарафутдинов Р.Б.* Математические модели расчета инвестиционной эффективности вывода из эксплуа-

- тации ЯРОО. Препринт МИФИ 002-2007. М.: МИФИ, 2007. 27 с.
10. Емец П.Е., Ковалевич О.М., Крянев А.В., Неретин В.А., Шарафутдинов Р.Б. Системный подход при финансировании мероприятий по выводу из эксплуатации ЯРОО, классифицируемых в зависимости от категории их ЯРО. Препринт МИФИ 005-2007. М.: МИФИ, 2007. 23 с.
 11. Емец П.Е., Крянев А.В. Методика оценки экономической эффективности вывода из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов. Бюллетень по атомной энергии. 2008. № 11. С. 4–7.
 12. Емец П.Е., Крянев А.В. Инвестиционная эффективность вывода из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов (ЯРОО). Ядерная и радиационная безопасность. 2011. № 1 (59). С. 10–19.
 13. Бочкарев В.В., Крянев А.В., Ханбикова Д.Т. Ранжирование ядерно и радиационно-опасных объектов, эксплуатация которых прекращена. “Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем”: материалы Всероссийской конференции с международным участием, Москва, РУДН, 2014. С. 195–197.
 14. Addressing Uncertainties in Cost Estimates for Decommissioning Nuclear Facilities. IAEA, 2017. 68 p.
 15. Крянев А.В., Лукин Г.В. Математические методы обработки неопределенных данных. М.: Физматлит, 2006.
 16. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. М.: Наука, 1981.
 17. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009.
 18. Семёнов С.С., Воронов Е.М., Полтавский А.В., Крянев А.В. Методы принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем. М.: URSS, 2015.
 19. РБ-153-18 “Рекомендации по обоснованию выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии”. Утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 29 декабря 2018 г. № 666. 22 с.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta “MIFI”, 2020, vol. 9, no. 3, pp. 256–261

Structure of the Support System for Making Optimal Decisions during the Decommissioning of Nuclear Facilities

**V. V. Bochkarev^{a,b}, B. D. Brilliantov^{a,b}, A. V. Kryanev^{a,c,#}, A. A. Batsulin^{a,b}, S. G. Klimanov^a,
O. Yu. Litvinenko^{a,b}, D. V. Mamai^{a,b}, D. E. Sliva^a, D. S. Smirnov^a, P. A. Stryapushkin^{a,b},
V. I. Tereshkin^{a,b}, and D. T. Khanbikova^a**

^a National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

^b Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, 107140 Russia

^c Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, 141980 Russia

[#]e-mail: avkryanev@mephi.ru

Received May 28, 2020; revised July 1, 2020; accepted July 7, 2020

Abstract—The structure of the optimal decision support system for the decommissioning of nuclear facilities is examined. The proposed structure provides the analysis of various options for decommissioning the facility under consideration for atomic energy use and the selection of the best option for decommissioning it. The system takes into account uncertainties in the source data, including uncertainties that are described using fuzzy values. The decommissioning options are evaluated by several particular indicators, reducing them to two or three aggregated indicators.

Keywords: system, decision making, decommissioning, nuclear facilities, optimal option, indicators, uncertainty

DOI: 10.1134/S2304487X20030025

REFERENCES

1. Abramov A.A., Dorofeev A.N., Komarov E.A., Linge In.I., Abalkina I.L., Vedernikova M.V., Birukov D.V., Iordanov A.S., Linge I.I., Kovalchuk D.V., Kruchkov D.V., Utkin S.S., Aliksahin R.M., Hamaza A.A., Bochkarev V.V., Supataeva O.A., Kononov V.V., Tikhonovsky V.L., Ivanov O.P., Pavlenko V.I., Semenov S.G., Chesnokov A.V. Zakluchitel'nii tom trehtomnoi monografii “Problemi yadernogo naslediya I puti ih resheniya”, posvyashenni zavershaemomu etapu jiznennogo cikla obekta ispolzovaniya atomnoi energii – vivodu iz ekspluatatsii. “Problemi yadernogo naslediya I puti ih resheniya. Vivod iz ekspluatatsii”. Pod obshei redakciei akademika RAN L.A. Bolshova, N.P. Laverova, chl.-kor. RAN I.I. Lingue. [The final volume of the three-volume monograph “Problems of Nuclear Legacy and the Ways of Their Solution”, dedicated to the final stage of the life cycle of an atomic energy use facility – decommissioning. “The problems of nuclear legacy and ways to solve them. Removal from service”. Under the gen-

- eral editorship of the academician of the RAS L.A. Bolshova, N.P. Laverova, Corr. RAS I.I. Linge]. M.: 2015, 316 pp.
2. Abalkina I.L., Birukov D.V., Vedernikova M.V., Dorogov V.I., Ilushkin A.I., Iordanov A.S., Kovalchuk D.V., Linge I.I., Obodinski A.N., Savkin M.N., Samoilov A.A., Abramov A.A., Dorofeev A.N., Komarov E.A., Linge I.I., Kurindina L.A., Bochkarev V.V., Hamaza A.A., Shadilov A.E., Sharafutdinov R.B., Kovalchuk A.A., Kamanin A.N., Kulikov A.A., Ivanova O.I., Kosova O.E., Lavrov K.N., Starkova M.V., Barchukov V.G., Kochetkova O.A. Inventarizatsiya yadernoy i radiatsionno opasnykh obektov. Ojidaemye rezultaty i perspektivy ih ispolzovaniya. [Inventory of nuclear and radiation hazardous facilities. Expected Results and Prospects for Their Use]. Moscow, preprint IBRAE RAS, No. IBRAE-2014-05, 2014, 39 pp.
 3. Abramov A.A., Dorofeev A.N., Komarov E.A., Kudryavtsev E.G., Bolshov L.A., Linge I.I., Abalkina I.L., Birukov D.V., Vedernikova M.V., Hamaza A.A., Sharafutdinov R.B., Bochkarev V.V. K voprosu otsenki obema yadernogo naslediya v atomnoy promyshlennosti i na inih obektakh mirnogo ispolzovaniya atomnoy energii v Rossii. [On the issue of assessing the volume of nuclear legacy in the nuclear industry and other facilities for the peaceful use of atomic energy in Russia]. Nuclear and radiation safety, No. 3 (73), 2014, pp. 1–11.
 4. Tezisi doklada "Nauchno-metodicheskoe soprovozhdenie meropriyatiy federalnoy yselevoi programmy "Obespechenie yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti na 2016–2020 godi i na period do 2030 goda" po podgotovke k vivodu i vivodu iz ekspluatatsii obektov yadernogo naslediya i po obrasheniю s osobimi radioaktivnymi othodami" v obespechenie meropriyatiya "Razrabotka i prakticheskoe ispolzovanie pri vivode iz ekspluatatsii yadernoy i radiatsionno opasnykh obektov novih visoko tehnologichnykh tehnologiy". [Abstracts of the report "Scientific and methodological support for the activities of the federal target program "Ensuring Nuclear and Radiation Safety for 2016–2020 and for the period until 2030" on preparation for the decommissioning and decommissioning of nuclear heritage objects and on the management of special radioactive waste" events "Development and practical use of new highly effective technologies in the decommissioning of nuclear and radiation hazardous facilities"]. NTS FBU "STC NRS" dated 11/17/2016.
 5. Federalnaya tselevaya programma "Obespechenie yadernoy i radiatsionnoy bezopasnosti na 2016–2020 godi i na period do 2030 goda" [Federal Target Program "Ensuring Nuclear and Radiation Safety for 2016–2020 and for the Period until 2030"].
 6. International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations, IAEA, 2012, 195 p.
 7. Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants. IAEA, 2016, 260 pp.
 8. Financing the Decommissioning of Nuclear Facilities. IAEA, 2016, 23 pp.
 9. Emets P.E., Kovalevich O.M., Kryanev A.V., Sharafutdinov R.B. Matematicheskie modeli rascheta investitsionnoy effektivnosti vivoda iz ekspluatatsii YaROO. [Mathematical models for calculating the investment efficiency of decommissioning a nuclear power plant]. Preprint MEFHI 002-2007. M.: MEFHI, 2007, 27 pp.
 10. Emets P.E., Kovalevich O.M., Kryanev A.V., Neretin V.A., Sharafutdinov R.B. Sistemni podhod pri finansirovani meropriyatiy po vivodu iz ekspluatatsii YaROO, klassifitsiruemykh v zavisimosti ot kategorii ih YaROO. [A systematic approach to financing the decommissioning of nuclear weapons, classified according to the category of their nuclear weapons]. Preprint MEFHI 005-2007. M.: MEFHI, 2007, 23 pp.
 11. Emets P.E., Kryanev A.V. Metodika otsenki ekonomicheskoy effektivnosti vivoda iz ekspluatatsii yadernoy i radiatsionno opasnykh obektov. [Methodology for assessing the economic efficiency of decommissioning of nuclear and radiation hazardous facilities], Atomic Energy Bulletin, 2008, No. 11, pp. 4–7.
 12. Emets P.E., Kryanev A.V. Investitsionnaya effektivnost vivoda iz ekspluatatsii yadernoy i radiatsionno opasnykh obektov (YaROO). [Investment efficiency of decommissioning of nuclear and radiation hazardous facilities (NROO)]. Nuclear and radiation safety. 2011, No. 1 (59), pp. 10–19.
 13. Bochkarev V.V., Kryanev A.V., Hanbikova D.T. Ranjirovanie yadernoy i radiatsionno opasnykh obektov, ekspluatatsiya kotorih prekrashena. "Informatsionno – telekommunikatsionnye tehnologii i matematicheskoe modelirovanie vicokotekhnologicheskikh sistem": materialy Vserossiskoy konferentsii s mejdunarodnim uchastiem. [Ranking of nuclear and radiation hazardous facilities whose operation has been discontinued. "Information and telecommunication technologies and mathematical modeling of high-tech systems": materials of the All-Russian Conference with international participation]. Moscow, PFUR, 2014, pp. 195–197 (In Russian).
 14. Addressing Uncertainties in Cost Estimates for Decommissioning Nuclear Facilities. IAEA, 2017, 68 p.
 15. Kryanev A.V., Lukin G.V. Matematicheskie metody obrabotki neopredelennykh dannykh. [Mathematical methods for processing uncertain data], M.: Fizmatlit, 2006.
 16. Orlovskii S.A. Problemy prinyatiya reshenii pri nechetkoi ishodnoi informatsii [Decision problems with fuzzy source information]. M.: Nauka, 1981.
 17. Pegat A. Nечеткое моделирование и управление. [Fuzzy modeling and control]. M.: BINOM. Knowledge Laboratory, 2009.
 18. Semenov S.S., Voronov E.M., Poltavskii A.V., Kryanev A.V. Metody prinyatiya reshenii v zadachah otsenki kachestva i tehnicheskogo urovnya slojnykh tehnicheskikh sistem. [Decision-making methods for assessing the quality and technical level of complex technical systems]. M.: URSS, 2015.
 19. RB-153-18 "Rekomendatsii po obosnovaniyu vibora variant vivoda iz ekspluatatsii obektov ispolzovaniya atomnoy energii". Utverzhdeno prikazom Federalnoi sluzhby po ekologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 29 dekabrya 2018 g. ["Recommendations on the justification of the choice of option for decommissioning of nuclear facilities". Approved by order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision of December 29, 2018"]. Moscow, № 666, 22 pp.