

УДК 504.054

Большов Л.А., Саркисов А.А., Арутюнян Р.В., Линге И.И., Баринов В.Н., Зайцев И.В., Калинин Р.И., Казаков С.В., Шведов П.А. МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРИОРИТЕТНОСТИ РАБОТ ПО КОМПЛЕКСНОЙ УТИЛИЗАЦИИ АТОМНЫХ ПОДВОДНЫХ ЛОДОК. Препринт № IBRAE-2003-25. Москва: Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. 2003. 25 с.

Аннотация

На основе данных, опубликованных в открытой печати, проведена оценка современных проблем комплексной утилизации АПЛ. Сделан вывод о важности и актуальности создания методики выбора приоритетных направлений работ и объектов утилизации. Разработаны перечни возможных аварийных ситуаций при различных видах работ, представлены факторы, непосредственно влияющие на принятие решений.

В качестве основных инструментов исследования предложены матрица рисков и шкала ядерных событий, на базе которых разработан алгоритм решения задачи выбора приоритетов.

Bolshov L., Sarkisov A., Arutyanyan R., Linge I., Barinov V., Zaitsev I., Kalinin R., Kazakov S., Shvedov P. METHODOLOGICAL APPROACH TO DETERMINING TASK PRIORITY IN COURSE OF COMPLEX UTILIZATION OF NUCLEAR SUBMARINES. Preprint IBRAE-2003-25. Moscow: Nuclear Safety Institute RAS. December 2003. 25 p.

Abstract

Previously published data are used to assess current problems related to complex utilization of NPS. It is concluded that the development of a methodology to choose priorities of utilization activities and objects is urgent and important. The lists of possible emergency situations for various types of activities are created; factors that directly affect decision making are presented.

The main suggested investigation tools are risk matrix and nuclear event scale; the tools are used to develop an algorithm for priority choice.

Методологический подход к определению приоритетности работ по комплексной утилизации атомных подводных лодок

*Л. А. Большов, А. А. Саркисов, Р. В. Арутюнян, И. И. Линге, В. Н. Баринов, И. В. Зайцев,
Р. И. Калинин, С. В. Казаков, П. А. Шведов*

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
115191, Москва, ул. Б. Тульская, 52
тел: (095) 955-22-36, факс: (095) 958-11-51, эл. почта: ziv@ibrae.ac.ru

Содержание

1 Введение.....	3
2 Исходные методологические положения.....	5
3 Цели и принципы выбора приоритетных мероприятий.....	7
4 Матрица рисков (общее описание).....	13
5 Подходы к классификации тяжести последствий.....	13
6 Постановка задачи исследования.....	16
7 Шкала последствий возможных событий (аварий) в процессах утилизации.....	17
8 Матрица рисков для объектов утилизации АПЛ.....	19
9 Блок-схема решения поставленной задачи.....	21
10 Итоговая характеристика перспективности предложенного методологического подхода.....	27
Литература.....	29

1 Введение

С конца 80-х годов прошлого века начался массовый вывод из эксплуатации атомных подводных лодок (АПЛ). Всего по состоянию на декабрь 2003 г.: выведено из эксплуатации АПЛ — 193; с выгруженным отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) — 123; полностью утилизировано — 94; в ожидании утилизации — 99.

Начало работ по утилизации совпало с политическими переменами в России, которые сопровождалось глубоким экономическим спадом. Поэтому в ряде случаев важные решения принимались в условиях крайнего дефицита финансовых возможностей и, как следствие этого, решались ограниченные задачи.

В последние годы темпы и масштабы работ по утилизации АПЛ, обращению с ОЯТ и радиоактивными отходами (РАО) резко возросли [1–5]. Существенный вклад в решение проблем, связанных с прошлым ядерным противостоянием, может и должно внести международное сотрудничество.

В этой связи становится крайне важной и необходимой разработка единого – воспринимаемого как отечественными, так и зарубежными специалистами – методологического подхода к расстановке приоритетных направлений работ в процессе комплексной утилизации АПЛ. Решение этой задачи позволит обоснованно сосредоточить собственные и совместные со странами-донорами усилия на выполнении первоочередных мероприятий.

До 2010 г. с учетом дополнительного вывода из эксплуатации предстоит выгрузить ОЯТ из 77 АПЛ, утилизировать с формированием реакторных блоков (РБ) 106 АПЛ (из них 3 АПЛ с аварийными реакторами), а также предстоит выгрузить ОЯТ и утилизировать 4 надводных корабля с ядерными энергетическими установками (НК с ЯЭУ).

В процессе комплексной утилизации АПЛ и НК с ЯЭУ непосредственно участвуют суда атомно-технологического обслуживания (АТО), плавучие и береговые технические базы (ПТБ, БТБ), судоремонтные предприятия, комплексы по переработке радиоактивных отходов, хранилища РАО, пункты временного хранения отходов, завод РТ-1 по переработке ОЯТ на ПО «Маяк», транспортные системы, системы мониторинга состояния окружающей среды. При ремонте и утилизации АПЛ

выгружается ОЯТ, образуются жидкие (ЖРО) и твердые радиоактивные отходы (ТРО). Большое количество ОЯТ, ЖРО и ТРО накоплено в хранилищах судов АТО и на береговых технических базах. Многие суда АТО находятся в аварийном состоянии и представляют серьезную опасность радиоактивного загрязнения окружающей среды. Уже в настоящее время подлежит утилизации 41 судно АТО. На четырех береговых технических базах хранилища ОЯТ, РАО и большая часть сооружений и территории находятся в аварийном состоянии, загрязняют окружающую среду и требуют дезактивации и реабилитации. [6]

Все выведенные из эксплуатации и подлежащие утилизации АПЛ являются источниками потенциальной ядерной, радиационной и экологической опасности, обусловленной следующими факторами:

- наличием в реакторах ОЯТ, благодаря чему существует вероятность возникновения самопроизвольной цепной ядерной реакции (СЦР) — ядерной аварии;
- значительной накопленной активностью в ОЯТ и элементах конструкции реакторного отсека;
- возможностью выбросов образующихся при утилизации токсичных газов, пыли и аэрозолей.

Так, в случае ядерной аварии с учетом накопления осколочной активности (подлежащие утилизации корабли, как правило, имеют значительную выработку энергозапаса активной зоны — а.з.) могут возникнуть последствия, превышающие на 1-2 порядка последствия аварии на АПЛ «Б-431» в б. Чажма в 1985 г.

Вероятность возникновения нештатных ситуаций на утилизируемых АПЛ возрастает с каждым годом. Это объясняется тем, что при длительном хранении АПЛ на плаву происходит разрушение корпусных конструкций и систем обеспечения живучести. Аварии на них могут произойти по многим причинам, но наиболее вероятными, по мнению многих специалистов-практиков, являются ошибки персонала, пожары и затопления.

Ядерный и радиационный риски при утилизации АПЛ и судов с ЯЭУ значительно возрастают по сравнению с их строительством и эксплуатацией, поскольку в 2–2,5 раза увеличивается количество ядерно- и радиационно опасных операций, а также в 4–5 раз возрастает объем образующихся РАО [7].

Аварийные ситуации, сопровождающиеся выходом радионуклидов в окружающую среду, возможны как при отстое АПЛ и выгрузке ОЯТ, так и непосредственно при проведении демонтажных работ. Их причинами могут быть отказы технологических средств и оборудования, нарушения технологического процесса, ошибки персонала, а также внешние причины — экстремальные погодные явления, столкновение кораблей и судов с ЯЭУ, падение летательных аппаратов, взрывы (в том числе диверсии) и др. Ситуация усугубляется тем, что около 80 % АПЛ являются кораблями первого и второго поколений, т.е. имеют большую степень изношенности основного оборудования и корпусных конструкций. Дополнительную радиоэкологическую опасность создает массовое хранение на плаву АПЛ отстоя и сформированных реакторных блоков с учетом того, что длительность хранения может составлять десятки (по проекту до 100) лет [7, 8].

Существующие технологии, применяемые при утилизации АПЛ в штатном режиме, достаточно хорошо известны и позволяют решить рассматриваемую проблему с минимальным риском. Особое место в ряду проблем, связанных с утилизацией АПЛ, занимают вопросы утилизации АПЛ с аварийными ЯЭУ. В настоящее время отсутствует отработанная технология выгрузки поврежденных активных зон, которая является сложной и опасной операцией, связанной с переоблучением персонала, высокими уровнями возможного загрязнения и рекритичностью. Единственный опыт выгрузки таких зон — это выгрузка поврежденного топлива из а.з. реактора второго блока АЭС «Три-Майл Айленд» (США). Проблему осложняет также и то обстоятельство, что поврежденные топливные элементы не могут быть переработаны на комбинате «Маяк».

В настоящее время в отстойе находится 3 АПЛ с аварийными ЯЭУ (все на Тихоокеанском флоте), на которых произошли аварии, связанные с разгерметизацией первого контура и разрушением тепловыделяющих сборок (ТВС) [6, 7]. Длительная стоянка аварийных АПЛ на плаву с невыгруженными а.з., высоким уровнем радиоактивности и теряющими герметичность цистернами главного балласта создает потенциальную ядерную, радиационную и экологическую угрозу местам их базирования.

Утилизировать эти АПЛ известными способами не представляется возможным, поэтому для каждой из них необходимо разработать специальную технологию. Аналогичная ситуация возникает с утилизацией АПЛ с жидкометаллическим топливом (ЖМТ) и обращением с дефектным ОЯТ.

В нормальных (штатных) же условиях длительного отстоя АПЛ после вывода из эксплуатации и при их утилизации вопросы обеспечения ядерной и радиационной безопасности решались в установленном порядке и до настоящего времени не вызывали существенного ухудшения радиологической обстановки в регионах. Однако, нарастание темпов утилизации и несоответствия роста объемов ОЯТ и темпов вывоза его из регионов, увеличение количества РАО в пунктах отстоя и утилизации АПЛ не позволяют считать достигнутый уровень обеспечения безопасности достаточным и не требующим доработок.

Большую потенциальную опасность в настоящее время представляют собой хранилища ОЯТ как находящиеся на плаву, так и береговые. Их общий радиационный потенциал в Северном регионе составляет более $15 \cdot 10^6$ Ки, в том числе около $13 \cdot 10^6$ Ки в Мурманской области. Значительный объем радиационного потенциала имеют ЖРО и ТРО, образовавшиеся при эксплуатации и утилизации атомного флота. Он характеризуется следующими значениями в Северо-Западном регионе: ТРО — всего более 25 500 куб.м с общей активностью около $7,75 \cdot 10^3$ Ки; ЖРО — всего более 5000 куб.м с общей активностью около 45 Ки. Реабилитация этих объектов также сопряжена с большим риском.

В настоящее время нельзя исключать возможности совершения террористических актов, в результате которых могут возникнуть непредвиденные состояния ядерных реакторов и хранилищ ОЯТ при тяжелых внешних воздействиях на них. В авариях подобного типа не исключено перераспределение топлива и изменение его конфигурации, при которых возможны, в том числе и ядерные инциденты. Кроме того, к таким авариям могут приводить ошибки персонала, пожары, столкновения АПЛ с другими объектами, падения летательных аппаратов, затопления АПЛ и РБ, воздействие неблагоприятных погодных условий (ураганы, штормы, землетрясения, ливни). Детальных исследований этих воздействий на ядерно- и радиационно опасные объекты еще не проводилось. Поэтому для обеспечения в первую очередь ядерной безопасности необходимо радикально решать вопросы ускорения вывоза ОЯТ из береговых хранилищ и выгрузки его из АПЛ для дальнейшей переработки.

Радиационный потенциал отработавшего топлива, не выгруженного из 35 АПЛ Северного флота, составляет $5,2 \cdot 10^6$ Ки, т.е. около 50 % от всего ОЯТ, находящегося в Северном регионе. При современном положении дел (неукомплектованность персоналом, неудовлетворительное материально-техническое обеспечение, малые объемы профилактического обслуживания, практически полное отсутствие доковых осмотров и ремонтов выведенных из эксплуатации АПЛ, передача части АПЛ гражданским экипажам и др.) не исключается и вероятность аварийного затопления таких кораблей. Данные факты уже имели место на Тихоокеанском и Северном флотах. Радиационные последствия таких инцидентов могут быть и незначительными, если не будет нарушена целостность защитных барьеров. В то же время последствия могут быть значительно опаснее, если затонет лодка с аварийным реактором или с реактором в процессе выгрузки топлива. Все эти опасения в полной мере относятся и к судам АТО, на которых хранится и перевозится ядерное топливо.

Работы по утилизации АПЛ приводят к значительным выбросам токсичных газообразных, аэрозольных и пылевых образований с выходом их в атмосферу. Используемые технологии небезопасны, а существующие в настоящее время технические средства способны лишь частично защитить персонал, и не позволяют в необходимой мере избежать засорений токсичными нерадиоактивными продуктами утилизации воздушной среды, грунта и акватории вблизи предприятий, осуществляющих основные работы. Несмотря на непревышение предельно допустимых концентраций (ПДК) отдельных загрязнителей, в большинстве случаев отмечается постепенное возрастание их концентраций. Это требует дополнительных мер по совершенствованию существующих систем экологического мониторинга на территориях и вблизи предприятий, утилизирующих АПЛ и осуществляющих обращение с ОЯТ, ЖРО и ТРО.

В итоге, анализ современных проблем комплексной утилизации АПЛ и экологической реабилитации радиационно опасных объектов (РОО) позволяет сделать вывод о необходимости создания методологических основ выявления критических направлений работ, правильной расстановки акцентов и приоритетов в условиях ограниченных бюджетных ассигнований и сроков.

2 Исходные методологические положения

Под комплексной утилизацией и экологической реабилитацией выведенных из эксплуатации радиационно опасных объектов атомного флота подразумевается широкомасштабная научная,

инженерно-техническая и экологическая проблема, охватывающая множество объектов и большой комплекс взаимосвязанных технологий.

При анализе этой проблемы в целом, среди рассматриваемых объектов должны быть не только подлежащие разделке атомные подводные лодки, но и береговые и плавучие базы перезарядки реакторов, суда атомно-технологического обслуживания, вовлеченные в процесс судоремонтные предприятия, комплексы по переработке радиоактивных отходов, хранилища РАО, береговые пункты хранения реакторных отсеков, пункты временного контейнерного хранения отработавшего ядерного топлива, транспортные системы, системы мониторинга состояния окружающей среды.

Объекты утилизации, в основном, сконцентрированы в относительно компактных регионах. Однако необходимо учитывать и транспортные связи регионов утилизации с ПО «Маяк» — единственным российским предприятием по переработке ОЯТ корабельных реакторов, его производственные мощности.

Типовая схема комплексной утилизации АПЛ представлена на рисунке 1. Она соответствует принятой «Концепции комплексной утилизации АПЛ и НК с ЯЭУ» [9].

В ряду технологических операций, вовлеченных в процесс утилизации, можно выделить выгрузку ОЯТ, транспортно-технологическую схему обращения с ОЯТ, жидкими и твердыми радиоактивными отходами, экологическую реабилитацию загрязненных территорий и акваторий и др. Наиболее сложными, ответственными и потенциально опасными этапами технологического комплекса утилизации АПЛ, безусловно, являются мероприятия, связанные с обращением с ОЯТ, а также с ЖРО и ТРО [10].

Успешное решение проблемы комплексной утилизации в первую очередь будет зависеть от правильной (оптимальной) расстановки акцентов, сосредоточения усилий на осуществлении первоочередных мероприятий. Установление научно обоснованной последовательности реализации отдельных направлений (способов) и объектов утилизации необходимо по ряду причин. Основными из них являются: существование реальных вероятностей возникновения и развития аварийных ситуаций на объектах утилизации, наличие прогнозируемых уровней последствий аварийных ситуаций, ограничения на бюджетные ассигнования и сроки выполнения мероприятий по комплексной утилизации.

Отсутствие в настоящее время каких-либо структурированных в системном плане и тем более формализованных подходов к решению задачи выбора приоритетных направлений работ свидетельствует о ее методологической сложности.

Анализ современного состояния и хода реализации процесса комплексной утилизации АПЛ позволил предложить для дальнейшего исследования ряд актуальных направлений работ и перечень соответствующих задач, подлежащих решению в рассматриваемой сфере (см. рис. 2).

Рассматриваемые направления работ, комплекс мероприятий, объектов, взаимосвязанных технологий, транспортных цепочек, совокупность природных и социально-политических факторов представляют собой классический пример сложной системы. Нахождение оптимальных решений для подобных систем невозможно без системного многокритериального, многофакторного анализа.

В ходе такого анализа должны быть дополнительно учтены и надлежащим образом сбалансированы международные и национальные, общедоказательные и региональные, а также межведомственные интересы. Другим важным обстоятельством является необходимость учета множества находящихся в сложнейшем взаимодействии факторов — инженерно-технических, экономических, экологических, социальных и др., в том числе особенностей реального хода практической реализации конкретных мероприятий.

Для постоянного и конкретного сопровождения ситуации с утилизацией АПЛ недостаточно выполненных ранее на эвристическом уровне интегральных оценок. Необходимы контроль и анализ состояния каждого радиационно опасного объекта (АПЛ, РБ, ПТБ, БТБ, хранилищ РАО, спец. транспорта и др.) для обеспечения приоритетных работ по утилизации АПЛ, кораблей с ЯЭУ и судов АТО, реабилитации объектов, территорий и акваторий. При этом следует учитывать особенность риска в атомной энергетике, которая состоит в том, что при весьма малой вероятности крупной аварии на ядерно-радиационном объекте, масштабы возможного ущерба могут быть значительными. Поэтому специалисты все чаще высказываются за продолжение всестороннего исследования факторов, оказывающих влияние на принятие обоснованных решений по выбору приоритетных работ при утилизации АПЛ, за более глубокие исследования по комплексной оценке последствий утилизации АПЛ и экологической реабилитации радиационно опасных объектов обслуживающей инфраструктуры, их влияния на население и окружающую среду.

К числу важнейших **факторов**, непосредственно влияющих на принятие решений при выборе и организации приоритетных работ по утилизации АПЛ целесообразно отнести следующие:

Степень опасности объектов и технологий (Безопасность) для персонала, населения и окружающей среды (угрозы и риски).

Экономика — годовой объем бюджетного и внебюджетного финансирования, международной помощи; стоимость проектов и мероприятий при обеспечении комплексной утилизации АПЛ с момента вывода их из эксплуатации.

Принятая отраслевая концепция комплексной утилизации АПЛ и проведения сопутствующих работ.

Существующие федеральные и международные **нормативно-правовые акты**.

Производственные возможности предприятий, занятых в выполнении комплексной программы утилизации.

Ведомственные интересы и нормативные документы Минатома России, Минтранса России, Россудостроения, Военно-Морского Флота.

Региональные интересы и общественное мнение.

Интересы стран-инвесторов.

Интересы международного сообщества, результаты двусторонних и многосторонних договоренностей.

Обоснование приоритетных объектов и работ по комплексной утилизации АПЛ безусловно должно базироваться на учете всей совокупности определяющих факторов.

Однако различная природа и сложная взаимозависимость этих факторов не позволяют даже приблизиться к возможности их одновременного учета в рамках единого аналитического подхода.

Поэтому на первом этапе исследований предлагается обоснование приоритетов произвести по доминирующему в ряду других факторов критерию радиоэкологической безопасности.

Такой подход может быть продиктован следующими соображениями:

1. Специфика исследованных объектов такова, что именно радиоэкологические последствия являются основной потенциальной опасностью, связанной с утилизацией как самих АПЛ, так и обслуживающей их инфраструктуры.
2. Фактический ущерб, причиняемый теми или иными аварийными ситуациями или инцидентами при выполнении утилизационных мероприятий определяется, главным образом, их радиоэкологическими последствиями. При этом подлежащие компенсации размеры ущербов, как показывает опыт других радиационных аварий, из-за воздействия многих косвенных факторов многократно превосходят их реальные уровни.
3. Связанная с утилизацией реальная и потенциальная радиоэкологическая опасность массовым сознанием воспринимается гипертрофированно, что приводит к обостренному и настороженному отношению общественности и региональных властей к проблеме утилизации в целом.
4. Международная помощь в проведении работ по утилизации выведенных из боевого состава атомных кораблей и объектов обеспечивающей инфраструктуры в значительной мере стимулируется стремлением снизить потенциальную угрозу трансграничного радиоэкологического воздействия на территории и акватории прилегающих к региону стран.

Несмотря на доминирующую роль фактора безопасности, определение приоритетов по этому критерию является лишь первым этапом исследования.

На последующих этапах полученные результаты корректируются и уточняются с учетом анализа других определяющих факторов. Аналитические подходы возможны частично и при решении отдельных задач, в том числе и на этих этапах, но все же здесь преобладающими будут экспертные оценки.

3 Цели и принципы выбора приоритетных мероприятий

Представляется важной и актуальной разработка единой процедуры выбора приоритетных объектов комплексной утилизации АПЛ и применяемых при этом технологий. В условиях наличия многих факторов, влияющих на выбор для реализации конкретных объектов, в качестве главного итога процесса комплексной утилизации предлагается рассматривать максимально эффективное повышение безопасности для персонала, населения и окружающей среды.

Система выбора приоритетных проектов комплексной утилизации должна строиться исходя из **глобальной цели — эффективной реализации комплекса организационно-технических**

мероприятий, которые обеспечат ликвидацию или надежную изоляцию радиационно опасных объектов и материалов, защиту здоровья человека и охрану окружающей среды. В соответствии с международно-принятыми подходами к процедурам по обращению с потенциально опасными объектами, включая РАО, эти мероприятия должны основываться, в том числе и на следующих принципах:

Рис. 1. Схема комплексной утилизации АПЛ

Объекты и направления работ при комплексной утилизации АПЛ

БТБ	АПЛ	АНК	Суда АТО	Реакторные блоки	Вывоз ОЯТ из регионов	Обращение с РАО																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Обращение с ОЯТ</td></tr> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Обращение с ТРО</td></tr> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Обращение с ЖРО</td></tr> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Реабилитация зданий, территорий и акваторий</td></tr> </table>	Обращение с ОЯТ	Обращение с ТРО	Обращение с ЖРО	Реабилитация зданий, территорий и акваторий	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Отстой АПЛ, транспортировка на СРЗ</td></tr> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Выгрузка ОЯТ</td></tr> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Формирование РБ</td></tr> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Аварийные АПЛ</td></tr> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">АПЛ с ЖМТ</td></tr> </table>	Отстой АПЛ, транспортировка на СРЗ	Выгрузка ОЯТ	Формирование РБ	Аварийные АПЛ	АПЛ с ЖМТ	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">ТАКР</td></tr> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">«Адмирал Ушаков»</td></tr> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">БРАЗК «Урал»</td></tr> </table>	ТАКР	«Адмирал Ушаков»	БРАЗК «Урал»	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Выгрузка ТРО и ЖРО, конвертовка</td></tr> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Передача Минатому, отстой</td></tr> </table>	Выгрузка ТРО и ЖРО, конвертовка	Передача Минатому, отстой	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Формирование РО</td></tr> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Создание ЦДХ РО</td></tr> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">РБ с ЖМТ</td></tr> </table>	Формирование РО	Создание ЦДХ РО	РБ с ЖМТ	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Ремонт подъездных путей</td></tr> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Обращение с ОЯТ с ЖМТ</td></tr> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Дефектное топливо</td></tr> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Хранение ОЯТ в ПВХ</td></tr> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Доставка ОЯТ на ПО «Маяк»</td></tr> </table>	Ремонт подъездных путей	Обращение с ОЯТ с ЖМТ	Дефектное топливо	Хранение ОЯТ в ПВХ	Доставка ОЯТ на ПО «Маяк»	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Создание мощностей по временному хранению и переработке ТРО</td></tr> <tr><td style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Создание региональных хранилищ ТРО</td></tr> </table>	Создание мощностей по временному хранению и переработке ТРО	Создание региональных хранилищ ТРО
Обращение с ОЯТ																														
Обращение с ТРО																														
Обращение с ЖРО																														
Реабилитация зданий, территорий и акваторий																														
Отстой АПЛ, транспортировка на СРЗ																														
Выгрузка ОЯТ																														
Формирование РБ																														
Аварийные АПЛ																														
АПЛ с ЖМТ																														
ТАКР																														
«Адмирал Ушаков»																														
БРАЗК «Урал»																														
Выгрузка ТРО и ЖРО, конвертовка																														
Передача Минатому, отстой																														
Формирование РО																														
Создание ЦДХ РО																														
РБ с ЖМТ																														
Ремонт подъездных путей																														
Обращение с ОЯТ с ЖМТ																														
Дефектное топливо																														
Хранение ОЯТ в ПВХ																														
Доставка ОЯТ на ПО «Маяк»																														
Создание мощностей по временному хранению и переработке ТРО																														
Создание региональных хранилищ ТРО																														

Создание объектовых (локальных) и ведомственных информационно-аналитических центров радиационного мониторинга, безопасности и кризисных ситуаций

Совершенствование физической защиты, учета и контроля радиоактивных материалов

Совершенствование нормативно-правового обеспечения утилизации

Рис. 2. Актуальные направления работ по комплексной утилизации АПЛ

Защита здоровья человека.

Обращение с радиоактивными, вредными и токсичными отходами при комплексной утилизации осуществляется таким образом, чтобы обеспечить приемлемый уровень защиты здоровья человека. При этом защита здоровья и безопасность жизни человека являются высшими приоритетами, т.е. провозглашается их приоритет над достижением производственных целей.

Охрана окружающей среды.

Обращение с радиоактивными, токсичными и иными вредными отходами осуществляется таким образом, чтобы обеспечить приемлемый уровень охраны окружающей среды. Охрана окружающей среды, так же как и защита здоровья населения, является высшим приоритетом при осуществлении деятельности по комплексной утилизации АПЛ и экологической реабилитации РОО.

Защита за пределами национальных границ.

Обращение с радиоактивными и иными вредными отходами осуществляется с учетом возможных последствий для здоровья человека и окружающей среды за пределами национальных границ. При этом уровни влияния за пределами национальных границ не должны превышать уровней, согласованных в рамках международных договоренностей.

Защита будущих поколений.

Обращение с радиоактивными и иными вредными отходами осуществляется таким образом, чтобы предсказуемые последствия для здоровья будущих поколений не превышали соответствующие уровни последствий, которые приемлемы в наши дни. При этом уровни воздействий должны не просто соответствовать нормативным уровням, принятым в настоящее время, но и быть оптимизированными с учетом социально-экономических возможностей.

Бремя для будущих поколений.

Обращение с радиоактивными и иными вредными отходами осуществляется таким образом, чтобы не налагать чрезмерного бремени на будущие поколения. Реализация этого принципа предполагает минимизацию уровней воздействия на здоровье человека и окружающую среду с учетом наиболее консервативных сценариев воздействия при построении оценок вреда и ущербов, обусловленных мероприятиями по комплексной утилизации АПЛ. В частности, необходимо учитывать (или предполагать), что освоение территорий, на которых в настоящее время проводятся основные работы по комплексной утилизации АПЛ, в будущем будет вестись гораздо более интенсивно, вследствие чего оценки допустимых воздействий на персонал, население и окружающую среду уровней содержания загрязнителей в природных объектах должны быть выполнены по консервативным сценариям использования территорий и ресурсов окружающей среды.

Для реализации последних двух принципов все утилизируемые объекты должны быть приведены в безопасное конечное состояние, которое обеспечивает защиту существующих поколений и минимизирует бремя для последующих поколений. Это однозначно предполагает, что на ряде этапов и процессов утилизации (таких как выгрузка ОЯТ, обращение с накопленными РАО и др.), существующие риски для персонала, населения и окружающей среды могут возрасти, но при этом совокупные риски (за достаточно длительные временные периоды — в пределе стремящиеся к бесконечности) должны быть минимизированы. В этой связи возникает необходимость обязательного рассмотрения и решения задачи эффективного обеспечения безопасности на всем комплексе объектов утилизации. Таким образом, содержанием работ может быть ликвидация опасных объектов, повышение безопасности объектов и технологических процессов, снижение экологического воздействия на окружающую среду и человека, повышение готовности к реагированию на чрезвычайные ситуации.

Для одного объекта может быть предложено несколько решений, в том числе альтернативных. Например, для конкретного объекта могут быть предложены проекты:

- повышения пожарной безопасности, которые исключают вероятное событие с оцененным ущербом;
- создания новых защитных барьеров, которые предотвратят неизбежное (в течение t лет) распространение радиоактивности и исключат последующие работы по дезактивации и реабилитации;
- создания системы мониторинга безопасности, которая позволит заблаговременно предсказать неблагоприятное развитие событий;
- уточнения оценок риска событий, которые могут привести к масштабным негативным последствиям;
- повышения безопасности отдельных технологических операций, сопровождающих эксплуатацию объекта;

- поиска новых более безопасных технологий утилизации и экологической реабилитации.

В качестве альтернативного может быть предложен проект по утилизации или ликвидации всего объекта в целом. Этот вариант являлся бы преимущественным, если бы не существовало иных важных ограничений, в том числе ресурсного. В этой связи проекты, предусматривающие непосредственную утилизацию (ликвидацию) объектов, то есть прямое достижение конечной цели, являются приоритетными при условии, что они вписываются в возможности существующей инфраструктуры.

4 Матрица рисков (общее описание)

В качестве основного инструмента выбора приоритетных проектов комплексной утилизации по фактору безопасности предлагается использовать матрицу рисков (вероятность события — масштаб последствий). Имея подобную матрицу, набор потенциально опасных событий (сценариев, которые могут реализовываться с определенными вероятностями) и оцененные их последствия для конкретных объектов можно отобрать объекты, подлежащие первоочередной утилизации, и необходимые технологии, реализация которых позволит существенно повысить (обеспечить) безопасность. В общем виде матрица рисков показана на рисунке 3.

Общие подходы к построению матрицы рисков применимы к любым видам опасной деятельности. В частности, применительно к ядерно-опасным объектам такой подход давно является общепризнанным не только со стороны научного сообщества, но и со стороны государственных надзорных органов, ответственных за обеспечение ядерной и радиационной безопасности.

Тем не менее, сами объекты утилизации, а также технологии, события, и характер их последствий имеют специфику, которую необходимо учесть при построении матрицы рисков для мероприятий по утилизации АПЛ.

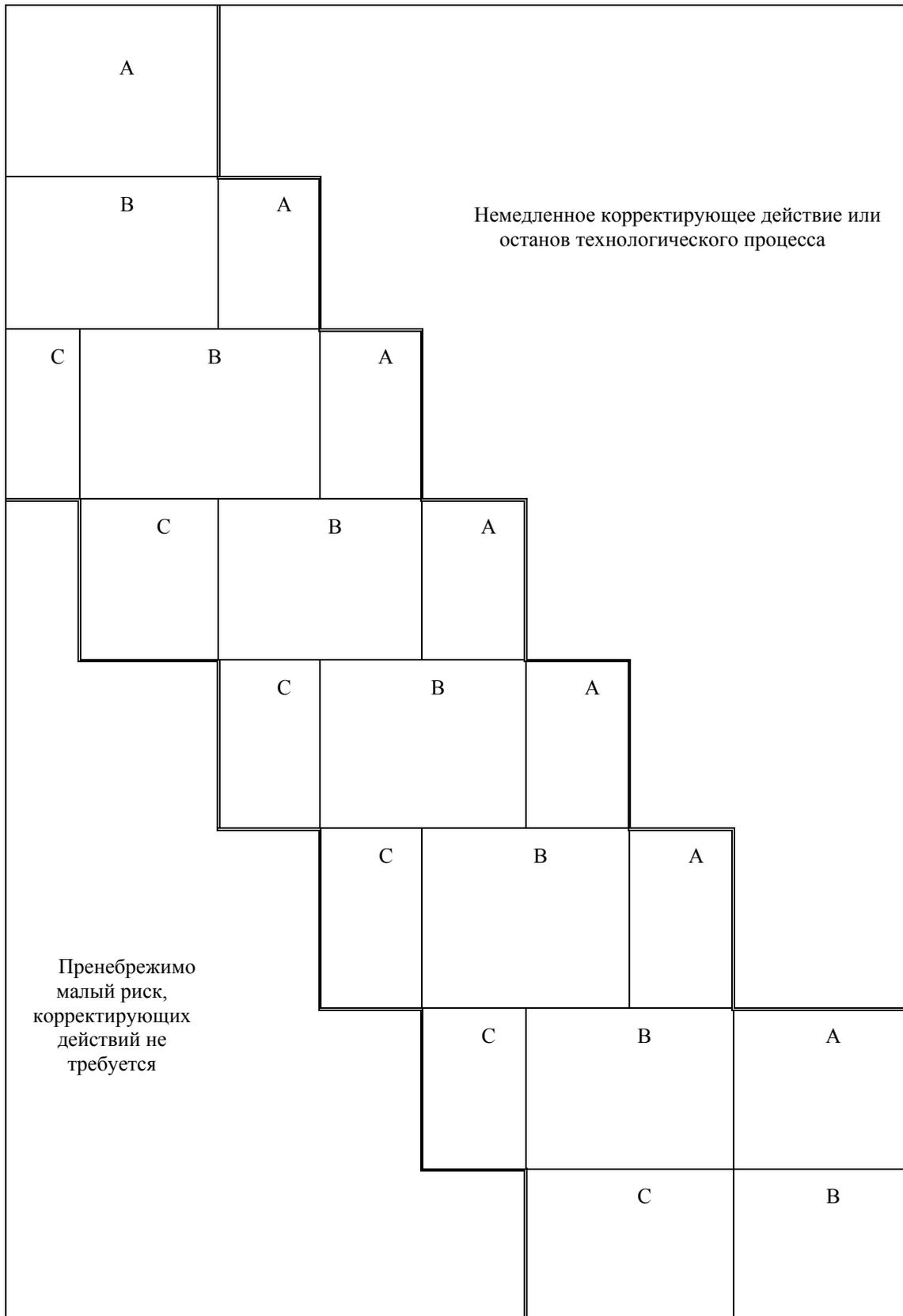
Матрица рисков строится в координатах «вероятность сценария — тяжесть последствий» с использованием опыта экспертов в рассматриваемой области. Вначале устанавливаются диапазоны вероятностей аварийных сценариев и уровней тяжести последствий. В пределах этих диапазонов выделяется область, ограниченная двойной линией, которая обозначает некий «коридор рисков». Эта область расположена вокруг условной линии одинаковых (приемлемых) рисков при любом сочетании событий и их вероятностей. Более строгое обоснование этого положения возможно в дальнейшей работе. Область ниже ограничительной линии представляет собой область пренебрежимо малого риска, где дополнительные меры излишни. Область выше ограничительной линии — область недопустимо высоких рисков, где требуется проведение немедленных мер по обеспечению безопасности или остановка работы объекта, запрещение использования технологического процесса.

При этом указанную двойную ограничительную линию не следует воспринимать как четкий раздел областей. Это — некоторая «размытая» граница. Степень ее «размытости» определяется согласованностью мнений экспертов, наличием достаточного объема информации для принятия решений. По мере дальнейшего преимущественного использования в процессе построения матрицы математических моделей аварийных ситуаций степень «размытости» этих границ будет уменьшаться и очертания коридора рисков будут уточняться.

Коридор рисков, где необходимы корректирующие действия, разделяется на различные зоны (А, В, С), определяющие критичность сценариев и оперативность выполнения соответствующих действий. Каждой зоне соответствует определенный поддиапазон вероятностей сценариев и уровень тяжести последствий. Разграничительные линии между зонами А, В и С также имеют «размытый» характер.

5 Подходы к классификации тяжести последствий

В зависимости от целей и сферы применения шкалы классификации тяжести последствий (или важности для обеспечения безопасной эксплуатации в последующий период) событий, возникающих на объектах использования атомной энергии, применяются различные классификаторы. Одним из простых и наглядных критериев, которые характеризуют тяжесть последствий события, является размер зоны распространения радиоактивности. По этому критерию аварии делятся на:



- локальные (выход радиоактивных веществ (РВ) за предусмотренные границы оборудования);
- местные (выход РВ в пределах санитарно-защитной зоны в количествах, превышающих установленные нормативы);
- общие (выход РВ за пределы санитарно-защитной зоны в количествах, превышающих установленные нормативы).

Анализ различных классификаторов показал, что зачастую они специфичны для каждого типа ЯРОО. Нормативные документы Госатомнадзора России предусматривают категоризацию в зависимости от признаков и последствий нарушения в работе различных типов ядерно- и радиационно опасных объектов (АЭС, исследовательские реакторы, объекты ядерного топливного цикла (ОЯТЦ) и др.). Все нарушения подразделяются на аварии и происшествия, причем для каждого типа ЯРОО существует своя категоризация. В частности, для АЭС установлено 4 категории аварий и 11 категорий происшествий. Классификация для ОЯТЦ включает 6 категорий аварий и 5 категорий происшествий. Авария максимального уровня (А01) для АЭС классифицируется как «Выброс в окружающую среду радиоактивных веществ при тяжелой запроектной аварии, в результате которого возможны острые лучевые поражения лиц из персонала АС (работников) и лиц из населения, нанесение ущерба их здоровью, загрязнение радиоактивными веществами большой территории. Возможен трансграничный перенос радиоактивных веществ. Длительное радиационное воздействие на окружающую среду». Для ОЯТЦ авария максимального уровня (А1) классифицируется как «Радиоактивный выброс (сброс) в окружающую среду, в результате которого за границей зоны наблюдения ОЯТЦ произошло превышение уровня Б критериев для принятия неотложных решений в начальный период аварии». НРБ-99 предусматривают на начальном периоде радиационной аварии три меры защиты населения (укрытие, йодная профилактика, эвакуация) и устанавливают для каждой меры уровни вмешательства А и Б. Решение о проведении меры защиты принимается на основании сравнения прогнозируемой дозы, предотвращаемой мероприятием с уровнями А и Б. В случае превышения уровня Б выполнение соответствующей меры защиты необходимо, даже если это связано с нарушением нормальной жизнедеятельности населения и функционирования территорий. Если рассматривать в качестве меры защиты укрытие, то по НРБ-99 речь идет о предотвращенных дозах облучения населения 50 мГр и более. Эта величина примерно на порядок меньше дозы облучения, при которой возможны острые лучевые поражения. Представляется, что подобный подход, будучи весьма эффективным при классификации аварий и происшествий на стационарных объектах атомной отрасли, не может быть приемлем для оценки событий в процессе комплексной утилизации АПЛ, включающей значительное число транспортных операций с ОЯТ и РАО.

В общем виде, если рассматривать элементы схемы обращения с АПЛ, выводимыми из состава ВМФ, как техногенные объекты (ТО) (специализированные производственные объекты — СПО и сами АПЛ, т.е. ТО=СПО+АПЛ) и технологические процессы (ТП), представляющие собой опасности для населения и окружающей среды, то предлагается использование следующего подхода.

Основные термины и определения:

Опасность (угроза) — свойство техногенного элемента (ТЭ) наносить прямой и косвенный вред окружающей среде, персоналу, населению, социальной сфере, экономике и т.д.

Ущерб — мера этого вреда, выраженная в совокупных эквивалентных материальных потерях (рублях, \$).

Техногенные объекты и технологические процессы (ТЭ=ТО+ТП) формируют следующие виды прямых ущербов:

- Ущерб, наносимый здоровью персонала;
- Ущерб оборудованию объектов, сооружениям, территориям (акваториям), на которых расположены сами объекты и/или осуществляются технологические процессы;
- Ущерб здоровью населения, проживающего вблизи ТЭ;
- Ущерб собственности третьих лиц (юридических и физических);
- Ущерб окружающей среде.

Косвенные ущербы, в случае возникновения аварий в ТЭ, складываются из ущербов связанных с:

- временным (или постоянным) простоем оборудования в период ликвидации последствий аварий, как на самом предприятии, участвующем в работах по комплексной утилизации АПЛ, так и на предприятиях, принадлежащих третьим лицам;
- необходимостью проведения работ по преодолению последствий аварии;

- негативной реакцией общества на факт возникновения аварии, следствием чего могут явиться меры по ограничению (в том числе и полному прекращению) дальнейшего производственного процесса, включая приостановку финансирования работ, сокращение объемов работ, существенное усложнение условий проведения работ в связи с необоснованным ужесточением требований к безопасности.

6 Постановка задачи исследования

Целями разработки настоящего методологического подхода являются установление перечня объектов, подлежащих первоочередной утилизации по фактору безопасности, и определение набора технологических операций, так изменяющих параметры направлений работ (способов) по утилизации объектов, чтобы риск (интегральная оценка риска) был минимальным при стоимости всех технологических операций и времени их реализации не более заданных. Далее, лицо, принимающее решения (ЛПР), используя полученные значения рисков, осуществляет ранжирование первоочередных мероприятий с учетом собственных предпочтений.

Учитывая, что все ТЭ обладают отличной от нуля вероятностью нанесения ущерба в режиме штатной утилизации объекта и в случае возникновения аварийных ситуаций, используем понятие **риск** для n -го ТЭ, который определим следующим образом:

$$\mathbf{R} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{P}, \quad (1)$$

где $\mathbf{P} = \{p_i\}$ — вектор вероятностей возникновения i -ой аварии, $\mathbf{U} = \{u_{ji}\}$ — матрица ущербов (прямых), i — индекс аварии, j — индекс объекта, которому наносится ущерб.

В том случае, если все виды ущербов выражены в одних единицах, например, в единицах стоимости, то в этом случае **риск**, в первом приближении (в предположении об аддитивности всех видов ущербов), можно определить в виде скалярной величины:

$$|\mathbf{R}| = \sum_j r_j. \quad (2)$$

Практически также можно определить **риск** и в случае, если возможно «обезразмерить» компоненты вектора риска, например, поделив их на нормативные значения. Тогда:

$$|\mathbf{R}| = \sum_j e_j(r_j) r_j, \quad (3)$$

где: $e_j(r_j)$ — «весовые» параметры, вводимые в том случае, если необходимо учесть различие в уровне опасности для различных компонент вектора риска и являющиеся, в общем случае, функцией от r_j .

Теперь для всей совокупности ТЭ, составляющих производственную схему по обращению с АПЛ, выводимых из состава ВМФ, интегральный **риск** равен:

$$\mathbf{R}_y = \sum_n \mathbf{R}_n, \quad (n — индекс ТЭ), \quad (4)$$

причем для \mathbf{R}_y возможно применение процедур, определяемых выражениями (2) и (3).

Дальнейшая процедура оптимизации сводится к нахождению «минимума» \mathbf{R}_y как функции, представляющей собой по существу произведение вероятности возникновения негативного события на исход этого события (ущерб). Отметим, что вредное воздействие в режиме нормальной эксплуатации также описывается в рамках данного формализма: в этом случае достаточно положить соответствующую компоненту вектора вероятностей равной 1. Отметим также следующее: в силу того, что значение $\min\{\mathbf{R}_y\}=0$, задача нахождения «минимума» \mathbf{R}_y сводится к нахождению некоторой области значений функции \mathbf{R}_y как функции многих переменных, лежащей ниже некоторого нормативного значения $\mathbf{R}_y^{норм}$. Переменными (не обязательно независимыми) функции \mathbf{R}_y являются время, параметры ТЭ, влияющие на его безопасность, внешние управляющие воздействия, в том числе материальные и финансовые ресурсы, выделяемые на производство работ.

Итак, содержательно, оптимизационная задача сводится к нахождению $\min\{R_{\Sigma}\} \in \{0, R_{y}^{норм}\}$ при наличии условий ограничений на время проведения работ — $t \in \{0, T\}$ и выделяемые финансовые ресурсы — $s = s(t) \leq S^{пред}$.

«Каноническое» решение данной оптимизационной задачи вряд ли возможно и целесообразно в силу многих причин, из числа которых выделим методологическую сложность проведения достаточно точных и полных оценок значений ключевых параметров: вероятностных характеристик возникновения аварийных ситуаций с определенными последствиями, оценок ущербов вследствие аварий (в том числе как прямых, так и косвенных), функциональных зависимостей параметров безопасности от вложенных средств [11].

В этих условиях целесообразно шире использовать интегрирующие методы анализа, применять элементы экспертного оценивания, позволяющие дать оценки в сложных условиях многих неопределенностей.

7 Шкала последствий возможных событий (аварий) в процессах утилизации

Одной из наиболее общих классификаций, которые используются для оперативной оценки значимости события и информирования с точки зрения безопасности, является международная шкала ядерных событий (ИНЕС) [12]. Основная её цель — в самом общем виде ранжировать последствия инцидентов и аварий с позиций безопасности персонала, населения и охраны среды. Шкала (см. табл.1) применима к любому событию, связанному с обращением ядерных материалов и радиоактивных веществ, включая события во время их транспортировки. Ее структура представляется в форме матрицы с ключевыми словами, которые здесь не претендуют на точность или строгую определенность. Рассматриваются три различные сферы воздействия событий, представленные каждым из трех столбцов матрицы: воздействие за пределами площадки, воздействие на площадке и ухудшение эшелонированной защиты.

Первый столбец матрицы относится к событиям, сопровождающимся выбросом радиоактивности за пределы площадки (например, БТБ или иного объекта). Очевидно, поскольку это единственно возможное непосредственное воздействие на население, именно такие выбросы больше всего беспокоят общественность. Поэтому нижняя ступень в данном столбце представляет выброс, который приводит к максимальной расчетной дозе облучения критической группы, численно эквивалентной приблизительно десятой доле предельной годовой дозы для населения; эта позиция классифицируется уровнем 3. Такая доза обычно составляет около одной десятой среднегодовой дозы от естественного радиационного фона. Высшая ступень в первом столбце соответствует крупной ядерной аварии с обширными последствиями для здоровья населения и для окружающей среды — уровень 7 (пример — авария на Чернобыльской АЭС в 1986 г.).

Во втором столбце рассматривается воздействие события в пределах площадки (например, береговые комплексы выгрузки ОЯТ, суда АТО и др.). Эта категория событий охватывает диапазон от уровня 2 (значительное распространение загрязнения и/или переоблучение персонала) до уровня 5 (тяжелое повреждение объекта комплексной утилизации АПЛ и/или радиологических барьеров — барьеров радиационной защиты).

Объекты комплексной утилизации АПЛ в той или иной степени обладают последовательными уровнями защиты, которые должны предотвращать опасные воздействия на площадке или за ее пределами, причем объем предусмотренных мер безопасности, как правило, соразмерен потенциальному риску таких воздействий. Предполагается, что существенные последствия на площадке и за ее пределами могут наступить только после нарушения всех этих защитных барьеров. Такое построение мер безопасности соответствует понятию «эшелонированная защита». Третий столбец матрицы относится к инцидентам, при которых произошло нарушение или ухудшение эшелонированной защиты. Этот столбец охватывает инциденты уровней 1–3.

Событие, воздействие которого затрагивает два или три столбца, должно оцениваться по высшему из достигнутых уровней. События, не достигающие нижнего порога воздействия ни в одном из столбцов, классифицируются ниже шкалы с уровнем 0.

Таблица 1. Шкала последствий возможных событий (аварий) в процессах утилизации АПЛ

УРОВНИ	ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ПЛОЩАДКИ	ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ПЛОЩАДКЕ	УХУЖДЕНИЕ ЭШЕЛОНИРОВАННОЙ ЗАЩИТЫ
7 КРУПНАЯ АВАРИЯ	Крупный выброс: крупномасштабные воздействия на здоровье и окружающую среду		
6 СЕРЬЕЗНАЯ АВАРИЯ	Значительный выброс. Трансграничный перенос: требуется осуществление полного комплекса защитных мер		
5 АВАРИЯ С РИСКОМ ЗА ПРЕДЕЛАМИ ПЛОЩАДКИ	Ограниченный выброс: вероятно, требуется частичное осуществление защитных мер	Тяжелое повреждение объекта комплексной утилизации АПЛ и/или радиологических барьеров	
4 АВАРИЯ БЕЗ ЗНАЧИТЕЛЬНОГО РИСКА ЗА ПРЕДЕЛАМИ ПЛОЩАДКИ	Незначительный выброс: облучение населения на уровне величин, сравнимых с установленными пределами	Значительное повреждение объекта и/или защитных барьеров (существенное усложнение дальнейших работ), гибель персонала	
3 СЕРЬЕЗНЫЙ ИНЦИДЕНТ	Очень малый выброс: облучение населения на уровне долей установленных пределов	Обширное распространение загрязнения и/или острые лучевые поражения персонала	
2 ИНЦИДЕНТ		Значительное распространение загрязнения и/или переоблучение персонала	События со значительными нарушениями мер обеспечения безопасности
1 АНОМАЛИЯ			Несоответствие режима эксплуатации установленным требованиям обеспечения безопасности

Собственно процедуры классификации включают анализ совокупности количественных и качественных критериев, таких как состояние защитных барьеров, систем безопасности, величина выброса в окружающую среду, уровни доз облучения персонала и населения. Подобный обобщенный подход можно применить не только для событий, реально имеющих место, но и для классификации сценариев возможных событий, рассматриваемых при оценке риска. Учитывая наиболее универсальный характер ИНЕС, было решено адаптировать эту шкалу и процедуры классификации к процессу утилизации АПЛ и использовать их в качестве основы для ранжирования сценариев по тяжести последствий. В характеристики тяжести событий и состояния защитных барьеров внесены некоторые изменения (см. табл. 1), поскольку отдельные события, сопровождающие процессы утилизации АПЛ в настоящее время, не в полной мере соответствуют традиционным подходам к обеспечению безопасности при использовании атомной энергии в мирных целях. В этой же связи исключен уровень 0 шкалы.

Представляется возможным использовать рассматриваемую шкалу последствий для определения прогнозируемых уровней ущерба, выраженных в экономических категориях. Корректно эту процедуру

можно выполнить на основе детального анализа ущербов, нанесенных при авариях и инцидентах с радиационными объектами (Чернобыльская АЭС, предприятие в Кыштыме, АЭС «Три-Майл Айленд» США, АЭС «Вандельос» Испания, АПЛ в б. Чажма, затопление К-159 и др.). На настоящее время предварительно такие оценки (на уровне порядков величин) были проведены экспертами. Они представлены в таблице 2, устанавливающей соответствие уровней тяжести последствий и прогнозируемых ущербов.

Здесь необходимо остановиться на некоторых инцидентах, как будто бы не вписывающихся напрямую в представляемую схему. Эти исключения касаются тех случаев, когда реальные радиоэкологические последствия практически отсутствуют и, в то же время, инцидент, несмотря на это, характеризуется высоким уровнем интегрального ущерба, так как компенсация возникающих при этом последствий требует значительных материальных затрат.

Типичным исключением такого рода является затопление АПЛ при ее транспортировке к месту утилизации. Сильный общественный резонанс стимулирует необходимость принятия срочных мер по подъему затонувшей АПЛ, что сопряжено с очень большими расходами средств, неадекватными реально возникающей экологической угрозе.

Однако и такие случаи вписываются в матрицу рисков после того, как качественная шкала последствий трансформирована в количественную шкалу ущербов. Вход в матрицу осуществляется при этом обычным путем, так как для таких инцидентов, как и для радиационных, могут быть оценены вероятности их возникновения и сопутствующие им ущербы.

Таблица 2. Шкала соответствия тяжести последствий возможных аварий прогнозируемому ущербу в процессах утилизации АПЛ

Тяжесть последствий, уровни	Крупная авария	Серьезная авария	Авария с риском за пределами площадки	Авария без значительного риска за пределами площадки	Серьезный инцидент	Инцидент	Аномалия
	7	6	5	4	3	2	1
Прогнозируемый ущерб, долл. США	$>10^9$	$>10^8$	$>10^7$	$>10^6$	$>10^5$	$>10^4$	$>10^3$

8 Матрица рисков для объектов утилизации АПЛ

Ниже представлен проект матрицы рисков для объектов утилизации (см. рис. 4), который предполагается использовать при определении приоритетов комплексной утилизации АПЛ. Он предусматривает более мягкое, в сравнении с обычным для объектов использования атомной энергии, отношение к объектам и технологиям, где возможны нарушения уровней 1 и 2. Это обусловлено наличием в настоящее время большого количества подлежащих утилизации и реабилитации объектов, состояние которых не может быть охарактеризовано как безопасное или соответствующее современным требованиям безопасности.

Под мероприятиями, направленными на снижение риска и уменьшение последствий неблагоприятных событий, понимаются различные действия, которые включают в себя как технические мероприятия (модернизация оборудования, совершенствование технологического процесса, создание защитных барьеров, систем мониторинга и т.д.), так и организационные — такие как разработка планов и программ, в том числе аварийного реагирования, подготовка регламентирующих документов, инструкций, повышение квалификации персонала, информирование и др.

На построенной матрице рисков выделены отдельные зоны (категории), где:

А	Немедленное корректирующее действие или останов технологического процесса				
В	А				
С	В	А			
	С	В	А		
		С	В	А	
			С	В	
Пренебрежимо малый риск, корректирующих действий не требуется				С	В

А — требуются приоритетные меры безопасности для снижения риска (корректирующие действия в течение, например, 1–3 лет) — категорируются как корректирующие меры **очень высокого приоритета**;

В — требуются меры безопасности (корректирующие действия в течение, например, 3–5 лет) — соответствуют корректирующим мерам **высокого приоритета**;

С — целесообразно принятие мер безопасности в течение, например, 5–10 лет — соответствуют корректирующим мерам **среднего приоритета**.

Сроки корректирующих действий, указанные для зон А, В и С, являются ориентировочными и их можно рассматривать отдельно, имея в виду цели и задачи работ по определению приоритетных мероприятий.

Ранжирование области, ограниченной двойной линией, на категории А, В, С проводилось на основе экспертных оценок. Одна из особенностей для объектов комплексной утилизации АПЛ: событиям и состояниям объектов с относительно малыми уровнями тяжести последствий (1 и 2) и значениями вероятностей 10^{-2} – 10^0 присвоена категория В на основании того, что такие состояния и отклонения несущественны с точки зрения безопасности, но по частоте своего возникновения они считаются практически неизбежными и требуют планомерной работы по ее снижению.

Входами в матрицу риска являются вероятности сценариев S_i^j (j — индекс объекта, i — индекс сценария) — **Р** и уровни тяжести соответствующих последствий. В качестве примеров рассмотрим следующие наиболее характерные варианты использования матрицы (см. рис. 4):

1. Вероятность возникновения сценария S^1_3 составляет $P=10^{-7}$, и степень его тяжести оценивается 7-м уровнем. В этом случае событие (*) попадает в зону А, внутри которой необходимо принятие приоритетных (в течение 1–3 лет) мер безопасности для снижения риска.
2. Вероятность возникновения сценария S^3_7 $P=10^{-6}$, и степень тяжести оценивается 1-м уровнем. Риск оказывается пренебрежимо малым и событие (*) находится в области, где корректирующие действия не требуются.
3. Вероятность возникновения сценария S^5_6 $P=10^{-5}$, и степень тяжести оценивается 3-м уровнем. Событие (*) оказывается в зоне С, где целесообразно принятие мер безопасности в течение 5-10 лет.
4. Вероятность возникновения сценария S^7_9 $P=10^{-4}$, и степень тяжести оценивается 4-м уровнем. В этом случае событие (*) оказывается в зоне В, где требуется принятие мер безопасности в течение 3–5 лет.
5. Вероятность возникновения сценария S^8_1 $P=10^0$, и степень тяжести оценивается 5-м уровнем. Здесь требуется немедленное принятие мер безопасности.

Для оценки уровней тяжести аварийных сценариев используется математическое моделирование, либо методы экспертных оценок, либо заимствование данных — аналогов из отечественных и зарубежных работ.

9 Блок-схема решения поставленной задачи

Предложенная блок-схема основывается на предположении о том, что целенаправленная деятельность, в том числе превентивные корректирующие действия, связанные с материальными и временными затратами, позволят снизить риск наступления аварийных ситуаций.

Практическая реализация предложенного методологического подхода к выбору приоритетных объектов комплексной утилизации АПЛ заключается в осуществлении следующей методической последовательности действий:

1. Составление перечня объектов комплексной утилизации АПЛ (см. рис. 5).
2. Детализация направлений работ в части состава объектов утилизации и технологических операций.
3. Составление перечней аварийных ситуаций для каждого типа объектов и технологических операций, в том числе рассмотрение ситуаций, связанных с длительным непринятием действий по уменьшению рисков на объектах утилизации (предлагаемая форма такого перечня представлена в таблице 3).
4. Анализ и математическое моделирование аварийных ситуаций, либо использование методов экспертных оценок, или заимствование данных — аналогов из отечественных и зарубежных публикаций с определением вероятностей (диапазонов вероятностей) аварийных событий — **Р**.
5. Определение уровней тяжести возможных последствий аварийных ситуаций с использованием адаптированной к проблеме утилизации АПЛ международной шкалы ядерных событий (ИНЕС) и прогнозирование соответствующих ущербов — **U**.
6. Категорирование аварийных ситуаций с использованием разработанной матрицы рисков (матрица «вероятность события — тяжесть последствий»). Входами в матрицу являются значения вероятностей **Р** и уровни тяжести последствий. В зависимости от попадания события в зоны А (очень высокого приоритета), В (высокого приоритета) или С (среднего приоритета) делаются предварительные выводы относительно уровня приоритетности того или иного объекта утилизации. Попадание в зону, где необходимы немедленные корректирующие действия, означает чрезвычайную ситуацию, требующую экстренных мер (в дальнейшем события этого типа не рассматриваются). Попадание в зону пренебрежимо малого риска означает, что подобные события не требуют каких-либо корректирующих действий по их предотвращению. Объекты и технологические операции, аварийные ситуации на которых находятся исключительно в данной зоне, в дальнейшем нами не рассматриваются. Это означает, что утилизация объектов, не имеющих значимых рисков, не относится к приоритетным работам, а технологические операции могут реализовываться без дополнительных мер по повышению их безопасности. Таким образом, для всех объектов (или однотипных групп объектов) и технологических операций (или их типовых групп) будет получен перечень событий, предотвращение которых категорировано по приоритетности. Распределение событий, относящихся к зонам А, В и С для каждого объекта (технологической операции) будет неравномерным (форма представления результатов оценки приоритетности приведена в таблице 4).

**Объекты комплексной утилизации АПЛ в Северо-Западном регионе,
требующие анализа безопасности в процессе исследования приоритетов**

		АПЛ	АНК	Суда АТО	РБ	Обращение с ОЯТ	БТБ гб. Андреева	БТБ пос. Гремиха	СРЗ
1	АПЛ I поколения								
2	АПЛ II и III поколения								
3	АПЛ с ЖМТ								
4	ТАКР «Адмирал Ушаков»								
5	Плавающие технические базы								
6	Технические наливные танкеры								
7	Плавающие емкости ЖРО								
8	Реакторный блок в ПВХ								
9	Реакторные блоки с невыгруженными ОВЧ АПЛ с ЖМТ								
10	Береговые комплексы выгрузки								
11	Накопительные площадки ТУК с ОЯТ								
12	Транспортировка ОЯТ (эшелон)								
13	Сооружение № 5								
14	Блок сухого хранения ОТВС								
15	Хранилище ТРО								
16	Хранилище РАО								
17	Сооружение № 1 (хранилище ОТВС)								
18	Сооружение № 1Б (хранилище ОВЧ АПЛ с ЖМТ)								
19	Площадка ТРО								
20	РАО на МП «Звездочка»								
21	РАО на ПО «Севмашпредприятие»								
22	РАО на СРЗ «Нерпа»								
23	РАО на 10 СРЗ ВМФ								
24	РАО на 35 СРЗ ВМФ								

Рис. 5. Объекты комплексной утилизации АПЛ, требующие анализа безопасности (на примере Северо-Западного региона)

7. Формирование перечней объектов (технологических операций), имеющих в своем составе категории событий: «очень высокого приоритета и ниже», «высокого приоритета и ниже» и «среднего приоритета». В связи с возможными неопределенностями, сопровождающими процесс категорирования, первоочередной задачей является проведение углубленной оценки событий с высокими приоритетами. По результатам углубленных оценок перечни могут быть скорректированы.

Реализация процедуры выбора объектов внутри перечней «очень высокого» и «высокого» приоритета может осуществляться различным образом:

Объекты (технологические операции), имеющие наибольшее число событий, относящихся к зонам А, подлежат первоочередной утилизации (модернизации или исключению).

В отношении объектов (технологических операций), имеющих незначительное число событий, относящихся к зонам А, могут быть реализованы корректирующие действия, которые позволят вывести их из перечня высшего приоритета.

Таким образом, на данном этапе появляется возможность выбора объектов и технологических операций, подлежащих первоочередной утилизации (модернизации), а также составления перечня других объектов, предназначенных к утилизации (модернизации) во вторую, третью и т.д. очереди.

Вполне возможно возникновение ситуации, при которой перечень мероприятий, отнесенных к одной категории, будет настолько обширен, что потребуются дополнительное установление приоритетности объектов. В этом случае потребуются более детальное исследование материальных и временных затрат, обеспечивающих снижение рисков. Предлагается следующий алгоритм действий:

1. Определение прогнозируемых материальных и временных затрат, основанных на расчете затрат по снижению уровня риска — Z_{ij} (i — индекс аварийной ситуации, j — индекс объекта) и затрат времени — τ_{ij} .
2. В рамках каждого объекта рассчитываются значения суммарных материальных затрат $Z_j = \sum_i Z_{ij}$ и затрат времени $\tau_j = \max_i \tau_{ij}$.
3. Далее, для каждого объекта определяются интегральные значения рисков:

$$R_j = \sum_i P_{ij} U_{ij}.$$

4. Определение приоритетных мероприятий (ранжирование) осуществляется исходя из условий: $R_j \rightarrow \min$ при соблюдении ограничений $Z_j \leq Z^{\text{зад}}$ и $\tau_j \leq \tau^{\text{зад}}$.
5. Для окончательного определения приоритетов кроме фактора безопасности (R_j), имеющего решающее значение, в рассмотрение вовлекаются и другие факторы: требования нормативно-правовой документации, возможности инфраструктуры, ведомственные и региональные интересы, интересы мирового сообщества и стран-инвесторов — в основном в виде системы ограничений.
6. Возможно управление значениями R , Z и τ изменением состава технологических операций.
7. Наличие перечней приоритетных мероприятий по объектам и технологическим операциям позволит определить оптимальное соотношение ресурсов, необходимых для реализации основных направлений работ по комплексной утилизации.

В качестве основных инструментов решения поставленной задачи будут использоваться математическое моделирование, методы экспертного оценивания, а также предложенные шкала последствий возможных аварий в процессах утилизации и матрица рисков для объектов и технологических операций утилизации АПЛ. Окончательное решение будет принимать ЛПР, базируясь на результатах исследований, выполненных по предлагаемой методологии, а также основываясь на системе собственных предпочтений.

Таблица 3. Перечень аварийных ситуаций для различных объектов утилизации и технологических операций (Северо-Западный регион)

№№ объектов	Наименование аварийной ситуации	Вероятность в год	Тяжесть последствий, уровни	Прогнозируемый ущерб, долл. США
1	Разлив ЖРО			
	Выброс газа из системы ГВД			
	Затопление АПЛ в пункте базирования или при транспортировке			
	СЦР при выгрузке ОЯТ			
	Пожар в реакторном отсеке			
2	Разлив ЖРО			
	Выброс газа из системы ГВД			
	Затопление АПЛ в пункте базирования или при транспортировке			
	Пожар в реакторном отсеке			
3	Затопление АПЛ в пункте базирования или при транспортировке			
	СЦР при выгрузке ОЯТ			
	Пожар в реакторном отсеке			
4	Разлив ЖРО			
	Выброс газа из системы ГВД			
	Затопление АПЛ в пункте базирования			
	Пожар в реакторном отсеке			
5	Пожар на ПТБ			
	Затопление ПТБ с ОЯТ			
	Падение летательного аппарата на ПТБ			
	Разлив ЖРО			
6, 7	Затопление ТНТ, ПЕ			
	Разлив ЖРО			
8	Затопление РБ в пункте базирования или при транспортировке			
9	Затопление РБ в пункте базирования или при транспортировке			
	СЦР при выгрузке ОЯТ			
	Пожар в реакторном отсеке			
10	Повреждение ОТВС при выгрузке			
	Падение транспортного контейнера			
	Падение летательного аппарата при выгрузке ОЯТ			
11	Падение транспортного контейнера			
	Падение летательного аппарата			
12	Опрокидывание вагона-контейнера			
13	Падение летательного аппарата (ракеты)			
	Взрыв (теракт)			
	Пожар на объекте			

№№ объектов	Наименование аварийной ситуации	Вероятность в год	Тяжесть последствий, уровни	Прогнозируемый ущерб, долл. США
14	Падение летательного аппарата (ракеты)			
	Взрыв (теракт)			
	Разрушение ОЯТ при перегрузке			
15	Падение летательного аппарата (ракеты)			
16	Разлив ЖРО			
17	Падение летательного аппарата (ракеты)			
	Взрыв (теракт)			
	Пожар на объекте			
18	Падение летательного аппарата (ракеты)			
	Взрыв (теракт)			
	СЦР			
	Пожар на объекте			
19	Падение летательного аппарата (ракеты)			
	Разрушение ОТВС при перегрузке			
20–24	Падение летательного аппарата (ракеты)			
	Взрыв (теракт)			

Таблица 4. Форма представления результатов оценки приоритетности объектов комплексной утилизации АПЛ (для Северо-Западного региона)

№№ объектов	Наименование аварийной ситуации	Принадлежность ситуации к зонам					Итоговая оценка приоритетности объектов, ранг объекта
		А	В	С	немедленных корректирующих действий	пренебрежимо малого риска	
1	Разлив ЖРО						
	Выброс газа из системы ГВД						
	Затопление АПЛ в пункте базирования или при транспортировке						
	СЦР при выгрузке ОЯТ						
	Пожар в реакторном отсеке						
2	Разлив ЖРО						
	Выброс газа из системы ГВД						
	Затопление АПЛ в пункте базирования или при транспортировке						
	Пожар в реакторном отсеке						

№№ объектов	Наименование аварийной ситуации	Принадлежность ситуации к зонам					Итоговая оценка приоритетности объектов, ранг объекта
		А	В	С	немедленных корректирующих действий	пренебрежимо малого риска	
3	Затопление АПЛ в пункте базирования или при транспортировке						
	СЦР при выгрузке ОЯТ						
	Пожар в реакторном отсеке						
4	Разлив ЖРО						
	Выброс газа из системы ГВД						
	Затопление АПЛ в пункте базирования						
	Пожар в реакторном отсеке						
5	Пожар на ПТБ						
	Затопление ПТБ с ОЯТ						
	Падение летательного аппарата на ПТБ						
	Разлив ЖРО						
6, 7	Затопление ТНТ, ПЕ						
	Разлив ЖРО						
8	Затопление РБ в пункте базирования или при транспортировке						
9	Затопление РБ в пункте базирования или при транспортировке						
	СЦР при выгрузке ОЯТ						
	Пожар в реакторном отсеке						
10	Повреждение ОТВС при выгрузке						
	Падение транспортного контейнера						
	Падение летательного аппарата при выгрузке ОЯТ						
11	Падение транспортного контейнера						
	Падение летательного аппарата						
12	Опрокидывание вагона-контейнера						

№№ объектов	Наименование аварийной ситуации	Принадлежность ситуации к зонам					Итоговая оценка приоритетности объектов, ранг объекта
		А	В	С	немедленных корректирующих действий	пренебрежимо малого риска	
13	Падение летательного аппарата (ракеты)						
	Взрыв (теракт)						
	Пожар на объекте						
14	Падение летательного аппарата (ракеты)						
	Взрыв (теракт)						
	Разрушение ОЯТ при перегрузке						
15	Падение летательного аппарата (ракеты)						
16	Разлив ЖРО						
17	Падение летательного аппарата (ракеты)						
	Взрыв (теракт)						
	Пожар на объекте						
18	Падение летательного аппарата (ракеты)						
	Взрыв (теракт)						
	СЦР						
	Пожар на объекте						
19	Падение летательного аппарата (ракеты)						
	Разрушение ОТВС при перегрузке						
20–24	Падение летательного аппарата (ракеты)						
	Взрыв (теракт)						

10 Итоговая характеристика перспективности предложенного методологического подхода

Предложенный методологический подход:

- позволяет эффективно и оперативно решать поставленную задачу определения приоритетных объектов для их первоочередной реализации в процессе комплексной утилизации АПЛ;
- представляет собой реальную структурированную систему поддержки решений ЛПР в сложных условиях многомерности исходной информации и отсутствия каких-либо формализованных подходов;
- обеспечивает анализ большого числа вариантов ситуаций единым подходом, доступным большому кругу специалистов;
- обладает относительной простотой и наглядностью;
- позволяет прогнозировать различных ситуаций;
- имеет возможность дальнейшего развития и совершенствования, в частности, по увеличению точности и достоверности получаемых оценок за счет математического моделирования аварийных ситуаций;
- с усложнением математических моделей аварийных ситуаций или проведением других дополнительных мероприятий, в особенности на этапе принятия решений, концептуально не изменяется;

- дает возможность оптимизировать затраты на корректирующие действия по снижению рисков, а также оптимальным образом распределять выделяемые средства между направлениями работ по комплексной утилизации АПЛ;
- предоставляет ЛПР независимую возможность проведения анализа и экспертизы направлений комплексной утилизации АПЛ с учетом достаточно противоречивых интересов заказчиков, инвесторов и производителей работ.

Литература

1. Материалы доклада заместителя Министра РФ по атомной энергии С.В. Антипова на заседании Правительства РФ 4 декабря 2003 года.
2. Nuclear Submarine Decommissioning and Related Problems / Ed. L.G. LeSage and A.A. Sarkisov — Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers. 1996.
3. Analysis of Risks Associated with Nuclear Submarine Decommissioning, Dismantling and Disposal / Ed. A.A. Sarkisov and Alain Tournyol du Clos — Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers. 1999.
4. Remaining Issues in the Decommissioning of Nuclear Powered Vessels / Ed. A.A.Sarkisov and L.G. LeSage — Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publishers. 2003.
5. Саркисов А.А. Экологические аспекты утилизации атомных подводных лодок / Изв. Акад. наук. Энергетика. 1999. № 1.
6. Васильев А.П., Данилян В.А., Мазокин В.А., Сивинцев Ю.В. и др. Техногенная радиоактивность морей Арктики и Дальнего Востока России: Оценка радиэкологических последствий удаления радиоактивных отходов в моря // Белая книга-2000. М. 2000. 543 с.
7. Тихонов М.Н., Муратов О.Э., Рылов М.И. К вопросу о техногенном радиационном риске и страховании при комплексной утилизации АПЛ и судов с ЯЭУ // Безопасность жизнедеятельности. 2003. № 7. С. 31–40.
8. Ларин В. Экологические проблемы утилизации российских АПЛ // Энергия. 2002. № 2. С. 42–49.
9. Концепция комплексной утилизации атомных подводных лодок и надводных кораблей с ядерными энергетическими установками. М.: Минатом России. 2001. 18 с.
10. Экологические проблемы утилизации атомных подводных лодок и развитие ядерной энергетики в регионе: Матер. Междунар. науч.-техн. конф. «Экофлот–2000» 16–20 сентября 2002 г. Владивосток.
11. Никитин В.С. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург. 2003.
12. Международная шкала ядерных событий (ИНЕС). Руководство для пользователей. МАГАТЭ. 2001.