

И.И. Линге, С.С. Уткин
РАДИАЦИОННЫЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ БУДУЩЕГО

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва

Контактное лицо: Уткин Сергей Сергеевич: e_mel@ibrae.ac.ru

РЕФЕРАТ

Рассматривается эволюция роли радиационных критериев в структуре доводов, лежащих в основе становления, функционирования и развития атомной энергетики. Обосновывается необходимость переосмысления доминирующей роли радиационных критериев в пользу более широкого учета экологических и иных факторов, связанных с концепцией устойчивого развития.

На основе детального анализа релевантных аспектов взаимосвязанного развития атомной энергетики и требований по радиационной и экологической безопасности показано, что к настоящему моменту развернуты полноценные нормативно-правовые и технологические системы обеспечения радиационной безопасности работников и населения, которые позволяют решать все необходимые задачи в области ограничения техногенного облучения в условиях нормальной эксплуатации. При этом зафиксирован беспрецедентный разрыв между реальной ролью радиационного фактора среди рисков для здоровья человека и его восприятием подавляющей частью общества.

В ближайшем будущем (порядка ста лет) актуальные задачи в сфере обеспечения радиационной безопасности будут диктоваться, с одной стороны, необходимостью обеспечения внутренней согласованности национальной системы безопасности в области рисков для здоровья в целом, с другой – глобальными процессами в мировом хозяйстве, связанными с медленным ростом энергопотребления, быстрым сокращением доли органического топлива практически во всех секторах экономики развитых стран, включая транспорт, усилением общеэкологических тенденций в направлении рецикла материалов, а также декарбонизацией. Показано научно обоснованное позиционирование радиационных рисков для устойчивого развития атомной энергетики в соответствии с требованиями, вытекающими из этих трендов. В этой связи также дана рациональная трактовка принципа невозложения бремени на будущие поколения.

Ключевые слова: атомная энергетика, радиационная безопасность, экологическая безопасность, устойчивое развитие, энергоэффективность, декарбонизация, будущие поколения

Для цитирования: Линге И.И., Уткин С.С. Радиационные и экологические аспекты атомной энергетики будущего // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 5. С.113–121.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-5-113-121

Введение

С 1990-х гг. прошлого века энергетика, как и ряд иных отраслей, испытывает на себе давление международных климатических инициатив. Киотский протокол (1997 г.), ставший первым международным документом, зафиксировавшим обязательства стран по ограничению выбросов парниковых газов, предусматривал ряд механизмов для достижения целевых показателей сокращения выбросов, но при этом не рассматривал атомную энергетику (АЭ) в качестве «зеленых инвестиций». Причина этого – в восприятии АЭ как опасной технологии вследствие неизбежного радиационного воздействия. Эта ситуация воспроизводится вплоть до настоящего времени, несмотря на многочисленные исследования, показывающие незначительный вклад атомной генерации в снижение выбросов CO₂ в мировом энергобалансе. Одним из наиболее дискуссионных моментов является возможность признания АЭ таким же равноправным объектом экономической и ценностной поддержки и зеленых инвестиций, как и возобновляемые источники энергии (вода, солнце, ветер). Амбициозные цели достижения углеродной нейтральности, о которых заявляют многие страны и территориальные объединения (Евросоюз, например, ставит цель стать таким регионом к 2050 г.), диктуют, помимо очевидных движений в сторону сокращения выбросов углекислого газа, развитие углеродно-отрицательных проектов, в основе которых, в частности, лежит необходимость пересмотра дискриминационного отношения к атомной генерации и признания ее экологичности. Одним из последних исследований стал опубликованный в 2021 г. доклад Научного центра Европейской комиссии, в котором содержится техническая оценка соответствия АЭ критериям регулирования Евросоюза [1]. Анализ не выявил каких-либо научных данных, которые бы свидетельствовали о том, что атомная энергетика опаснее для здоровья или окружающей среды, чем другие энерготехнологии, уже включенные в европейский перечень тех, которые борются с климатическими измене-

ниями. Важные шаги в объективной демонстрации реального значения АЭ предпринимаются на уровне Всемирной ядерной ассоциации [2] и Росатома [3].

В отечественной научной литературе имеется лишь относительно небольшое количество публикаций, где перспективы безопасности различных производств и отраслей промышленности (или их отдельных элементов и переделов) системно анализируются с позиции риска и конструирования облика вероятного будущего [4, 5]. При этом применительно к атомной энергетике по-прежнему применяется традиционный подход, в основе которого лежит отождествление вопросов экологической безопасности с консервативной расчетной оценкой радиационного воздействия на человека и объекты живой природы, ориентированной на отдельные стадии топливного цикла (главным образом – производство электроэнергии, эпизодически – с дополнением захоронения РАО) и стандартизуемые ситуации облучения для различных категорий облучаемых лиц в различных временные интервалы [6, 7]. По многим причинам нам такой подход представляется неверным [5].

Временной диапазон рассмотрения вопросов радиационной (РБ) и экологической безопасности АЭ, ранее ориентированный на решение краткосрочных задач, в последнее время имеет выраженную тенденцию к увеличению. Так полный жизненный цикл АЭС превысил 100 лет, а в отношении радиоактивных отходов (РАО) вопросы долгосрочной безопасности требуют рассмотрения уже на сотни тысяч и более лет вперед [8]. При этом даже в работах комплексного характера, с рассмотрением и сопоставлением различных способов электрогенерации, как, например, в работе [9], нормативные критерии и императивы сегодняшнего дня, а также характерные для современного мира краткосрочные риски проецируются в отдаленное будущее с той же приоритетностью радиационного фактора, что и в недавнем прошлом.

На начальном этапе развития АЭ такой подход был полностью оправдан – тогда технологические потребности в ресурсах любого вида не подлежали обсуждению, что:

1) формировали когорту профессиональных работников, которая заметно отличалась по дозам облучения от остальных групп населения; 2) оставляли вне повестки иные «гуманитарные» вопросы (например, экологии). Последующее технологическое развитие систем безопасности АЭС, в том числе стимулированное санитарно-гигиеническими и природоохранными требованиями, принципиально изменило ситуацию, в том числе по уровням облучения работников и населения. В итоге, в условиях осознания наличия для устойчивого развития экологических и иных рисков некоторые существующие парадигмы радиационной защиты, связанные с довольно тривиальной экстраполяцией её базовых признаков, стали не просто менее оправданы, но в целом неверны и даже вредны. В частности, на этой основе нельзя делать выводы о перспективах развития атомной энергетики.

Целью статьи является обоснование необходимости переосмысления исключительной роли радиационных критериев при рассмотрении перспектив атомной энергетики в пользу более широкого учета экологических и иных факторов, связанных с устойчивым развитием. В обосновании предлагаемого изменения стратегического позиционирования оценки вопросов РБ и соответствующих подходов лежат:

- основные итоги деятельности в области обеспечения РБ и экологической безопасности АЭ от начала атомной промышленной эры (середина XX века) до недавнего времени (устойчивая реализация ФЦП ЯРБ-2), в том числе радикальное улучшение уровня обеспечения РБ работников и населения, а также уроки, извлеченные из крупных радиационных аварий;
- развернутая характеристика актуальных задач в сфере обеспечения РБ на текущий период.
- видение критериев экологичности объектов энергетики в отдаленном будущем.

1. Итоги деятельности в области обеспечения радиационной и экологической безопасности атомной энергетики на первом этапе её развития

Началу эксплуатации АЭС предшествовал опыт радиологической защиты врачей-радиологов, зафиксированный в публикациях МКРЗ; работников новых отраслей промышленности, в том числе связанных с производством ядерных материалов, эксплуатации промышленных реакторов и радиохимических производств; многолетние медицинские наблюдения за эффектами действия радиации на работников, на население после радиационных аварий, на жертв атомной бомбардировки; реализация лечебных и реабилитационных мероприятий в отношении этих когорт. В СССР накопление опыта происходило в беспрецедентных условиях, поскольку работы осуществлялись более быстрыми темпами и с существенно меньшими ресурсами в сравнении с США.

В этот же период произошло становление международной кооперации по широкому кругу вопросов безопасности в рамках специальных международных организаций: МАГАТЭ (от нераспространения ядерного оружия до стандартов безопасности) и НКДАР ООН (по обобщению эффектов действия радиации на человека). Вместе с продолжившей функционировать МКРЗ эти структуры обеспечили генерацию документов, совокупность которых получила наименование международно признанных подходов.

К началу масштабных инвестиций в сооружение АЭС, а это 60–70 годы прошлого века, имелись предпосылки для того, чтобы считать, что человечество получает новые безопасные энерготехнологии с выраженными преимуществами не только по экономике, но и по уровню негативного воздействия на человека и окружающую среду. Не-

смотря на сложности, связанные с освоением новых реакторных технологий, эти надежды в полной мере сохранились до крупных радиационных аварий (Три-Майл-Айленд, Чернобыль и Фукусима), продемонстрировавших колоссальный масштаб косвенного ущерба и оказавших негативное влияние на развитие АЭ в целом. В 1979–80-х гг. в США, несмотря на отсутствие радиологических последствий аварии на Три-Майл-Айленд, из органов регулирования было отозвано около ста заявок на строительство новых атомных энергоблоков. После аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) решения по отказу от АЭ были приняты в ряде стран, в том числе в Италии. Авария в Японии повлекла длительную паузу в атомной генерации в этой стране и решения по закрытию АЭ в Германии. Произошедшее усиление систем безопасности, в том числе на случай тяжелых аварий, привело к увеличению стоимости сооружения энергоблоков в разы, но при этом так и не получило соответствующего отклика в форме всеобщего общественного признания их безопасности.

В предшествующие 50 лет важное влияние на развитие энерготехнологий оказали следующие события и процессы:

- Запуск атомной энергетики в различных масштабах в десятках стран с десятками энергоблоков в некоторых из них. Лидером по количеству энергоблоков стали США, где в настоящее время эксплуатируется 96 энергоблоков суммарной мощностью 98,1 ГВт [10], дающих более 19 % электроэнергии в стране. Лидером по доминированию и объему атомной генерации является Франция – 56 энергоблоков и более 70 % электрогенерации. Последние десятилетия характерны повышением эксплуатационных характеристик АЭС в 1,5–2 раза за счет продления срока эксплуатации (на 25–30 %), повышения мощности (на 5–10 %), коэффициент использования установленной мощности (на 10–20 %) и эффективности использования топлива (50–100 %). Указанные обстоятельства и сооружение новых энергоблоков частично компенсируют завершение сроков службы энергоблоков первых поколений. Однако в целом доля АЭ в мировой энергетике медленно снижается.
- Практическая сложность реализации решений по закрытию АЭС. Наиболее наглядный пример – Германия, где компании-владельцы АЭС погрузились в длительные судебные разбирательства по поводу компенсаций в связи с их преждевременным закрытием.
- Серьезные изменения в структуре энергетики. Возобновляемые способы генерации вышли на промышленный уровень и стали занимать заметную долю в производстве электроэнергии (10–30 % по отдельным странам). Традиционная угольная энергетика сворачивается в странах Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), но в целом в мире её доля пока сохраняется. Электростанции на газе существенно улучшили свои экономические показатели за счет технологических новаций и снижения цен на газ вследствие новых технологий добычи.
- За этот период произошло полномасштабное становление экологических требований. Тенденция ограничения выбросов парниковых газов на глобальном и национальных уровнях приобретает все более четкие очертания. Эти ограничения обращены ко всем отраслям-источникам вредных веществ и парниковых газов. Причем в отраслях с более короткими периодами обновления технологий, как, например, в автомобилестроении, они реализуются на порядки быстрее, тем самым предвзято более сильно экологическое давление на электроэнергетику в будущем. Развитие энергосбережения также внесло определенный вклад в коррекцию роста энергопотребления.

Важно, что сегодня АЭ сохраняет конкурентоспособность в полном цикле, то есть даже с учетом затрат на выведение из эксплуатации (ВЭ) энергоблоков и захоронения РАО, в широком, но ограниченном снизу диапазоне цен на органическое топливо. Естественно, что средств на ВЭ и захоронение не будет хватать, если какой-то период времени АЭ функционировала без создания фондов на обращение с отработанным ядерным топливом (ОЯТ) и РАО и вывод эксплуатации. В этих случаях включается государство. Программы по ядерному наследию реализуются в России, США, Великобритании [11]. Сбои имеют место и в тех случаях, когда энергоблоки досрочно останавливаются, как это происходит в Германии. Экономические обоснования, сопровождавшие разработку стратегии развития АЭ России в 21 веке [12], подтверждают конкурентоспособность АЭ. Нельзя не отметить и их критику, в том числе с нашей стороны, по причине игнорирования стратегией экологических преимуществ АЭ, а именно её безуглеродности [5].

В целом необходимо констатировать, что инвестиционная привлекательность АЭ за последние полвека снизилась, и о темпах сооружения АЭС, характерных для 70-х годов в США, Франции и СССР, вспоминать не приходится. Новые АЭС строятся с государственной поддержкой в основном в развивающихся странах – Китае, Индии, Турции, где требуется быстро и надолго нарастить энергопроизводство.

Основная причина подобной ситуации – в восприятии обществом радиационного фактора. Только в отдельных случаях явные и долговременные выгоды позволяют реализовывать крупные атомные проекты (Россия, Финляндия, ОАЭ и др.). В то же время в России и за рубежом идет быстрое наращивание компетенций по перспективным ядерным технологиям, среди которых и быстрые реакторы с жидкометаллическими теплоносителями, и атомные станции малой мощности, что, возможно, обеспечит их применение не только в традиционных ядерных странах.

Касаясь фактического состояния РБ, можно констатировать, что эволюционное развитие всех компонент её обеспечения стремительно ускорялось после аварий на ЧАЭС и в Японии (1986–1987 и 2011 гг.), когда вопросы определения доз и принятия решений по защите населения стояли очень остро и касались миллионов людей. К настоящему времени разными способами и в различных обстоятельствах были достигнуты ключевые результаты, позволяющие сегодня рассматривать АЭ как важную составляющую энергетики на ближайшие десятилетия, а проблему обеспечения РБ населения и работников при эксплуатации АЭС и объектов ядерно-топливного цикла (ЯТЦ) в целом решенной для подавляющего большинства условий работы [12]. Очень кратко обрисует фактически достигнутые результаты в контексте основных принципов радиационной защиты.

Принцип обоснования. Превышение пользы над вредом при эксплуатации было обосновано на начальной стадии развития АЭ. Такая оценка в целом сохранялась, хотя и польза и вред претерпевали изменения – сводные дозозатраты уменьшались, но добавлялись аварийные дозы, польза становилась менее выигрышной вследствие удорожания стоимости сооружения новых АЭС с дополнительными системами безопасности. На рубеже веков стала возможна общая оценка роли радиационного фактора при выборе желательного типа ЯТЦ (открытый с захоронением ОЯТ, с однократной переработкой ОЯТ и захоронением РАО и т.д.). Примечателен вывод, сделанный авторами специального доклада [13]: дозы облучения персонала и населения сопоставимы и потому не определяют выбор типа ЯТЦ. Этот вывод остается актуальным

и для настоящего времени, когда предлагаются более дорогие технологии, избавляющие следующие поколения от отдельных радионуклидов [7, 14, 15].

Принцип оптимизации

В отношении развития радиационной защиты накопленный опыт продемонстрировал большое количество случаев успешного применения принципа оптимизации и драматичные примеры его игнорирования, в том числе при крупных радиационных авариях. В качестве нескольких успешных примеров, реализованных в отсутствие принуждающих обстоятельств оборонного или аварийного характера, в разные исторические периоды приведем: снятие в 60-е годы прошлого века вопроса о переселении оленеводов в связи с повышенным облучением от выпадений после испытаний ядерного оружия [16]; введение категории особых, то есть подлежащих захоронению на месте, РАО [17]; разработку крупных комплексных мероприятий по ядерному наследию, в том числе по комплексной утилизации РАО от атомных подводных лодок [18] и Теченскому каскаду водоемов [19]. В качестве иных примеров можно привести неоправданные переселения в поздние сроки после аварий на Южном Урале и в Чернобыле [20], чрезмерные водоохранные меры в Чернобыльской зоне [20], излишние запреты на потребление местных продуктов питания в 1987 г. и последующие годы [21]. Перечень таких примеров может быть продолжен.

В целом можно констатировать, что национальная система РБ перегружена ограничениями. Чем больше таких ограничений, тем меньше пространство для оптимизации радиационной защиты. При этом забывается, что оптимизация не есть минимизация доз, а радиационная защита должна быть сбалансирована, в том числе в отношении разных источников облучения. Например, успехи в снижении доз облучения от использования АЭ не должны затенять проблематику повсеместного роста намного более значимого медицинского облучения [22] и т.д. К наиболее тяжелым последствиям приводит игнорирование принципа оптимизации при формировании нормативно-правовой базы.

Принцип нормирования. В России и в мире накоплен большой опыт установления предельных доз облучения для профессиональных работников. Уровни этих ограничений менялись – от стократных в сравнении с природным фоном для наиболее тяжелых производств на начальных этапах их функционирования до сопоставимых с природным фоном в настоящее время. При этом средние дозы для остального населения в основном не превышали 3 мЗв/год, а в последние десятилетия непрерывно растут в связи с ростом медицинских диагностических процедур и повышением полноты учета облучения от природного радона. В части производственного облучения повсеместно, благодаря технологическому развитию, регулярным усилиям эксплуатирующих организаций, органов регулирования и их организаций научно-технической поддержки, главным образом специалистов ФМБЦ ФМБА, дозы облучения персонала и населения многократно снижены на основных пределах ЯТЦ и надежно контролируются. В уникальной по детальности работе [23] приведены данные по дозам облучения персонала всех крупных предприятий отрасли не только в разрезе средних доз облучения, но и их максимальных значений за более чем полувековой период. Только за последние 20 лет средние и коллективные дозы облучения снизились в 2 раза. При этом количество лиц, получивших дозы от 20 до 50 мЗв в год, за последние 5 лет варьирует от 0 до 20 при среднем значении 5 человек в год.

В части ограничения облучения населения также накоплен большой опыт, в том числе при радиационных авариях, испытаниях ядерного оружия и нормальной эксплуатации объектов АЭС и промышленности. В период наиболее интенсивных ядерных испытаний [24] и крупных аварий уровни дополнительного облучения населения возрастали до величин, кратно сопоставимых с природным фоном в этих регионах, а затем снижались до десятых и сотых долей от них. Лишь в нескольких случаях [20] не удалось предотвратить более высокие дозы – это случаи облучения жителей прибрежной зоны р. Течи и облучения щитовидной железы жителей наиболее загрязненных районов после аварии на ЧАЭС.

В основе указанных принципов радиационной защиты лежит совокупность научных данных о действии радиации на человека и объекты живой природы. В настоящее время механизмы негативного воздействия радиации на объекты живой природы в основном познаны – они оказались в определенной мере более простыми в сравнении с другими процессами и явлениями, сопровождающими жизнь человека и иных объектов биоты и несущими риски заболевания или смерти. Установлены количественные критерии радиационного благополучия референсных видов биоты. Важно также, что масштабными усилиями на национальных уровнях и интеграцией данных на международном уровне сформированы обобщающие документы, описывающие основные механизмы действия радиации, модели оценки последствий облучения человека, а также развернуты системы радиационной защиты человека и безопасности объектов использования атомной энергии [25, 26, 27].

В 90-х годах прошлого века были в основном сформулированы и закреплены в международных конвенциях принципы безопасного обращения с ОЯТ и РАО. Более 60 стран мира обязались «обеспечить, чтобы на всех стадиях обращения с отработанным топливом и с радиоактивными отходами имелись эффективные средства защиты от потенциальной опасности, с тем чтобы защитить отдельных лиц, общество в целом и окружающую среду от вредного воздействия ионизирующих излучений в настоящее время и в будущем таким образом, чтобы нужды и чаяния нынешнего поколения удовлетворялись без ущерба для возможности будущих поколений реализовывать свои нужды и чаяния» [28]. Этой же конвенцией предусмотрены требования в отношении вывода объектов из эксплуатации.

Первые практические усилия по тематике захоронения долгоживущих РАО начались до появления атомной энергетики [8]. В период до 2000 г. во всех крупных ядерных странах было начато формирование национальных систем захоронения отходов. На международном уровне определены требования к долгосрочной безопасности захоронения ОЯТ и РАО. С их применением во многих странах уже созданы объекты захоронения РАО, в том числе средней активности. В отношении захоронения ОЯТ и продуктов их переработки во всех странах принят подход, предусматривающий создание на первом этапе подземных исследовательских лабораторий для верификации технологических решений по системам безопасности, следствием чего является отсутствие до настоящего времени введенных в эксплуатацию объектов геологического захоронения долгоживущих РАО высокой и средней активности.

Внимание к радиационным рискам и присутствие природных радионуклидов в угле способствовали широкому рассмотрению результатов сравнительного анализа радиационных рисков от угольного и атомного топливных циклов [29]. Выразительность полученных результатов в совокупности с периодами высоких цен на органическое

топливо затормозили сравнительные исследования атомных энергосистем с иными энергосистемами по более широкому набору критериев. В последние три десятилетия эта ситуация выправляется. Сравнительным анализом рисков различной природы у нас в стране и за рубежом установлены выраженные преимущества производства электроэнергии на АЭС для окружающей среды и здоровья человека [30–32].

Завершая рассмотрение первого этапа развития АЭС, констатируем, что на его протяжении к настоящему времени:

- Получены первые референции по основным компонентам жизненного цикла АЭС, в том числе по ВЭ энергоблоков, захоронению эксплуатационных и иных РАО низкой и средней активности, созданы исследовательские лаборатории и разрабатываются проекты объектов геологического захоронения ОЯТ и РАО.
- Развернуты полноценные нормативно-правовые и технологические системы обеспечения радиационной безопасности работников и населения, которые в области ограничения техногенного облучения в условиях нормальной эксплуатации все задачи полностью решают.
- Исследованы и оценены негативные последствия крупных радиационных аварий, в том числе социально-экономические. С применением кропотливых радиационно-эпидемиологических исследований подтверждены (на уровне порядков) значения радиологических рисков, впервые установленные на хироксимской когорте. Эти величины на порядки ниже рисков, связанных с «эксплуатационным» загрязнением окружающей среды химически вредными веществами [33].
- Извлечены уроки из крупных радиационных аварий [34], в том числе: в сфере ядерных технологий на основе концепции глубокоэшелонированной защиты, признающей необходимость детальнейшего рассмотрения процессов и явлений, инициирующих и сопровождающих тяжелые аварии, и принятия системы мер по их полному исключению, которые включают поддержание культуры безопасности, технические усовершенствования систем безопасности АЭС; в государственном регулировании использования атомной энергии (возможность аварий реактивного типа на энергоблоках типа РБМК и аварий вследствие потери энергоснабжения на АЭС Фукусима предсказывались специалистами, но не были должным образом оценены органами регулирования); в области аварийной готовности и аварийного реагирования (негативные радиологические последствия для населения при аварии на ЧАЭС могли быть полностью исключены, а в случае аварии на АЭС Фукусима были полностью предотвращены).

Одновременно приняты первые решения по ограничению выброса парниковых газов. Их всеобъемлющего характера и международного признания в глобальном масштабе еще предстоит добиться, как и признания преимуществ АЭС как базовой генерации, обладающей признаками стабильности и топливонезависимости. Важную роль в этом должно сыграть правильное позиционирование радиации как одного из многих источников экологических рисков, механизмы действия и управления которыми известны.

Констатируя положительную техническую оценку АЭС по экологическим параметрам, в том числе в части радиационного воздействия, отметим несколько обстоятельств, отягчающих ее восприятие обществом:

- связь с военным применением атомной энергии, а также взаимосвязь вопросов нераспространения и междуна-

родного терроризма с развитием АЭ;

- социальная неприемлемость тяжелых аварий на АЭС на фоне более толерантного восприятия аварий в иных энерготехнологиях;
- сомнения в возможности безопасной изоляции ядерных отходов (ОЯТ и РАО от его переработки), подкрепляемые отсутствием референций и фиксируемые даже в атомном сообществе [12];
- чрезмерная увлеченность изучением молекулярно-биологических механизмов действия радиации в малых (сопоставимыми с фоновыми) дозах на фоне более рационального подхода к изучению влияния иных и более интенсивных факторов.

2. Актуальные задачи в сфере обеспечения радиационной безопасности

Актуальные задачи в сфере обеспечения РБ в близком будущем (100 лет) определяются, с одной стороны, основными процессами в мировом хозяйстве, с другой стороны, гармонизацией национальной нормативной базы.

По нашему мнению, к таким процессам относится медленный рост энергопотребления, сопровождаемый быстрым сокращением доли органического топлива на транспорте (электродвигатели, водородное топливо) и уменьшением его доли в иных секторах экономики развитых стран. В энергетике ожидается установление стабильной структуры, основные компоненты которой будут связаны ограничениями (ограничения по выбросам парниковых газов в энергетике на органическом топливе, ограничения по условиям производства и доставки потребителю для гидро, ветровой и солнечной генерации). У АЭ в варианте замкнутого топливного цикла нет ресурсных ограничений, и при отсутствии драматических событий в сфере ядерной безопасности она имеет шанс выйти на лидирующие позиции. Если попыток реализации этого шанса не будет, то актуальные задачи в сфере РБ перестают быть такими. В противном случае, а именно он принят в нашей стране за базовый, предстоит многое сделать.

В АЭ, во-первых, должны быть осуществлены безаварийное завершение эксплуатации энергоблоков АЭС первых поколений и их ВЭ. Существующие на сегодняшний день процедуры лицензирования продления срока службы и культура безопасности, по-видимому, позволят это выполнить. Зарубежный опыт работ по ВЭ [35] и темпы развертывания таких работ в России обеспечат решение этой задачи в течение 50–100 лет. Не связанное с АЭ ядерное наследие должно быть полностью ликвидировано. Взятые темпы работ допускают возможность решения этой задачи в нынешнем веке. Решение проблем ядерного наследия избавит от бремени первого этапа использования атомной энергии, которое сопровождает нас в настоящее время. Цена этого решения во многом зависит от нормативных требований в сфере РБ. Во-вторых, должны быть получены референции по захоронению всех видов РАО. Существующие на сегодня наработки позволяют предположить, что геологические объекты захоронения РАО начнут функционировать в ближайшие 10 лет в нескольких странах за рубежом [8] и на рубеже 2040 г. в России [36]. В-третьих, должны появиться новые проекты АЭС. Для атомной энергетики России предложена двухкомпонентная структура АЭ, которая в качестве первой компоненты предусматривает эволюционный прогресс технологий ВВЭР, а в качестве второй – технологии реакторов на быстрых нейтронах с легким или тяжелым теплоносителями. Исследовательские и опытно-конструкторские работы ведутся высокими темпами и прохождение технологических развилок ожидается на рубеже 2030–2040 года. Их успех обеспечит замыкание по ядерным материалам и, возможно, выжигание

многих долгоживущих альфа-излучающих радионуклидов.

В этих условиях основными задачами в сфере экологической безопасности должна стать гармонизация нормативной базы в области рисков для здоровья, особенно в сфере обеспечения РБ. Пока в данной области больше деклараций, чем реальных подвижек. Решающая роль в изменении этой ситуации принадлежит радиологической общественности, а конечной целью должно стать осознание обществом необходимости взвешенного отношения к радиационным рискам. В противном случае неизбежны неверные с позиции устойчивого развития целевые ориентиры, неверно выбранные технологии и т.д. В особой степени это касается обстоятельств, которые не могут быть подтверждены практикой и относятся к далекому будущему. Соответствующий пример будет рассмотрен в следующем разделе. А пока рассмотрим несколько примеров, отражающих уровень понимания целей гармонизации в российском сообществе специалистов в области радиационной безопасности.

Пример 1. Федеральный закон от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» (далее – ФЗ РБН). Этот закон явился прямым отражением тех настроений в обществе, которые господствовали после аварии на ЧАЭС. Пятью годами раньше был принят основной «Чернобыльский» закон, который определил жертвами Чернобыля несколько миллионов человек, среди которых и проживавшие на загрязненных территориях, и их еще не родившиеся дети. Однако этих пяти лет оказалось недостаточно как для изменений в восприятии радиационных рисков, так и в понимании самой необходимости этих изменений. В итоге некоторые нормы были воспроизведены в новом законодательном акте – ФЗ РБН. С тех пор среди специалистов различного уровня идут обсуждения относительно внесения изменений в ФЗ РБН. Сначала эти обсуждения концентрировались на отсутствии единообразия в рамках санитарно-эпидемиологического нормирования и на отдельных нюансах установления пределов доз. Базовый закон в этой области предусматривал порядок и полномочия в области санитарно-эпидемиологического нормирования, в рамках которых устанавливались все санитарные нормативы [37]. В отличие от него, ФЗ РБН прямо устанавливал предельные значения доз и фиксировал некоторые положения системы радиационной защиты, которая не являлась неизменной и на тот период, и в настоящее время. Она развивается на основе публикаций Международной комиссии по радиационной защите (сейчас это публикация 103 МКРЗ [25]) и фиксируется в стандартах безопасности МАГАТЭ [26]. В последующий период тематика внесения изменений в ФЗ РБН постоянно расширялась (разграничения полномочий, гармонизация с международными подходами, увязка с атомным правом, техническое регулирование, регуляторные гильотины и т.д.), но количество изменений, внесенных в данный законодательный акт за 25 лет правоприменительной практики, минимально. Причина этого, по нашему мнению, в отсутствии позитивно-результативного влияния данного закона на практику обеспечения РБ в России. Соответствующие доводы, как и обращение к специалистам для его серьезного обсуждения приведены в нашей работе [38] и поддержаны в работе [39].

Пример 2. Отнесение к особым РАО [17]. Напомним, что принцип оптимизации был имплантирован в критерии отнесения к особым РАО с ограничениями на происхождение РАО (только оборонные и от аварий) и местоположение. Понятно, что данные ограничения явились следствием излишней предосторожности, а не оценок безопасности. Мы уже длительное время отстаиваем необходимость устранения этих ограничений в нормативном

документе и надеемся на успех.

Пример 3. Обсуждение критериев отнесения отходов к РАО. В 2019 г. вне связи с практическими задачами, поставленными в [40], стала обсуждаться идея о необходимости снижения порога отнесения к РАО [41] до уровня неограниченного использования материалов. Мы утверждали [42] и продолжаем утверждать, что эта идея основана на надуманной предосторожности, фрагментарном и в целом неверном применении материалов международных организаций, а также радикально противоречит принципу оптимизации.

Завершая характеристику уровня понимания и решения проблем РБ человека и окружающей среды в настоящее время, позволим себе сформулировать три утверждения:

1. В АЭ и ЯТЦ не существует ни одного связанного с радиацией процесса или явления, неопределенности в оценке влияния которого на здоровье человека и состояние окружающей среды могли бы изменить общую экологическую оценку АЭ в сравнении с иными способами производства электроэнергии. Все иные виды воздействия (тепловые сбросы и др.) и неопределенности в их оценке характерны для всех видов генерации.
2. В будущем неизбежно более гармоничное отношение к рискам различной природы. Высоковероятно, что решающую роль в этом сыграет облучение в медицинских целях. Сегодняшнее доминирование медицинского облучения в структуре доз будет нарастать, а вместе с ним нарастать и массовость индивидуальных решений в пользу приемлемости радиационных рисков, связанных с процедурой. Для этого в системе восприятия рисков должны стать более весомыми следующие факты:
 - Одна, достаточно обычная процедура, например, томография, соответствует дополнительной дозе облучения в течение всей жизни при проживании вблизи АЭС.
 - Дозы облучения участников ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в подавляющем большинстве ниже, чем полученные ими же суммарные дозы от медицинских процедур и природного фона [43].
3. Необходимость рационального позиционирования радиационного риска ставит новые и сложные задачи в данной области, в том числе в части точности идентификации малых доз облучения вследствие использования атомной энергии и эффектов их действия на фоне многократно и на порядки более высоких уровней радиационного воздействия от медицинских процедур, природных источников, как и влияния на здоровье иных факторов (канцерогены, токсины и вирусы).

Что касается общеэкологических тенденций, то на фоне ключевых трендов мировой экономики можно ожидать быструю перестройку в направлении полного жизненного цикла материалов и их рецикла (устойчивое обращение с материалами) для уменьшения количества образуемых отходов и их вовлечения в оборот. Другой несомненный тренд – декарбонизация с целями достичь углеродной нейтральности по выбросам. Материальный мир будет быстро меняться, и АЭ в него должна либо вписываться уже сейчас, либо улучшаться, чтобы вписаться (референции по ВЭ и захоронению). АЭ соответствует современным трендам декарбонизации, имеет низкие по сравнению с углем объемы отходов и выбросов. В более далекой перспективе она вписывается замыканием цикла. РБ касается скорее текущей деятельности и решения накопленных задач в конкретном временном промежутке (до конца столетия), тогда как забота о будущих поколениях – это не только собственно РБ, но и учет всего комплекса факторов вокруг деятельности в области АЭ. И чем дальше горизонт, тем больше факторов включается в рассмотрение.

В ближайшем будущем необходимо решить накопленные проблемы первого этапа, которые представлены остановленными объектами наследия, оставшимися загрязненными территориями и рудиментарными законами типа «Чернобыльского» и ФЗ РБН. Должно прийти осознание приемлемости имеющихся радиационных рисков при тех выгодах, которые приносит АЭ в контексте современной парадигмы развития и диверсификации энерготехнологий. Риски неожиданной крупной аварии на АЭС по-прежнему будут рассматриваться. И в случае, если это произойдет, АЭ будет, возможно, позиционироваться в виде минимального присутствия в энергобалансе.

3. Критерии экологичности объектов энергетики в отдаленном будущем

Эти критерии необходимо формулировать и учитывать уже сейчас, даже с пониманием того, что видение отдаленного будущего весьма условно. В рамках такого видения основными критериями могут стать: ресурсные ограничения; объем образующихся отходов в целом, а также отходов и материалов, определяющих глобальные изменения климата; объемы вредных выбросов и сбросов и иных локальных и региональных воздействий на здоровье человека и состояние окружающей среды. Естественно, что эти критерии должны относиться не только к объектам электрогенерации, но и ко всему топливно-энергетическому циклу. Также понятно, что эти экологические критерии не будут единственными, определяющими выбор энерготехнологий. Свою роль будут играть и иные мультидисциплинарные критерии, может быть, сформированные по типу прорабатываемых в проекте ИНПРО [44]. Важно, что практически по всем критериям АЭ имеет выраженные преимущества, особенно в варианте замкнутого ЯТЦ.

По нашему мнению, наличие специфического (по отношению ко всем кроме угольной энергетики) фактора – радиационного воздействия на уровнях многократно более низких, чем существующее природное облучение, – не должно становиться дискриминирующим ограничением.

Принятый на международном уровне подход к обеспечению РБ (будущие поколения должны быть защищены не хуже настоящего) реализуется у нас с определенным перегибом (дозы от захоронения РАО не должны превышать 10 мкЗв), иногда с неожиданным вниманием к дозам на отдельные органы, демографической структуре и рискам различных локализаций злокачественных новообразований [44]. Очень кратко о дозах облучения от захоронения РАО. Любое ограничение, даже в 10 мкЗв, не является проблемой на периодах в сотни и тысячи лет. Но на периодах десятков и сотен тысяч лет возникают серьезные проблемы, связанные с наличием в РАО малосорбируемых радионуклидов, в основном мягких бета-излучателей. Пути создания барьеров безопасности, гарантирующих защиту от таких радионуклидов и на таком уровне, не так очевидны, как очевидна их колоссальная стоимость. Эта стоимость будет препятствием для решений по захоронению, а, следовательно, и бременем. Бременем на поколение, отдаленное от нас не на сотню тысяч лет, а на поколение, которое будет жить завтра. В этом смысле международно признанный подход (300 мкЗв/год как безопасный уровень воздействия при нормальной эволюции и 10 мЗв/год как критерий оптимизации проекта сооружения ПЗРО при альтернативном сценарии) представляется верным, а новации в этой области, в том числе в виде 10 мкЗв или ориентированные на обязательное выжигание минорных актиноидов, представляются не вполне обоснованными.

Забота о будущих поколениях должна рассматриваться не только в аспекте рисков и бремени, но и в аспекте сохранения знаний, материальной культуры, включая технологии, и возможностей (открываемых теми же знаниями и технологиями). Сохранение ядерных технологий – тоже забота о будущих поколениях и, возможно, более важная, чем обеспечение уровня в 10 мкЗв/год на тысячелетия вперед.

Охрана окружающей среды – это тоже забота о будущих поколениях, предусматривающая сохранение природных ресурсов в широком смысле слова (земля, вода, воздух, недра, биоразнообразие), и с этих позиций АЭ менее ресурсоемка. А с точки зрения материальных потоков в перспективе при грамотном проектировании и безаварийной эксплуатации материалы при ВЭ АЭС будут рециклированы, площадка станет зеленой лужайкой и останется только ограниченный объем надежно изолированных отходов.

Еще раз отметим, что мы исходим из представлений о том, что нужно будущим поколениям, а именно благоприятная окружающая среда и нетронутая/малозатронутая природа, а не нормативы в 10 мкЗв или 1000 мкЗв.

Заключение

На протяжении десятилетий благодаря и вследствие глобального понимания опасности ядерного оружия, крупных радиационных аварий, но в большей степени в силу отсутствия ясных и системных разъяснений со стороны специалистов в области радиационной безопасности и медицинской радиологии, а также в силу определенного соперничества различных модификаций ядерных технологий по критериям радиационной безопасности сформировался беспрецедентный разрыв между реальной значимостью радиационного фактора среди рисков для здоровья человека и его восприятием подавляющей частью общества.

Определенное стимулирующее влияние на изменение ситуации смогут оказать экономические или экологические обстоятельства, в том числе такие, как тяжелые экономические последствия от реализации программ отказа от атомной энергии в крупных экономиках (Германия и др.), решения по повсеместному введению платы за выбросы парниковых газов и иных экологических платежей для объектов энергетики. Можно также предположить, что ежегодные индивидуальные решения сотен миллионов граждан по приемлемости облучения от медицинских диагностических процедур в дозах, сопоставимых с дозами облучения за многие десятилетия, проживание в непосредственной близости от АЭС (порядка 1 мЗв) также будут способствовать изменению ситуации. Но для решающего шага в преодолении этого разрыва, объективной оценки ситуации в области РБ и решения поставленных и задач в текущем столетии необходима четкая и единая фиксация со стороны научного сообщества, а вслед за ним – и органов государственной власти, что:

- Основные проблемные вопросы науки о радиационной безопасности человека, касающиеся 100 % населения и 99 % работников, решены и актуальными задачами являются сохранение накопленных знаний и оптимизация практического контроля и мониторинга.
- Сегодня уровни реального воздействия ионизирующего излучения со стороны объектов АЭ на работников и население гарантированно исключают любые негативные эффекты, которые могут быть выявлены на фоне намного более интенсивно действующих вредных факторов, связанных с загрязнением иной природы;
- Необходима гармонизация нормативно-правовой базы в сфере РБ и закрепление радиационного фактора как одного из многих факторов, которые требуется учитывать для обеспечения устойчивого развития, и который сегодня находится в диапазоне, где его изменение даже в разы не влияет на обеспечение радиационной безопасности.

Radiation and Environmental Aspects of Advanced Nuclear Energy

I.I. Linge, S.S. Utkin

¹Nuclear Safety Institute, Moscow, Russia
Contact person: Utkin Sergey S: uss@ibrae.ac.ru

ABSTRACT

The article focuses on the role of radiation criteria and its evolution in the structure of arguments underlying the establishment, operation and development of nuclear energy. It demonstrates that the dominant role of radiation criteria should be reconsidered to allow broader consideration of environmental and other factors associated with sustainable development.

Based on in-depth analysis of certain aspects relevant for the mutual development of nuclear energy and radiation and environmental safety requirements, the paper shows that fully-fledged regulatory and technological systems have been deployed to date to ensure the radiation safety of workers and the public: these systems cover all the tasks required to be addressed to limit the technogenic exposure under normal operation. At the same time, an unprecedented gap was noticed between the actual role of radiation factor across human health risks and its perception by the overwhelming part of society.

In the near future (some hundred years), urgent tasks in the field of radiation safety will be driven, on the one hand, by the need to ensure the internal consistency of the national security system addressing health risks in general, and on the other, by global processes in the world economy associated with slow growth in energy demand, rapid reduction in the share of fossil fuels in almost all sectors of the economy among the developed countries, including transport, growing general environmental trends towards material recycling and decarbonization. The study shows what should be the attitude to radiation risks so that the nuclear energy could successfully meet the requirements arising from these trends. In this regard, the paper also provides some rational interpretation of the principle suggesting that no undue burden should be imposed on future generations.

Key words: nuclear energy, radiation safety, environmental safety, sustainable development, energy efficiency, decarbonization, future generations

For citation: Linge II, Utkin SS. Radiation and Environmental Aspects of Advanced Nuclear Energy. Medical Radiology and Radiation Safety. 2021;66(5):113-121.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-5-113-121

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- JRS Science for Policy Report. Technical assessment of nuclear energy with respect to the 'do no significant harm' criteria of Regulation (EU) 2020/852 ('Taxonomy Regulation'). European Commission, 2021. 383 p.
- Climate Change - The Science (Updated May 2020). World Nuclear Association. URL: <https://www.world-nuclear.org/focus/climate-change-and-nuclear-energy/climate-change-the-science.aspx> (дата обращения 24.05.2021).
- Rosatom. Nuclear Power for Sustainable Development: How nuclear power can contribute to sustainable development goals in the age of climate change challenge. <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/d68/d687667b600aca117dc06560562ea503.pdf> (дата обращения 24.05.2021).
- Адамов Е.О., Большов Л.А., Ганев И.Х., Зродников А.В. и др. Белая книга ядерной энергетики. М.: Издательство ГУП НИКИЭТ, 2001. 269 с.
- Большов, Л.А., Линге И.И. Стратегия развития ядерной энергетики России и вопросы экологии // Атомная Энергия. 2019. Т. 127, № 6. С.303–309.
- Велихов Е.П., Гольцев А.О., Давиденко В.Д., Ельшин А.В. и др. Приемлемость замыкания топливного цикла ядерной энергетики // ВАИТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, Т. 44, № 1. С. 5–12.
- Курьндин А.В., Поляков Р.М., Позизов А.В., Фелицын М.А. и др. Комплексный сравнительный анализ безопасности реализации открытого и замкнутого ядерных топливных циклов в Российской Федерации. Методология и результаты. Труды НТЦ ЯРБ. М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2021 г. 59 с.
- Обоснование долговременной безопасности захоронения ОЯТ и РАО на 10 000 и более лет: методология и современное состояние. Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ-2019-03 / Под ред. И.Л. Абалкина, Л.А. Большов, И.В. Капурин и др. 2019. 40 с.
- Белая книга ядерной энергетики. Замкнутый ЯТЦ с быстрыми реакторами / Под ред. проф. Е.О. Адамова. М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2020. 496 с.
- Nuclear Energy Data 2020: NEA No. 7556. Nuclear energy agency organisation for economic co-operation and development, 2021. 128 p.
- Проблемы ядерного наследия и пути их решения. Вывод из эксплуатации. Т. 3. / Под ред. Л. А. Большова, Н. П. Лаврова, И. И. Линге. М.: 2015. 316 с.
- Стратегия развития ядерной энергетики России до 2050 года и перспективы на период до 2100 года. М.: Госкорпорация "Росатом". 2018. 62 с.
- Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options: A Comparative Study. NEA OECD Report 2000. 124 p.
- Адамов Е. О., Алексахин Р.М., Большов Л.А., Дедуль А.В. и др. Проект "ПРО-РБВ" – технологический фундамент для крупномасштабной ядерной энергетики // Известия Российской академии наук. М.: Энергетика. 2015. №. 1. С. 5–13.
- Игнатьев В. В., Кормилицын М.В., Кормилицына Л.А., Семченко Ю. М. и др. Жидкосольевой реактор для замыкания ядерного топливного цикла по всем актиноидам // Атомная Энергия. 2018. Т. 125, № 5. С. 251–255.
- Невструева М.А., Рамзаев П.В., Моисеев А.А., Троицкая М.Н. и др. Динамика уровней загрязнения цепочки лишайники – олени – оленеводы Cs-137 и Sr-90 за 1961–1964 гг. Избранные материалы «Бюллетеня радиационной медицины» / Под ред. Л.А. Ильина и А.С. Самойлова. М.: ФМБЦ ФМБА России, 2016. С. 70–77.
- Особые радиоактивные отходы / Под ред. И.И. Линге. М.: Сам Полиграфист, 2015. 240 с.
- Антипов С.В., Арутюнян Р.В., Ахунов В.Д., Богатов С.А. и др. Стратегическое планирование при выводе из эксплуатации ядерных и радиационно опасных объектов атомного флота на Северо-Западе России / Под ред. А.А. Саркисова. М.: Наука, 2011. 346 с.
- Уткин С.С. Стратегии перевода Теченского каскада водоемов ФГУП «ПО «Маяк» в радиационно безопасное состояние // Известия РАН. Энергетика, 2016. № 5. С. 132–139.
- Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Под ред. Л. А. Ильина, В. А. Губанова. М.: ИздАТ. 2001. 752 с.
- Международный чернобыльский проект: технический доклад. Оценка радиологических последствий и защитных мер. Доклад Международного консультативного комитета. Вена: МАГАТЭ, 1992. 740 с.
- Барковский А. Н., Братилова А. А., Кормановская Т. А., Ахматдинов Р. Р. Динамика доз облучения населения Российской Федерации за период с 2003 по 2018 г. // Радиационная гигиена. 2019. Т. 12, № 4. С. 96–122.
- Панфилов А. П. Исторические аспекты создания и развития основных объектов атомной отрасли страны. Радиационное воздействие на персонал в разные периоды времени // АНРИ. 2020. № 3. С. 3–25.
- Источники и эффекты ионизирующего излучения. Отчет Научного комитета ООН по действию атомной радиации 2000 года Генеральной Ассамблее ООН с научными приложениями. Том II: Эффекты (Часть 3) / Пер. с англ., под ред. Л.А. Ильина, С.П. Ярмоненко. М.: РАДЭКОМ, 2002. 352 с.
- Публикация 103 Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ): пер с англ. / Под ред. М. Ф. Киселёва и Н. К. Шандалы. М.: Изд. ПКФ Алана, 2009. 344 с.
- Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards – IAEA Safety Standards No GSR Part 3. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2014. 471p.
- Последствия облучения для здоровья человека в результате Чернобыльской аварии. / Научное приложение Д к Докладу НКДАР ООН 2008 года Генеральной Ассамблее. Нью-Йорк. 2012. 182 с.
- Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. INFCIRC/602/Rev 5. 2014. 14 с.
- Ильин Л. А., Книжников В. А., Князев В. А., Коренков И.П. и др. Онкологическая «цена» тепловой и атомной электроэнергии / Под ред. Л.А. Ильина, И.П. Коренкова. 2001. 240 с.
- Hirschberg, S., Burghert P., Hunt A. Accident Risks in the Energy Sector: Comparison of Damage Indicators and External Costs // Probabilistic Safety Assessment and Management. 2004. 2314-2319. DOI: 10.1007/978-0-85729-410-4_372.
- Новиков С.М., Шашина Т.А., Додина Н.С., Кислицин В.А., Скворонская С.А., Мащок А.В. и др. Опыт практических исследований по сравнительной оценке радиационных и химических рисков здоровью населения от воздействия факторов окружающей среды // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98, № 12. С. 1425–1431.
- Burghert P., Hirschberg S. Comparative risk assessment of severe accidents in the energy sector. // Energy Policy. 2014. Vol. 74. P. S45–56. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.01.035.
- Онищенко Г. Г., Новиков С.М., Рахманин Ю.А., Авалиани С.Л., Бушугуева К.А. Основы оценки риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду / Под ред. Ю.А. Рахманина, Г.Г. Онищенко. М.: НИИ ЭЧ и ГОС, 2002. 408 с.
- Российский национальный доклад: 35 лет чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России. 1986–2021 / Под ред. Л. А. Большова. М.: Академ-Принт, 2021. 104 с.
- Цебаковская Н.С., Уткин С.С., Иванов А.Ю., Сахаров В.К. и др. Лучшие зарубежные практики вывода из эксплуатации ядерных установок и реабилитации загрязненных территорий / Под ред. И.И. Линге, А.А. Абрамова. Комтехпринт, 2017. Т. 1, 2.
- Стратегия создания пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов. Госкорпорация «Росатом» // Радиоактивные отходы. 2018. Т. 2, № 3. С. 114–120.
- Федеральный закон "О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения" от 30.03.1999 N 52-ФЗ.
- Ведерникова М. В., Линге И. И., Панченко С. В., Стрижова С. В. и др. Актуальные вопросы внесения изменений в Федеральный закон от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» / Препринт ИБРАЭ РАН, № ИБРАЭ-2020-03. М.: ИБРАЭ РАН, 2020. 22 с.
- Шинкарев С.М., Кочетков О.А., Клочков В.Н., Барчуков В.Г. К дискуссии о внесении изменений в федеральный закон от 09.01.1996 №3-ФЗ «О радиационной безопасности населения» // Мед. радиология и радиационная безопасность. 2020. Т. 65, № 3. С. 77–78. DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-3-77-78.
- Абрамов А. А., Дорофеев А. Н., Дерябин С. А. Развитие ЕГС РАО в рамках работ по федеральной целевой программе обеспечения ядерной и радиационной безопасности // Радиоактивные отходы. 2019. Т.1, №6. С. 8–24.
- Иванов Е.А., Шаров Д.А., Демьяненко М.В., Шарфутдинов Р.Б., Курьндин А.В. О некоторых проблемах обращения с промышленными отходами, содержащими техногенные радионуклиды // Ядерная и радиационная безопасность. 2019. Т. 3, №93. С. 3–13.
- Абрамов А. А., Большов Л. А., Гаврилов П. М., Дорофеев А. Н. и др. Об идее расширения системы обращения с РАО на промышленные отходы, содержащие техногенные радионуклиды // Радиоактивные отходы. 2019. Т. 4, №9. С. 6–13. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-4-6-13.
- Тукнов А. Р., Прохорова О. Н., Орлов Ю. В., Талалаева Т. Г. и др. Оценка здоровья ликвидаторов последствий аварии на Чернобыльской АЭС – работников атомной промышленности России и жителей Московской области // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020. Т. 65, № 1. С. 17–21.
- IAEA. INPRO Publications. Methodology. <https://www.iaea.org/sites/default/files/20/05/inpro-publications-methodology.pdf> (дата обращения 24.05.2021).
- Иванов В.К., Чекин С.Ю., Меньяло А.Н., Максютгов М.А. и др. Уровни радиологической защиты населения при реализации принципа радиационной эквивалентности: риск-ориентированный подход // Радиация и риск. Бюллетень НРЭР. 2018. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/urovni-radiologicheskoy-zaschity-naseleniya-pri-realizatsii-printsipa-radiatsionnoy-ekvivalentnosti-risk-orientirovanny-podhod> (дата обращения 24.05.2021).

REFERENCES

- European Commission Joint Research Centre. JRS Science for Policy Report. Technical Assessment of Nuclear Energy with Respect to the 'Do No Significant Harm' Criteria of Regulation (EU) 2020/852 ('Taxonomy Regulation'). JRC124193. Petten, 2021. 383 p.
- World Nuclear Association. Climate Change - The Science. 2020 May. (cited 2021 May 24). Available from: <https://www.world-nuclear.org/focus/climate-change-and-nuclear-energy/climate-change-the-science.aspx>.
- Rosatom. Nuclear Power for Sustainable Development: How Nuclear Power Can Contribute to Sustainable Development Goals in the Age of Climate Change Challenge. 2019 (cited 2021 May 24). Available from: <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/d68/d687667b600aca117dc06560562ea503.pdf>
- Adamov EO, Bolshov LA, Ganey IKh, Zrodnikov AV, Kuznetsov AK, Lopatkin AV, et al. White Paper of Nuclear Power. Moscow: GUP NIKIET; 2001. 269 p. (In Russian).
- Bolshov LA, Linge II. Development Strategy of Nuclear Energy in Russia and Environmental Issues. Atomic Energy. 2019;127;6:303-9. (In Russian).
- Velikhov EP, Goltsev AO, Davidenko VD, Elshin AV, Kovalishin AA, Rodionova EV, et al. Acceptability of Closing the Fuel Cycle of Nuclear Energy. VANT. Ser. Thermoelectric Fusion, 2021;44;1:5-12. (In Russian).
- Kuryndin AV, Polyakov RM, Pozizov AV, Felitsyn MA, Shapovalov AS, Sharafutdinov RB, et al. Comprehensive Comparative Analysis of The Safety of The Implementation of Open and Closed Nuclear Fuel Cycles in the Russian Federation.

- Methodology and results. Proceedings of the Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety. Moscow: STC NRS Publ., 2021. 59 p. (In Russian).
8. Abalkina IL, Bolshov LA, Linge II, Utkin SS, Saveleva EA, Svitelman VS, Utkin SS. Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel Deep Geological Disposal Long-Term Safety Assessment For 10 000 Years and Over: Methodology and the Current State. IBRAE Preprint No. IBRAE-2019-03. 2019. 40 p. (In Russian).
 9. White Paper of Nuclear Power. Closed Nuclear Fuel Cycle with Fast Reactors. Ed. Adamov EO. Moscow, NIKIET Publ., 2020. 496 p. (In Russian).
 10. Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-Operation and Development. Nuclear Energy Data 2020. OECD NEA. 2021. No.7556. 28 p.
 11. Decommissioning. Vol. 3. Problems of Nuclear Legacy and Ways to Solve Them. Ed. Bolshov LA, Laverov NP, Linge II. Moscow Publ., 2015. 316 p. (In Russian).
 12. State Corporation "Rosatom". Strategy for the Development of Nuclear Power in Russia Until 2050 and Prospects for the Period up to 2100. Moscow Publ., 2018. 62 p. (In Russian).
 13. Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-Operation and Development. Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options: A Comparative Study. NEA OECD. 2000. 124 p.
 14. Adamov EO, Aleksakhin RM, Bolshov LA, Dedul A.V., Orlov V.V., Pershukov V.A., et al. Breakthrough Project – Technological Basement for Large-Scale Nuclear Energy. News of the Russian Academy of Sciences. Energy. 2015;1:5-13. (In Russian).
 15. Ignatiev VV, Kormilitsyn MV, Kormilitsyna LA, Semchenkov YuM, Fedorov YuS, Fainberg OC, et al. Liquid Salt Reactor for Closing the Nuclear Fuel Cycle for All Actinides. *Atomnaya Energiya*. 2018;125:5:251-5. (In Russian).
 16. Nevstrueva MA, Ramzaev PV, Moiseev AA, Troitskaya MN, Bel'tsev DI, Ibatullin MS, et al. Dynamics of Pollution Levels in the Chain Lichens - Deer - Reindeer Herders Cs-137 and Sr-90 for 1961-1964. Selected Materials of the Bulletin of Radiation Medicine. Ed. Ilyin LA, Samoilo AS. Moscow: FMBC FMBA of Russia Publ., 2016. p.70-77. (In Russian).
 17. Special Radioactive Waste. Ed. Linge II. Moscow, Sam Polygraphist Publ., 2015. 240 p. (In Russian).
 18. Antipov SV, Arutyunyan RV, Akhunov VD, Bogatov SA et al. Strategic Planning During Decommissioning of Nuclear and Radiation Hazardous Facilities of the Nuclear Fleet in the North-West of Russia. Ed. Sarkisov AA. Moscow, Nauka Publ., 2011. 346 p. (In Russian).
 19. Utkin SS. Strategies for Transferring the Techensky Cascade of Water Bodies of FSUE PA Mayak to a Radiation-Safe State. *Izvestiya RAN. Energy*. 2016;5:132-9. (In Russian).
 20. Major Radiation Accidents: Consequences and Protective Measures. Ed. Ilyin LA, Gubanov VA. Moscow, IzdAT Publ., 2001.752 p.
 21. IAEA International Chernobyl Project: Technical Report. Assessment of Radiological Consequences and Protective Measures. Report of the International Advisory Committee. Vienna; 1992. 740 p.
 22. Barkovsky AN, Bratilova AA, Kormanovskaya TA, Akhmatdinov RR. Dynamics of Exposure Doses to the Population of the Russian Federation for the Period From 2003 to 2018. *Radiation Hygiene*. 2019;12:4:96-122. (In Russian).
 23. Panfilov AP. Historical Aspects of Creation and Development of the Main Objects of the Atomic Industry of the Country. Radiation Impact on Personnel in Different Periods of Time. ANRI. 2020;3:3-25. (In Russian).
 24. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report of the UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000 to the UN General Assembly with scientific annexes. Volume II: Effects (Part 3). Translation from English. Ed. Ilyin LA, Yarmonenko SP. Moscow: RADEKON Publ., 2002. 352 p. (In Russian).
 25. Publication 103 of the International Commission on Radiation Protection (ICRP): Translation from English. Ed Kiselyov MF, Shandala NK. Moscow, Alana Publ., 2009. 344 p. (In Russian).
 26. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards - IAEA Safety Standards No GSR Part 3. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2014. 471p.
 27. Consequences of Exposure to Human Health as a Result of the Chernobyl Accident. Scientific Annex D to the 2008 UNSCEAR Report to the General Assembly. New York. 2012. 182 p.
 28. Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. INFCIRC. 602. Rev 5. 2014. 14 p.
 29. Ilyin LA, Knizhnikov VA, Knyazhev VA, Korenkov IP, Komleva VA, Novikova Mya, et al. Oncological Price of Thermal and Nuclear Power. Ed. Ilyin LA, Korenkov IP. 2001. 240 p. (In Russian).
 30. Hirschberg, S., Burgherr P., Hunt A. Accident Risks in the Energy Sector: Comparison of Damage Indicators and External Costs. Probabilistic Safety Assessment and Management. 2004:2314-19. DOI: 10.1007 / 978-0-85729-410-4_372.
 31. Novikov SM, Shashina TA, Dodina NS, Kislitsin VA, Skovronskaya SA, Matsyuk AV, et al. Practical Research Experience on the Comparative Assessment of Radiation and Chemical Risks to Public Health from the Impact of Environmental Factors. Hygiene and sanitation. 2019; 98;12:1425-31. (In Russian).
 32. Burgherr P., Hirschberg S. Comparative Risk Assessment of Severe Accidents in the Energy Sector. *Energy Policy*. 2014;74:45-56. DOI: 10.1016/j.enpol.2014.01.035.
 33. Onishchenko GG, Novikov SM, Rakhmanin YuA, Avaliani SL, Bushtueva KA. Fundamentals of Risk Assessment for Public Health when Exposed to Chemicals that Pollute the Environment. Ed. Rachmanin YuA, Onishchenko GG. Moscow: NII ECH and GOS Publ., 2002. 408 p. (In Russian).
 34. Russian National Report: 35 years of the Chernobyl accident. Results and Prospects of Overcoming its Consequences in Russia. 1986-2021. Ed. Bolshov LA. Moscow, Akadem-Print Publ., 2021. 104 p. (In Russian).
 35. Tsebakovskaya NS, Utkin SS, Ivanov AYU, Sakharov VK, Polunin KE. Best Foreign Practices for Decommissioning Nuclear Installations and Remediation of Contaminated Areas. Ed. Linge II, Abramov AA. Moscow, Komtekhprint Publ., 2017. Vol. 1 and 2. (In Russian).
 36. State Corporation "Rosatom". Strategy for Creating a Deep Disposal Site for Radioactive Waste. Radioactive waste. Moscow. 2018;2:3:114-20. (In Russian).
 37. Federal Law on the Sanitary and Epidemiological Welfare of the Population Dated March 30, 1999 No 52-FZ. (In Russian).
 38. Vedernikova MV, Linge II, Panchenko SV, Strizhova SV, Supotaeva OA, Utkin SS, et al. Topical Issues of Amendments to the Federal Law of January 9, 1996 No. 3-FZ On radiation safety of the population. IBRAE RAN Preprint, No. IBRAE-2020-03. Moscow: IBRAE RAN Publ., 2020. 22 p. (In Russian).
 39. Shinkarev SM, Kochetkov OA, Klochkov VN, Barchukov VG. Discussion on amendments to the federal law dated 09.01.1996 No. 3-FZ On the radiation safety of the population. *Med. radiology and radiation safety*. 2020;65:3:77-78. DOI: 10.12737 / 1024-6177-2020-65-3-77-78. (In Russian).
 40. Abramov AA, Dorofeev AN, Deryabin SA. Development of the USS RW in the Framework of the Federal Target Program for Ensuring Nuclear and Radiation Safety. *Radioactive Waste*. 2019;1:6:8-24. (In Russian).
 41. Ivanov EA, Sharov DA, Demyanenko MV, Sharafutdinov RB, Kuryndin AV. On Some Problems of Handling Industrial Waste Containing Technogenic Radionuclides. *Nuclear and Radiation Safety*. 2019;3:93:3-13. (In Russian).
 42. Abramov AA, Bolshov LA, Gavrilov PM, Dorofeev AN, Igin IM, Linge II, et al. On the Ideas of Expanding the System of Radioactive Waste Management to Industrial Waste Containing Technogenic Radionuclides. *Radioactive Waste*. 2019;4:9:6-13. DOI: 10.25283 / 2587-9707-2019-4-6-13 (In Russian).
 43. Tukov AR, Prokhorova ON, Orlov YuV, Talalaeva TG, et al. Health Assessment of Liquidators of the Consequences of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant - Workers of the Nuclear Industry in Russia And Residents of the Moscow Region. *Med. Radiology and Radiation Safety*. 2020;65:1:17-21. (In Russian).
 44. IAEA. INPRO Publications. Methodology. Available from: <https://www.iaea.org/sites/default/files/20/05/inpro-publications-methodology.pdf> (cited 2021 May 24).
 45. Ivanov VK, Chekin SYu, Menyailo AN, Maksyutov MA, Kasheeva PV, Lovachev SS, et al. Levels of Radiological Protection of the Population in the Implementation of the Principle of Radiation Equivalence: A Risk-Oriented Approach. *Radiation and Risk*. 2018;3. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/urovni-radiologicheskoy-zaschity-naseleniya-pri-realizatsii-printsipa-radiatsionnoy-ekvivalentnosti-risk-orientirovannyi-podhod> (cited 2021 May 24). (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Поступила: 23.12.2020. Принята к публикации: 20.01.2021.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
Financing. The study had no sponsorship.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.
Article received: 23.12.2020. Accepted for publication: 20.01.2021.