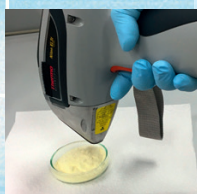


ОБЗОР ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

2017



60 лет

Атом для мира и развития

Обзор ядерных технологий – 2017

GC(61)/INF/4

Отпечатано МАГАТЭ в Австрии
Август 2017 года

IAEA/NTR/2017

Предисловие

В ответ на просьбы государств-членов Секретариат ежегодно подготавливает всеобъемлющий обзор ядерных технологий.

В "Обзоре ядерных технологий – 2017" рассказывается о значительных событиях, происшедших в мире в 2016 году в следующих отдельных областях: энергетические применения, атомные и ядерные данные, применения ускорителей и исследовательских реакторов, ядерные методы в сфере продовольствия, управления использованием почв и скотоводства, диагностика и лечение рака, новые достижения в изучении изотопов в осадках, последствия подкисления океана и сохранение культурного наследия.

Проект "Обзора" был представлен Совету управляющих на его сессии в марте 2017 года в документе GOV/2017/2. Окончательный вариант был подготовлен с учетом обсуждения, состоявшегося в Совете управляющих, а также замечаний, поступивших от государств-членов.

Содержание

Резюме	1
Основной доклад	5
A. Энергетические применения	5
A.1. Ядерная энергетика сегодня	5
A.1.1. Страны, приступающие к развитию ядерной энергетики	6
A.1.2. Страны, расширяющие свои ядерно-энергетические программы	8
A.1.3. Страны, эксплуатирующие АЭС	8
A.2. Прогнозы развития ядерной энергетики	9
A.3. Топливный цикл	12
A.3.1. Начальная стадия топливного цикла	12
A.3.2. Обеспечение гарантированных поставок	16
A.3.3. Конечная стадия топливного цикла	17
A.3.4. Вывод из эксплуатации, восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами	19
A.4. Безопасность	26
B. Атомные и ядерные данные	28
C. Применения ускорителей и исследовательских реакторов	30
C.1. Ускорители	30
C.1.1. Новые методы накачки-зондирования, разработанные для локального исследования радиационных повреждений	30
C.1.2. Новые биосовместимые радиационные дозиметры, использующие сфокусированные ионные пучки	31
C.1.3. Рассеяние нейтронов с использованием ускорителей	31
C.2. Исследовательские реакторы	32
D. Продовольствие и сельское хозяйство	36
D.1. Использование ядерных и смежных методов для контроля аутентичности пищевых продуктов	36
D.1.1. Аналитические методы	37
D.2. Нейтронный зонд космического излучения: новый метод мониторинга влажности почвы в масштабах района	38
D.3. Картирование с помощью радиационных гибридов для разработки генетических инструментов с целью поддержки программ разведения скота	40
D.3.1. Радиоизотопные методы картирования геномов скота	41
D.3.2. Применение карт радиационных гибридов в животноводстве	41
D.3.3. Последствия для продовольственной безопасности и цели в области устойчивого развития	41
E. Здоровье человека	42
E.1. Успехи в области лечения рака предстательной железы: диагностика и терапия	42
E.1.1. Общие сведения	42

Е.1.2. Диагностика.....	43
Е.1.3. Последние события и тенденции.....	43
F. Водные ресурсы.....	45
F.1. Новые разработки в области использования изотопов в осадках для диагностики погоды и климата	45
G. Окружающая среда.....	47
G.1. Использование изотопных инструментальных средств для исследования проблемы подкисления океана.....	47
G.1.1. Подкисление океана — еще одна проблема, связанная с CO ₂	47
G.1.2. Биологические последствия подкисления океана	48
G.1.3. Применение ядерных методов для понимания последствий подкисления океана.....	49
H. Радиационные технологии	49
H.1. Культурное наследие: изучение и сохранение с использованием радиационных технологий	49
H.1.1. Изучение и обследование	50
H.1.2. Использование радиационных методов для сохранения и укрепления артефактов.....	51

Резюме

1. На конец 2016 года во всем мире насчитывалось 448 действующих реакторов и общемировая генерирующая мощность АЭС достигла 391 ГВт (эл.) – рост составил примерно 8,3 ГВт (эл.) по сравнению с 2015 годом. В 2016 году три реактора были окончательно остановлены, десять новых реакторов были подключены к энергосети и началось строительство трех реакторов. Как и прежде, перспективы роста в краткосрочной и долгосрочной перспективах связывались прежде всего с Азией, особенно с Китаем. Из всех строящихся реакторов, число которых насчитывало 61, 40 реакторов находятся в Азии, и там же размещены 47 из 55 реакторов, которые были подключены к энергосетям в период после 2005 года.
2. Сегодня ядерно-энергетическими мощностями располагают 30 стран, и примерно такое же число стран изучают возможность включения ядерной энергетики в национальную структуру энергопроизводства, разрабатывают соответствующие планы или уже активно работают над этим. Из 30 стран с действующими реакторами 13 стран либо сооружают новые станции, либо активно завершают ранее приостановленные проекты строительства. Ряд стран, принявших решение о развитии ядерной энергетики, находятся на продвинутых стадиях подготовки инфраструктуры.
3. По прогнозам, выполненным Агентством в 2016 году, к 2030 году мощность ядерной энергетики в мире в случае сценария низкого роста увеличится примерно на 1,9% и при сценарии высокого роста – на 56%. Ядерная энергетика, которая характеризуется неоспоримыми преимуществами – низкими уровнями углеродных выбросов, высокими генерирующими мощностями и возможностью диспетчерского управления генерацией, может в значительной мере способствовать достижению цели Парижского соглашения ограничить прирост глобальной температуры на уровне намного ниже 2°C сверх доиндустриальных уровней и реализации целей Организации Объединенных Наций в области устойчивого развития. Инновационные ядерно-энергетические технологии могут также обеспечить дальнейшее сокращение выбросов парниковых газов и расширение роли ядерной энергии в новых применениях.
4. Во всем мире продолжалась работа по повышению безопасности атомных электростанций (АЭС), и эксплуатационная безопасность АЭС оставалась на высоком уровне, о чем свидетельствуют обычно используемые показатели безопасности. Агентством были пересмотрены публикации категории "Требования безопасности" с целью учета в них уроков аварии на АЭС "Фукусима-дайти". Пересмотру были подвергнуты также две других публикации по требованиям безопасности, касающиеся лидерства и менеджмента для обеспечения безопасности и безопасности исследовательских реакторов.
5. Низкие цены на уран продолжали действовать в качестве фактора, сдерживающего усилия компаний, направленные на изыскание средств для проведения разведки, технико-экономических исследований, запуска новых и расширения существующих проектов строительства. В 26-м издании выпускаемой раз в два года "Красной книги" – авторитетного источника общемировой информации по урану – показано, что глобальных урановых ресурсов более чем достаточно для удовлетворения спроса в случае сценария высокого роста, упомянутого выше.

6. Предприятия по обогащению и другие звенья топливного цикла функционировали на более или менее неизменном уровне. Начато строительство нового склада для Банка низкообогащенного урана (НОУ) МАГАТЭ в Казахстане, и работы ведутся в соответствии с графиком.

7. Объемы отработавшего ядерного топлива, находящегося на хранении, достигли примерно 273 000 тонн тяжелого металла (т ТМ), при этом темпы его накопления составляют около 7000 т ТМ/год. Были введены в эксплуатацию пять внереакторных установок для хранения отработавшего топлива энергетических реакторов.

8. Ожидается, что в ближайшие годы в мире предстоит выполнить значительный объем работы по выводу объектов из эксплуатации: 158 ядерных энергетических реакторов были окончательно остановлены либо выводятся из эксплуатации. Более 60% всех действующих реакторов находятся в строю уже 30 и более лет, а около 15% из них – свыше 40 лет. Хотя некоторые из этих реакторов могут продолжать работать и далее, многие установки будут выведены из эксплуатации в ближайшие два десятилетия. Кроме того, выведены из эксплуатации или находятся на этапе вывода из эксплуатации более 480 исследовательских реакторов и критических сборок, а также несколько сотен других установок топливного цикла.

9. В нескольких странах продолжалось осуществление проектов по глубинному геологическому захоронению радиоактивных отходов. В мире функционируют пункты захоронения для всех других категорий радиоактивных отходов. Расширяются возможности возврата и переработки источников в ходе обращения с изъятыми из употребления закрытыми радиоактивными источниками (ИЗРИ). В ряде стран на различных стадиях реализации находятся проекты скважинного захоронения. В результате успешного проведения операций по удалению ИЗРИ многие такие источники были помещены на хранение в надлежащих условиях.

10. Совместная международная организация библиотек оцененных данных стимулировала прогресс в оценке нейтронных сечений изотопов кислорода, железа, урана и плутония, имеющих особо важное значение для ядерных технологий. База данных Международной сети оценщиков данных о структуре и распаде ядра получила поддержку в результате запуска Агентством вебсайта нуклидов LiveChart и приложения Isotope Browser для поиска ядерной информации с использованием смартфонов.

11. Достижения и инновации в ускорительных технологиях включает новые методы спектроскопии накачка–зондирование для исследования на месте радиационных повреждений, разработку новых биосовместимых радиационных дозиметров и метод нейтронного рассеяния на базе ускорителя.

12. В мире примерно половина из 249 действующих в 56 странах исследовательских реакторов и критических установок эксплуатируется свыше 40 лет. Основными задачами, стоящими перед сообществом пользователей исследовательских реакторов, являются управление старением, обеспечение устойчивости поставок топлива, определение вариантов обращения с отработавшим топливом и повышение эффективности использования исследовательских реакторов. В семи странах строятся новые исследовательские реакторы, а в ряде других стран разрабатываются планы или изучается вопрос о строительстве новых установок, которые станут основными национальными установками, способствующими развитию инфраструктуры и программ в области ядерной науки и технологий, включая ядерную энергетику. Такие инициативы, как проект "Реакторная интернет-лаборатория Агентства" и схема ИСЕРР ("Международный центр МАГАТЭ на базе исследовательских реакторов"), а также региональные сети и объединения содействуют развитию международного сотрудничества в области использования исследовательских реакторов для наращивания потенциала в ядерной сфере.

13. Продолжалась деятельность по сведению к минимуму используемого высокообогащенного урана (VOU), включая возврат VOY топлива исследовательских реакторов в страну происхождения. В осуществлении программы возврата VOY топлива российского и американского происхождения за прошедшие годы были достигнуты результаты, заслуживающие высокой оценки.

14. Несмотря на отключения и эксплуатационные проблемы, возникавшие на некоторых установках, в 2016 году не было значительных перебоев в поставках молибдена-99 – наиболее часто используемого медицинского изотопа. Крупные производители продолжают работу по переводу производства с VOY на НОУ.

15. Глобализация в торговле пищевыми продуктами обуславливает возрастающую потребность в эффективных системах контроля продуктов питания для защиты потребителей от ложно маркированных продуктов питания. Фальсифицированное продовольствие может представлять угрозу безопасности, поскольку контрафактная продукция не подвергается такому же контролю, как подлинный продукт, и ее ингредиенты могут быть неизвестными. Стремительно росла потребность в аналитических методах, составляющих основу механизмов аутентификации и отслеживания происхождения пищевых продуктов. Ряд затратоэффективных ядерных и связанных с ними аналитических методов, таких, как измерение природных стабильных изотопов биоэлементов в пищевых продуктах, может обеспечивать получение информации о их географическом происхождении и методе производства. Новейшие достижения в разработке доступных ручных аналитических приборов обеспечивают упрощение проверок подлинности продуктов питания в нескольких точках пищевой цепи и значительно повышают эффективность систем контроля.

16. Измерение соотношений природных стабильных изотопов биоэлементов в пищевых продуктах часто позволяет получить информацию о их географическом происхождении или методе производства, а элементное профилирование пищевых продуктов является источником важной информации о их безопасности или токсичности и также может помочь в установлении места происхождения пищевой продукции. Эти методы в сочетании с другими методами, такими, как колебательная спектроскопия, анализ ДНК и микробный фотипринтинг, имеют неоценимое значение для аутентификации продуктов питания.

17. На сельское хозяйство приходится около двух третей глобального потребления пресной воды. Для достижения уровней урожайности, необходимых для удовлетворения потребностей, обусловленных ростом населения, должна повышаться эффективность сельскохозяйственных систем. Детектор нейтронов космических лучей представляет собой новое устройство, которое может фиксировать и количественно определять содержание влаги в почве на большой площади без больших затрат времени и инвазивных процедур, которыми характеризуются традиционные системы оценки. Информация о влажности почвы, которую позволяет получать это устройство, будет обеспечивать более эффективное управление оскудевающими водными ресурсами.

18. Геномные инструменты, такие, как ДНК-чипы, помогают оценить племенную ценность животных при рождении. Геномные карты позволяют определять локацию конкретных черт на хромосомах и являются необходимыми инструментами для идентификации генов и маркеров, ответственных за характеристики продуктивности и резистентность к болезням. С помощью радиоизотопных методов можно решить проблему трудоемких традиционных процессов геномного картирования сельскохозяйственных животных путем имитации генетических рекомбинационных событий и ускорения процесса *in vitro*.

19. Разработка и применение карт радиационных гибридов и геномного инструментария помогут разработать программы селекции для повышения продуктивности животноводства и продовольственной безопасности. Созданы геномные карты высокого разрешения для овец, буйволов, коз и свиней, и такие же карты могут быть подготовлены для целого ряда других важных пород сельскохозяйственных животных. Эти карты облегчили разработку ДНК-чипов, которые широко применяются для селекции пород крупного рогатого скота с целью повышения производства молока.

20. Рак предстательной железы входит в число трех наиболее распространенных онкологических заболеваний у мужчин во всем мире и наряду с раком легких, печени, желудка и кишечника является одной из наиболее распространенных причин смерти мужчин от рака. У более половины пациентов происходит биохимический рецидив после простатэктомии или дистанционной лучевой терапии. Недавно была получена новая молекула, таргетированная на простатический специфический мембранный антиген (ПСМА) – фермент, ассоциированный с раковыми клетками простаты. ПСМА может быть отличной молекулярной мишенью для разработки радиоиндикаторов, предназначенных для визуализации с помощью ПЭТ-КТ, так как он позволяет обнаруживать ранние рецидивы заболевания. Проводятся клинические испытания.

21. В рамках Глобальной сети Агентства "Изотопы в осадках" (ГСИО) начиная с 1960 года проводится сбор данных о соотношении изотопов кислорода и водорода в осадках. Данные ГСИО показывают, что соотношение изотопов характеризуется значительными сезонными колебаниями. Последние работы, выполненные в Агентстве, показывают, что между соотношениями изотопов и облачными процессами, ответственными за осадки, имеется существенная корреляция. Эти новые знания значительно повысят полезность данных ГСИО для понимания как краткосрочных связанных с погодой, так и долгосрочных связанных с климатом процессов и будут способствовать мониторингу изменения климата и адаптации к этому изменению.

22. В настоящее время подкисление океана оказывает измеримое воздействие на многие морские организмы, включая рыбу, моллюсков, планктон и кораллы, которые являются критически важными в различных аспектах для здоровья и благополучия океанов и всех, кто зависит от них. Проводятся эксперименты с применением наборов радиоизотопов для изучения влияния прогнозируемого снижения pH океанов на такие морские организмы, и эти эксперименты позволяют по-новому взглянуть на проблему далеко идущих последствий подкисления океана. Такая информация необходима для более точного прогнозирования вероятного воздействия, которому подвергаются наши прибрежные и морские ресурсы в меняющемся океане.

23. Радиационные методы могут быть использованы для целей сохранения широкого спектра бесценных культурных объектов. Радиография и компьютерная томография обеспечивают проведение детального изучения артефактов, и радиационная обработка помогает удалять поражение вредоносными насекомыми и грибами. Ценные предметы и документы можно реставрировать и закреплять с помощью радиационной обработки – технологии, которая теперь играет уникальную роль в сохранении мирового культурного наследия.

Обзор ядерных технологий – 2017

Основной доклад

А. Энергетические применения

А.1. Ядерная энергетика сегодня

1. По состоянию на 31 декабря 2016 года в мире эксплуатировалось 448 ядерных энергетических реакторов суммарной мощностью 391 ГВт (эл.)¹ (см. таблицу А-1). Это приблизительно на 8,3 ГВт (эл.) превышает суммарную мощность 2015 года. Из общего числа находящихся в эксплуатации реакторов 82% составляют реакторы с легководным замедлителем и теплоносителем, 10,9% – реакторы с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем, 3,3% – легководные реакторы с графитовым замедлителем и 3,1% – газоохлаждаемые реакторы. Три установки представляют собой быстрые реакторы с жидкометаллическим теплоносителем.

2. В 2016 году к энергосетям были подключены десять новых реакторов – столько же, сколько и в 2015 году, и все они являются реакторами с водой под давлением (PWR). Пять из этих реакторов находятся в Китае ("Чанцзян-2", "Фанчэнган-2", "Фуцин-3", "Хунъяньхэ-4", "Ниндэ-4"), а остальные в Индии ("Куданкулам-2"), Республике Корея ("Син-Кори-3"), Пакистане ("Чашма-3"), Российской Федерации (Нововоронежская АЭС-2-1) и Соединенных Штатах Америки ("Уоттс Бар-2").

3. После повторного пуска реакторов "Сэндай-1" и "Сэндай-2" в 2015 году, которые стали первыми ядерными энергетическими реакторами, возобновившими полномасштабную эксплуатацию в Японии после аварии на АЭС "Фукусима-дайти", в январе и феврале 2016 года, соответственно, была возобновлена эксплуатация реакторов "Такахама-3" и "Такахама-4", однако вскоре после этого они были снова остановлены. В августе 2016 года была возобновлена эксплуатация энергоблока "Иката-3". В октябре 2016 года в США после 43 лет эксплуатации был окончательно остановлен первый блок атомной электростанции (АЭС) "Форт Кэлхун".

4. По состоянию на 31 декабря 2016 года на стадии строительства находился 61 реактор. Согласно прогнозам, рост мощностей, а также развитие ядерной энергетики в краткосрочной и долгосрочной перспективах будет происходить преимущественно в Азии (рис. А-1), прежде всего в Китае. Из общего числа строящихся реакторов 40 реакторов размещены в Азии, и там же находятся 47 из 55 новых реакторов, подключенных к энергосети после 2005 года.

¹ 1 ГВт (эл.), или гига watt (электрической мощности), равен одному миллиарду watt электрической мощности.

Число строящихся реакторов по регионам

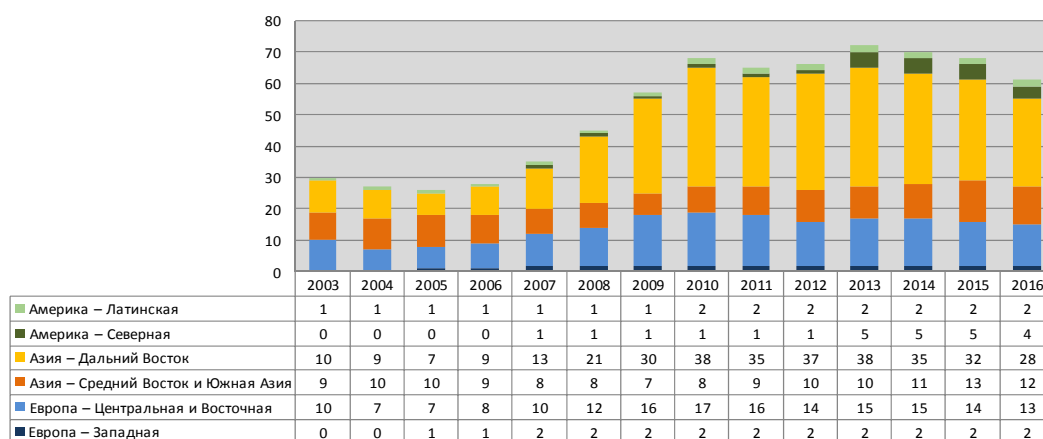


РИС. А-1. Число строящихся реакторов по регионам (источник: Информационная система МАГАТЭ по энергетическим реакторам: <http://www.iaea.org/pris>).

А.1.1. Страны, приступающие к развитию ядерной энергетики

5. В Объединенных Арабских Эмиратах продолжалось строительство всех четырех реакторов первой АЭС страны, расположенной в местности под названием Барака. Блок №1 планируется ввести в коммерческую эксплуатацию в 2017 году, при этом три остальных энергоблока будут вводиться в эксплуатацию каждый последующий год. В ноябре 2016 года была завершена миссия МАГАТЭ в рамках оказания комплексных консультативных услуг по физической защите. Ядерно-энергетическая корпорация Эмиратов (ЭНЕК) и Корейская электроэнергетическая корпорация подписали соглашение о создании совместного предприятия для долгосрочного партнерского сотрудничества. Объединенные Арабские Эмираты запросили у Агентства руководящие материалы по вопросу о том, как научные исследования и разработки могут способствовать обеспечению устойчивости ядерно-энергетической программы и соответствующих учреждений страны.

6. Продолжалось строительство двух энергоблоков первой АЭС Беларуси в Островце, при этом ввод в эксплуатацию запланирован на 2019 и 2020 годы. В конце 2016 года на площадку был доставлен корпус реактора для энергоблока № 1. В 2016 году была проведена миссия МАГАТЭ в рамках комплексных услуг по рассмотрению вопросов регулирования (ИРПС).

7. В декабре 2015 года Бангладеш подписала контракт на проведение инженерных, закупочных и строительных работ с ЗАО "Атомстройэкспорт" Российской Федерации. В июле 2016 года была получена лицензия на площадку и было заключено межправительственное кредитное соглашение с Российской Федерацией. Ожидается, что энергоблок № 1 АЭС "Руппур" будет введен в эксплуатацию в 2023 году, а энергоблок № 2 – в 2024 году.

8. В феврале 2015 года Египет подписал соглашение с Государственной корпорацией по атомной энергии "Росатом" Российской Федерации о разработке проекта строительства новой АЭС "Эль-Дабаа" и после этого подписал дальнейшее межправительственное соглашение по финансовым вопросам с Российской Федерацией. Завершение строительства первого энергоблока на площадке Эль-Дабаа запланировано на 2025 год и других трех энергоблоков – к 2027 году. Иордания сформировала международную консультативную группу для рассмотрения прогресса в осуществлении ядерной программы страны и наняла консультантов для подготовки инвестиционного решения, принятие которого планируется на 2018 год. В ноябре 2016 года Национальное собрание Вьетнама одобрило решение правительства отменить планы страны по развитию ядерной энергетики. Ранее в 2009 году Национальное собрание утвердило планы строительства двух АЭС общей мощностью 4000 МВт.

Таблица А-1. Действующие и строящиеся ядерные энергетические реакторы в мире
(по состоянию на 31 декабря 2016 года)^а

СТРАНА	Действующие реакторы		Строящиеся реакторы		Электроэнергия, произведенная на АЭС в 2016 году		Общий опыт эксплуатации на конец 2016 года	
	Число энерго-блоков	Всего МВт (эл.)	Число энерго-блоков	Всего МВт (эл.)	ТВт·ч	% от общего объема производства	Годы	Месяцы
АРГЕНТИНА	3	1 632	1	25	7,7	5,6	79	2
АРМЕНИЯ	1	375			2,2	31,4	42	8
БЕЛАРУСЬ			2	2 218				
БЕЛЬГИЯ	7	5 913			41,4	51,7	282	7
БОЛГАРИЯ	2	1 926			15,1	35,0	161	3
БРАЗИЛИЯ	2	1 884	1	1 245	15,0	2,9	51	3
ВЕНГРИЯ	4	1 889			15,2	51,3	126	2
ГЕРМАНИЯ	8	10 799			80,1	13,1	824	7
ИНДИЯ	22	6 240	5	2 990	35,0	3,4	460	11
ИРАН, ИСЛАМ. РЕСП.	1	915			5,9	2,1	5	4
ИСПАНИЯ	7	7 121			56,1	21,4	322	1
КАНАДА	19	13 554			95,7	15,6	712	6
КИТАЙ	36	31 384	21	21 622	197,8	3,6	243	2
КОРЕЯ, РЕСПУБЛИКА	25	23 077	3	4 020	154,3	30,3	498	11
МЕКСИКА	2	1 552			10,3	6,2	49	11
НИДЕРЛАНДЫ	1	482			3,7	3,4	72	0
ОБЪЕД. АРАБ. ЭМИРАТЫ			4	5 380				
ПАКИСТАН	4	1 005	3	2 343	5,4	4,4	67	11
РОССИЙСКАЯ ФЕД.	35	26 111	7	5 520	184,1	17,1	1 226	9
РУМУНИИ	2	1 300			10,4	17,1	29	11
СЛОВАКИЯ	4	1 814	2	880	13,7	54,1	160	7
СЛОВЕНИЯ	1	688			5,4	35,2	35	3
СОЕД. КОРОЛЕВСТВО	15	8 918			65,1	20,4	1 574	7
СОЕД. ШТАТЫ АМЕРИКИ	99	99 869	4	4 468	804,9	19,7	4 210	9
УКРАИНА	15	13 107	2	2 070	76,1	52,3	473	6
ФИНЛЯНДИЯ	4	2 764	1	1 600	22,3	33,7	151	4
ФРАНЦИЯ	58	63 130	1	1 630	386,5	72,3	2 106	4
ЧЕШСКАЯ РЕСП.	6	3 930			22,7	29,4	152	10
ШВЕЙЦАРИЯ	5	3 333			20,3	34,4	209	11
ШВЕЦИЯ	10	9 740			60,6	40,0	442	6
ЮЖНАЯ АФРИКА	2	1 860			15,2	6,6	64	3
ЯПОНИЯ	42	39 752	2	2 653	17,5	2,2	1 781	5
Всего ^{b, c}	448	391 116	61	61 264	2 476.2		16 982	5

а. Данные заимствованы из Информационной системы Агентства по энергетическим реакторам (ПРИС) (<http://www.iaea.org/pris>).

б. Примечание: суммарные показатели включают следующие данные по Тайваню, Китай:

6 энергоблоков мощностью 5052 МВт (эл.) в эксплуатации; 2 энергоблока мощностью 2600 МВт (эл.) в стадии строительства;

на АЭС выработано 30,5 ТВт·час электроэнергии, что составляет 13,7% общего производства электроэнергии.

с. Суммарный опыт эксплуатации включает также данные по остановленным станциям в Италии (80 лет, 8 месяцев), Казахстане (25 лет, 10 месяцев), Литве (43 года, 6 месяцев) и на Тайване, Китай (212 лет, 1 месяц).

9. Приступающие к развитию ядерной энергетики страны, которые рассматривают возможность, планируют внедрение или активно работают над включением ядерной энергетики в свою структуру энергопроизводства, сотрудничают с Агентством в деле развития необходимой ядерной инфраструктуры. Эти страны принимают суверенные решения в отношении выбора в пользу использования ядерной энергии и начинают взаимодействовать со странами-поставщиками в строительстве своих будущих атомных электростанций. Агентство, применяя конкретную методологию, изложенную в документе "Milestones" ("Основные этапы"), играет важную роль во внедрении безопасных, надежных и устойчивых программ. Агентство оказывает помощь государствам-членам посредством проведения независимых экспертиз и миссий экспертов, учебных курсов и предоставления инструментов моделирования, которые системно охватывают 19 инфраструктурных задач реализации подхода, изложенного в документе "Milestones" ("Основные этапы"). С учетом двух миссий по комплексному рассмотрению ядерной инфраструктуры (ИНИР) и двух соответствующих повторных миссий, проведенных в 2016 году, общее число миссий ИНИР, состоявшихся после их учреждения в 2009 году, достигло 21 в 15 государствах-членах.

А.1.2. Страны, расширяющие свои ядерно-энергетические программы

10. В США Комиссия по ядерному регулированию (КЯР) выдала компании "Теннесси вэлли аторити" лицензию на эксплуатацию энергоблока № 2 АЭС "Уоттс-Бар" сроком действия на 40 лет, который был подключен к энергосети в июне и был введен в коммерческую эксплуатацию в октябре 2016 года. "Уоттс-Бар" стала первой АЭС, которая уже соответствует выработанным после аварии на АЭС "Фукусима-дайити" требованиям КЯР в отношении стратегий смягчения последствий аварий. Строительство энергоблока № 2 АЭС "Уоттс-Бар" было выполнено на 80%, когда дальнейшие работы были остановлены в 1980-х годах, и использование такого уже имеющегося актива обеспечило экономию времени и финансовых ресурсов в сравнении с альтернативными вариантами строительства новых генерирующих мощностей.

11. Проект строительства АЭС "Хинкли-Пойнт С" мощностью 3200 МВт с двумя реакторами типа EPR в графстве Сомерсет, Англия, был одобрен советом директоров компании "Электрисите де Франс" (ЭДФ) в июле 2016 года и правительством Соединенного Королевства в сентябре 2016 года с некоторыми новыми условиями относительно инвестиций. Станция имеет проектный срок службы 60 лет. ЭДФ рассчитывает, что первый реактор будет введен в эксплуатацию в начале 2026 года, через 115 месяцев после инвестиционного решения и утверждения правительством.

12. В 2016 году было начато строительство трех реакторов: "Карачи-3" в Пакистане и "Тяньвань-6" и "Фанчэнган-4" в Китае.

А.1.3. Страны, эксплуатирующие АЭС

13. Из 450 действующих ядерных энергетических реакторов 293 находились в строю 30 и более лет. По окончании проектного срока службы реактора проводятся анализ его безопасности и оценка старения его основных конструкций, систем и элементов для подтверждения или продления лицензии на эксплуатацию на период после истечения первоначально установленного срока службы. В последние годы владельцами/операторами был определен ряд ядерных энергетических реакторов с действующими лицензиями и реакторов, которые могли бы получить продление эксплуатационной лицензии, для досрочной остановки, и во многих таких случаях в качестве основной причины назывались экономические факторы.

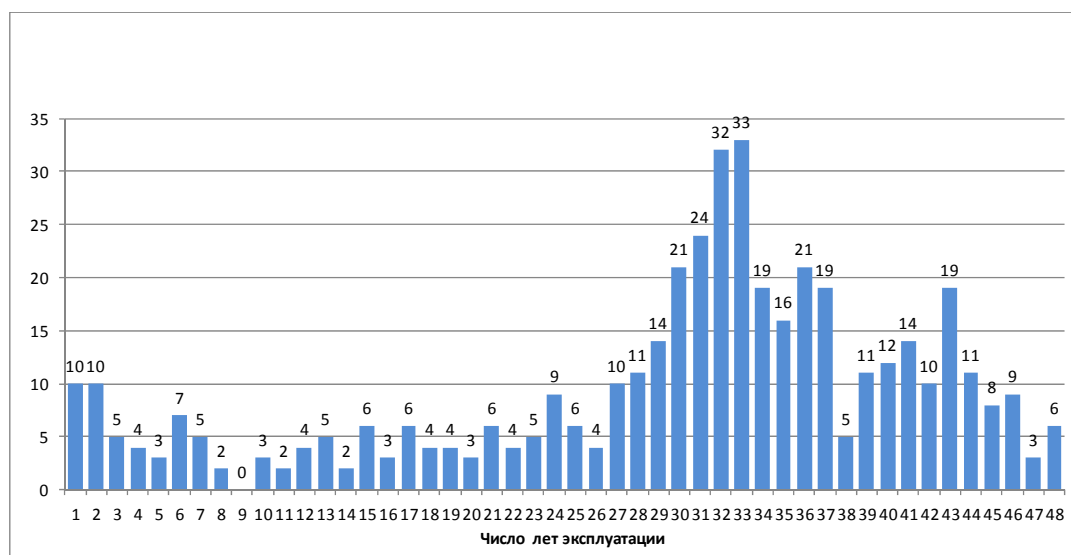


РИС. А-2. Распределение действующих энергетических реакторов по длительности эксплуатации на 31 декабря 2016 года (источник: Информационная система МАГАТЭ по энергетическим реакторам: www.iaea.org/pris).

14. К 2040 году половина всех действующих АЭС в США, вероятно, будет иметь срок эксплуатации 60 лет, если их эксплуатационные лицензии будут продлены КЯР по истечении первоначального проектного срока службы, равного 40 годам. Несколько энергопредприятий рассматривают возможность увеличения срока эксплуатации своих станций еще на 20 лет, что потребует повторного продления лицензий на дополнительный срок. АЭС "Пич-Боттом" компании "Экселон" в Пенсильвании и АЭС "Сарри" компании "Доминион" в штате Вирджиния являются первыми АЭС в США, для которых будут поданы заявки на повторное продление эксплуатационной лицензии на общий срок 80 лет.

15. В Швейцарии политика поэтапного отказа от ядерной энергетики, согласно которой предлагалось установить конституционный предел 45 лет для срока службы АЭС, была отклонена на референдуме, состоявшемся 20 ноября 2016 года. В 2015 году примерно 33% всей электроэнергии в Швейцарии вырабатывалось на АЭС.

А.2. Прогнозы развития ядерной энергетики

16. Ожидается, что в ближайшие годы будет продолжаться расширение ядерной энергетики во всем мире, даже несмотря на то, что темпы роста будут замедляться в краткосрочной перспективе в результате конкуренции, обусловленной низкими ценами на ископаемые виды топлива и применением возобновляемых источников энергии. Согласно прогнозам Агентства, составленным в 2016 году (рис. А-3), если взять за основу установленную мощность в 382,3 ГВт (эл.) общемировые мощности ядерной энергетики при сценарии высокого роста достигнут уровня 598 ГВт (эл.), т. е. прирост составит приблизительно 56%. В случае сценария низкого роста, однако, общемировые ядерно-энергетические мощности в 2030 году вырастут на 1,9% и достигнут 390 ГВт (эл.). Фактический объем новых мощностей, вводимых в ближайшие 14 лет, будет гораздо больше, чем чистое увеличение общемировых ядерно-энергетических мощностей, если учитывать замену многих ядерных энергетических реакторов, подлежащих выводу из эксплуатации. При сценарии низкого роста будет введено около 150 ГВт (эл.) новых мощностей, а в случае сценария высокого роста эта цифра увеличится до 300 ГВт (эл.). Увеличение горизонта прогнозирования до 2050 года дает прирост мощностей ядерной энергетики до 898 ГВт (эл.) при сценарии высокого роста и примерно ту же величину, что и нынешний уровень мощностей, при сценарии низкого роста.

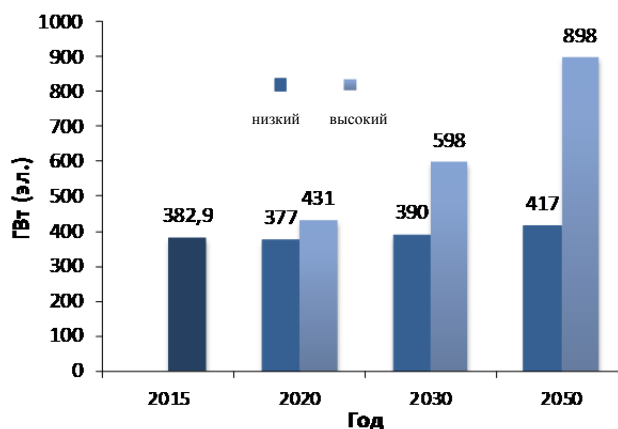


РИС. А-3. Прогнозы роста общемировых мощностей ядерной энергетики (Источник: *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, IAEA Reference Data Series No. 1, 2016*).

17. Эти прогнозы подготавливаются экспертной группой, совещания которой ежегодно организуются Агентством, и составляются путем обобщения оценок по отдельным странам. Эксперты принимают в расчет все действующие реакторы, возможное продление лицензий, запланированные остановки и проекты строительства, которые могут быть реально осуществлены в ближайшие несколько десятилетий. Прогнозы не преследуют цель предугадывать развитие событий и охватывать весь спектр возможных будущих сценариев – от наименее до наиболее правдоподобных. Несмотря на значительную степень неопределенности в этих прогнозах, все сценарии высокого роста, выполненные МАГАТЭ, Международным энергетическим агентством (МЭА) Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) и Всемирной ядерной ассоциацией (ВЯА), указывают на возможный рост общемировых ядерно-энергетических мощностей к 2030 году в диапазоне от 600 до 700 ГВт (эл.) (рис. А-4).

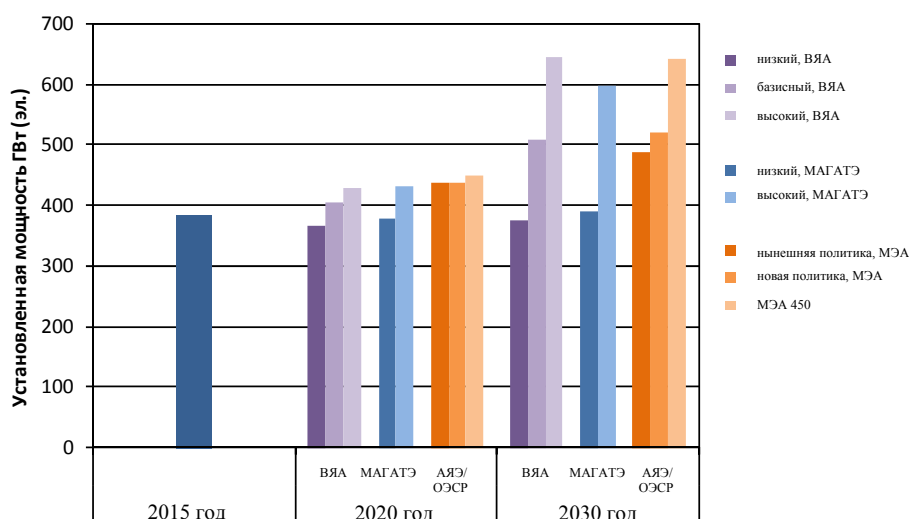


РИС. А-4. Сравнение последнего выполненного МАГАТЭ прогноза роста ядерно-энергетических мощностей со сценариями, подготовленными АЯЭ/ОЭСР в 2016 году, и прогнозами ВЯА (цифры АЯЭ/ОЭСР базируются на полной генерирующей мощности).

18. С вступлением в силу 4 ноября 2016 года Парижского соглашения стороны теперь обязаны подготавливать, сообщать и сохранять последовательные определяемые на национальном уровне вклады, которых они намереваются достичь для удержания прироста глобальной температуры намного ниже 2°C сверх доиндустриальных уровней². Парижское соглашение обеспечивает рамки для постепенного расширения усилий по смягчению воздействия изменения климата, пока не будет достигнута цель 2°C. Это необходимо, так как нынешние национальные планы по смягчению последствий изменения климата в значительной мере не отвечают достижению цели 2°C³.

19. Ядерная энергетика может вносить значительный вклад в достижение цели 2°C, а также в реализацию целей Организации Объединенных Наций в области устойчивого развития⁴ благодаря неоспоримым преимуществам, которыми она обладает: низкие уровни выброса углерода, высокие генерирующие мощности и возможность диспетчерского управления генерацией⁵. Однако для полного использования потенциала ядерной энергетики требуется значительное увеличение ее мощностей, соответствующее прогнозам высокого роста, упомянутым выше (достижение 898 ГВт (эл.) к 2050 году). Освоение этих мощностей является сложной задачей, так как существующие станции нуждаются в модернизации и продлении срока службы для обеспечения бесперебойной эксплуатации, выводимые из эксплуатации АЭС должны заменяться новыми станциями и необходима волна новых проектов строительства для удовлетворения растущих энергетических потребностей развивающихся стран. Инвестиции соответствующего уровня не являются беспрецедентными, однако они, по-видимому, потребуют правительственной поддержки, применения новых контрактных положений для снижения рисков инвесторов и введения цен на углеродные выбросы, способствующих улучшению экономики низкоуглеродных альтернативных технологий, таких, как ядерная энергетика.

20. Инновации были определены в Парижском соглашении как ключевой фактор достижения цели 2°C. Инновационные ядерно-энергетические технологии, включая эволюционные конструкции, реакторы малой и средней мощности/модульные реакторы (PMCM) и усовершенствованные топливные циклы, могут более эффективно способствовать сокращению выбросов парниковых газов и расширению роли ядерной энергии в новых применениях. Например, ядерная энергетика способна еще больше снизить углеродные выбросы путем поставки тепла для промышленных процессов; она также может использоваться для производства опресненной воды для снабжения городов в условиях сухого климата. Вместе с тем необходимы более масштабные инвестиции в научно-исследовательские, опытно-конструкторские и демонстрационные работы.

² Парижское соглашение доступно по адресу: http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php

³ Буклет Агентства "Climate Change and Nuclear Power 2016" ("Изменение климата и ядерная энергетика – 2016") доступен по адресу <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/11090/Climate-Change-and-Nuclear-Power-2016>.

⁴ Более подробная информация о целях Организации Объединенных Наций в области устойчивого развития доступна по адресу <https://sustainabledevelopment.un.org/sdgs>

⁵ Публикация Агентства "Nuclear Power and Sustainable Development" ("Ядерная энергетика и устойчивое развитие") (2016) доступна по адресу <http://www-pub.iaea.org/books/IAEABooks/11084/Nuclear-Power-and-Sustainable-Development>.

А.3. Топливный цикл

А.3.1. Начальная стадия топливного цикла

Ресурсы и производство урана

21. В ноябре 2016 года было выпущено 26-е издание подготавливаемой раз в два года совместной публикации Агентства по ядерной энергии ОЭСР и МАГАТЭ "Уран 2016: ресурсы, производство и спрос", известной также как "Красная книга"⁶. Одним из ключевых выводов этого доклада является то, что выявленных в настоящее время ресурсов, извлекаемых с затратами менее 130 долл./кг U, более чем достаточно для удовлетворения спроса в случае упомянутых ранее сценариев самого высокого роста. Основными проблемами являются инвестиции и экспертные знания, которые потребуются для ввода этих ресурсов в производство. К ним добавляются проблемы, связанные с современным депрессивным урановым рынком. Прогнозируемые производственные мощности, превышающие существующие и запланированные к вводу производственные мощности, достаточны для удовлетворения спроса в случае сценария высокого роста. Существующие и запланированные к вводу производственные мощности достаточны для удовлетворения спроса в случае сценария низкого роста.

22. Столь низких спот-цен на уран не отмечалось с 2004 года. В 2016 году они находились в диапазоне от 75 долл./кг U до 42 долл./кг U. Низкие цены существенно ограничивали возможности компаний по изысканию средств для проведения разведки, технико-экономических исследований и разработки новых проектов по расширению производства.

23. Многие урановые проекты продолжали откладываться или сталкивались с финансовыми трудностями, в то время как проводились тестирование и дополнительные исследования, а некоторые проекты, которые были начаты или вышли на завершающие этапы строительства, были законсервированы. В 2015 году было произведено 60 496 тонн металлического урана (т U), что является самым высоким уровнем за последнее десятилетие и превышает уровень 56 041 т U, достигнутый в 2014 году, и 59 331 т U, достигнутый в 2013 году.

24. Казахстан остается мировым лидером по объему производства урана. Объемы производства, почти целиком связанные с подземным выщелачиванием, стремительно возрастали в период между 2000 и 2012 годами, в то время как в последнее время рост был скромным, причем в 2016 году ожидается производство 24 455 т U и аналогичный уровень предсказывается на 2017 год.

25. Годовой объем производства на руднике Сигар Лейк в Канаде (руднике, где добывается самый высокосортный в мире уран, коммерческое производство которого было начато в мае 2015 года) в настоящее время составляет 5000 т U/год, и, как ожидается, к 2018 году он увеличится до 6900 т U/год. Благодаря продолжающим поступать из бассейна р. Атабаска обнадеживающим результатам разведки урана Канада продолжает сохранять позицию второго по величине в мире производителя урана.

26. В 2016 году продолжался ввод в эксплуатацию недавно сооруженного уранового рудника Хусаб в Намибии, и работы вышли на этап начала производства, причем ожидается, что уровень производства будет постепенно возрастать в течение 24 месяцев до 2018 года. Полная производственная мощность может достигнуть 5770 т U/год, а предположительный срок эксплуатации – свыше 20 лет. В 2016 году в Намибии продолжалась эксплуатация урановых

⁶ Публикация "Уран 2016: ресурсы, производство и спрос" доступна в интернете по адресу: <http://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2016/7301-uranium-2016.pdf>

рудников "Рёссинг" и "Лангер Хайнрих". На некоторых других намибийских урановых месторождениях продолжались маломасштабные технико-экономические исследования.

27. В Австралии продолжалась добыча урана методом подземного выщелачивания на месторождении Фор-Майл, обеспечивающем производство приблизительно 1000 т U/год в режиме работы на полной мощности. В рамках проекта "Рейнджер" эксплуатирующая организация – компания "Энерджи ресорсиз ов оустрейлиа" – продолжала переработку своих запасов руды с целью выполнения торговых обязательств и проводила работы по реабилитации территорий объекта, выведенных из эксплуатации. В 2016 году объем производства составил менее 2500 т U по сравнению с 4000-6000 т U/год в период 1997-2009 годов. Согласно имеющимся договоренностям, добыча и обработка должны быть прекращены к январю 2020 года, и в течение еще пяти лет должна быть завершена реабилитация. Эксплуатирующие организации рудника по добыче меди, урана, золота и серебра на месторождении Олимпик Дам продолжали работу в обычном режиме, проводя в то же время дальнейшие испытания метода кучного выщелачивания на части рудных запасов. Были достигнуты успехи в отношении исследований на нескольких урановых месторождениях в Западной Австралии и одобрения технологических процессов на них, но не было объявлено определенных дат сооружения и открытия рудников.

28. Был достигнут дальнейший прогресс в проведении технико-экономического обоснования и утверждении проекта по добыче редкоземельных элементов, неблагородных металлов и урана на месторождении Кванефьельд в Гренландии, Королевство Дания. В ноябре 2016 года в Копенгагене был проведен восьмой семинар-практикум по оценке минеральных ресурсов, целью которого являлась оценка потенциальных урановых ресурсов этой страны.

29. Китай продолжал деятельность по разведке урана и увеличил расходы на цели развития как на национальном уровне, так и за рубежом. В последнее время сообщалось о значительном увеличении (более чем на 100%) предполагаемых запасов, которое является результатом активизации деятельности по геологоразведке в нескольких бассейнах седиментации на территории этой страны. Расходы на цели развития за рубежом продолжали оставаться значительными (составив более 1,5 млрд долл. в 2014 и 2015 годах), главным образом в связи с разработкой месторождения Хусаб в Намибии.

30. Исторически значительная доля выявленных урановых ресурсов никогда не разрабатывалась по техническим, социальным или политическим причинам. В рамках усилий по повышению безопасности международных и внутренних поставок Аргентина и США осуществляют ряд активных проектов, которые направлены на оценку неразведанных урановых ресурсов. Агентство продолжало сотрудничать с основными активными участниками с целью предоставить другим государствам-членам такие методы оценки посредством учебных семинаров-практикумов и публикаций, включая вышеупомянутый семинар-практикум в Копенгагене.

Конверсия и обогащение

31. Заводы по конверсии, осуществляемой в промышленном масштабе, действуют в Канаде, Китае, Российской Федерации, Соединенном Королевстве, США и Франции. Коммерческие услуги по обогащению предоставляются пятью компаниями: Национальной ядерной корпорацией Китая (Китай), "АРЕВА" (Франция), Государственной корпорацией по атомной энергии "Росатом" (Российская Федерация), "ЮСЭК" (США) и "Уренко" (Европа и США). Небольшие установки по конверсии и обогащению эксплуатируются в Аргентине, Бразилии, Индии, Исламской Республике Иран, Пакистане и Японии.

32. Находящаяся в Великобритании консультационная компания "Эткинс", занимающаяся дизайном, инжинирингом и менеджментом проектов, была выбрана министерством энергетики (МЭ) США, наряду с партнерами по совместному предприятию – компанией "Вестингауз" и корпорацией "Флюор" – для эксплуатации установок по конверсии обедненного гексафторида урана (обедненного UF_6) на газодиффузионном заводе МЭ США в Падуке, шт. Кентукки, и на Портсмутском газодиффузионном заводе в Пайктоне, шт. Огайо. Совместное предприятие, зарегистрированное под названием "Мид-Америка конвершен сервисиз", будет осуществлять эксплуатацию двух установок по конверсии имеющихся у МЭ США инвентарных запасов обедненного UF_6 , составляющих приблизительно 765 000 т и являющихся побочным продуктом процесса обогащения урана, в обедненный оксид урана для возможного повторного использования, хранения или утилизации в будущем.

33. Действующая в США корпорация "Центрус Энерджи" (Centrus Energy Corporation) подписала с компанией "ЮТ-Бателл" (UT-Battelle), управляющей компанией Окриджской национальной лаборатории МЭ США, контракт о дальнейшей работе в области обогащения урана промышленного масштаба с использованием принадлежащей этой компании технологии "Американская центрифуга". В начале 2016 года корпорация "Центрус" успешно завершила трехлетнюю демонстрацию полного 120-машинного каскада усовершенствованных центрифуг на своей установке в Пайктоне, шт. Огайо, в ходе которой были подтверждены долгосрочная работоспособность и надежность машин в реальных условиях эксплуатации. Корпорация "Центрус" продолжает изучать технологические усовершенствования и другие способы развертывания наиболее экономически эффективных промышленных мощностей по обогащению, используя преимущество текущего периода времени, когда рынок не требует расширения производственных мощностей.

Изготовление топлива

34. В январе 2016 года компания "Лайтбридж", занимающаяся разработкой ядерного топлива в США, получила окончательное одобрение регулирующих органов для тестирования вновь разработанного металлического топлива на исследовательском реакторе в Халдене, Норвегия (облучение, как ожидается, начнется в 2017 году). Усовершенствованное металлическое топливо компании "Лайтбридж" изготавливается из циркониево-уранового сплава и отличается уникальным составом и геометрией топливных стержней, которые, как заявляет компания, обеспечивают ему возможность функционирования при более высокой удельной мощности, чем та, которая достигается с используемыми в настоящее время видами оксидного уранового топлива. Впоследствии, в июле 2016 года, компания "Лайтбридж" получила от Европейского патентного ведомства разрешение на ключевой патент, описывающий конструкцию разработанного ею металлического ядерного топливного стержня.

35. В январе 2016 года корпорация "Вестингауз электрик" объявила, что на ее установке по изготовлению ядерного топлива в Спрингфилде, Великобритания, выполнены требования, необходимые для производства топливных сборок, конструктивно пригодных для ММР корпорации "Вестингауз". В феврале 2016 года чешская национальная энергокомпания "ЧЕЗ" (ČEZ) предоставила корпорации "Вестингауз" контракт на поставку первых шести тестовых сборок для своей АЭС "Темелин", состоящей из двух энергоблоков с разработанными в России реакторами ВВЭР-1000.

36. В марте 2016 года Китайская северная ядерная топливная компания (CNNFC), являющаяся дочерней организацией Национальной ядерной корпорации Китая, запустила на своем заводе в Баотоу пилотную линию по производству топливных элементов для китайского высокотемпературного модульного реактора с шаровыми твэлами – демонстрационной энергетической установки с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором в Шидаоване. На заводе в Баотоу был также изготовлен прототип топливной сборки для проекта реактора с

водой под давлением CAP1400, рабочие характеристики которого в настоящее время проверяются. В мае 2016 года CNNFC завершила создание первой линии по производству топлива для реакторов AP1000, через два месяца после того, как Национальное управление по ядерной безопасности Китая выдало разрешение на подачу урана в производственную линию мощностью 400 т U/год. До начала полномасштабного производства CNNFC изготовит два комплекта макетов топливных сборок.

37. В апреле 2016 года корпорация "Вестингауз электрик" объявила о расширении своего завода по производству ядерного топлива в Вестеросе, Швеция. Действующая в США фирма, большая часть которой принадлежит японской компании "Тосиба", пояснила, что данное расширение было осуществлено в связи с растущей необходимостью диверсификации поставок ядерного топлива для реакторов ВВЭР-1000 в Европе.

38. В мае 2016 года компания "Глобал нуклеар фьюэл – америкас" (GNF-A) заключила с российской Топливной компанией "ТВЭЛ" (дочерним предприятием Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом") соглашение о производстве в США топлива "ТВС-Квадрат" для реакторов с водой под давлением (PWR) корпорации "Вестингауз". Компания GNF-A, которая является частью консорциума, будет управлять осуществлением этого проекта в США, уделяя основное внимание лицензированию и обеспечению качества, а также предоставлению инженерно-технических услуг, в то время как компания "ТВЭЛ" будет предоставлять экспертные ресурсы в области проектирования и техническую поддержку и займется изготовлением первых партий топливных сборок для опытных программ производства. В декабре 2016 года "ТВЭЛ" также подписала контракт со шведским энергопредприятием "Ваттенфол", став третьей после "АРЕВА" и "Вестингауз" компанией, поставляющей топливо для энергоблоков 3 и 4 АЭС "Рингхальс".

39. В июне 2016 года компания "Индустриас нуклеарес ду Бразил" подписала с аргентинской государственной компанией КОНУАР контракт на экспорт обогащенного урана. Данное соглашение предусматривает экспорт четырех тонн порошкообразного диоксида урана для использования при первой загрузке топлива в аргентинский модульный реактор CAREM.

40. В июне 2016 года на Машиностроительном заводе (МСЗ) – филиале компании "ТВЭЛ", находящемся в г. Электросталь, Российская Федерация, – были завершены приемочные испытания топливных таблеток для реактора АЭС "Сайзуэлл-Б" в Великобритании - АЭС с единственным энергоблоком с реактором PWR, обеспечивающей покрытие 3% суммарного спроса на электроэнергию в Великобритании. На МСЗ были также завершены приемочные испытания компонентов экспериментальных топливных сборок ЭТВС-14 и ЭТВС-15, использующих высокоплотное смешанное нитридное уран-плутониевое топливо (монтаж которых будет производиться на Сибирском химическом комбинате) и предназначенных для опытной эксплуатации в энергоблоке с быстрым реактором БН-600 на Белоярской АЭС и в будущем реакторе Брест-ОД-300 со свинцовым теплоносителем.

41. Также в июне 2016 года в третий энергоблок Балаковской АЭС в России во время планового отключения были загружены три экспериментальных топливных сборки с РЕМИКС-топливом («регенерированным смешанным топливом»). РЕМИКС-топливо производится из неразделенной смеси урана и плутония (производимой путем переработки отработавшего топлива), легированной небольшим количеством обогащенного урана. Каждая экспериментальная топливная сборка наряду со стандартными урановыми топливными стержнями содержит шесть топливных стержней с РЕМИКС-топливом. РЕМИКС-топливо останется в энергоблоке Балаково-3 в течение по крайней мере двух топливных циклов (около трех лет), а затем облученные сборки будут отправлены для проведения исследований после облучения. Технология РЕМИКС-топлива поможет Российской Федерации обеспечить замкнутый ядерный топливный цикл и свести к минимуму объем образующихся радиоактивных отходов.

42. В июне 2016 года Высокий суд г. Фукуока в Японии поддержал вынесенное в марте 2015 года постановление суда префектуры Сага, согласно которому смешанное оксидное (МОКС) топливо можно использовать на третьем энергоблоке (отключенном от энергосети с 2010 года) АЭС "Генкай" компании "Кюсю электрик пауэр", возможность повторного запуска которого рассматривалась Управлением по ядерному регулированию. Компания "Сикоку электрик пауэр" в сентябре 2016 года возобновила промышленную эксплуатацию энергоблока 3 АЭС "Иката" с частичным использованием МОХ-топлива.

43. В октябре 2016 года компания "Лайтбридж" и французская компания "АРЕВА НП" подписали соглашение о действующем в США совместном предприятии с равным участием по разработке, производству и коммерциализации топливных сборок для большинства типов легководных реакторов, включая PWR, кипящие реакторы, РМСМ и исследовательские реакторы.

44. Также в июле 2016 года на Новосибирском заводе химических концентратов, входящем в состав компании "ТВЭЛ", было начато производство нового поколения ядерного топлива ТВС-2М для третьего энергоблока Тяньваньской АЭС в Китае, который находится на стадии строительства и планируется к вводу в эксплуатацию в 2018 году. Это топливо, обеспечивающее более высокую глубину выгорания, допускает более длительные периоды эксплуатации между двумя остановами для перегрузки топлива.

45. В августе 2016 года украинская Национальная атомная энергогенерирующая компания "Энергоатом" подписала контракт с Европейской компанией по обогащению урана "УРЕНКО". Согласно этому контракту, компания «УРЕНКО» будет поставлять на завод по изготовлению топлива компании "Вестингауз" в Вестеросе, Швеция, обогащенный уран с целью производства ядерного топлива для "Энергоатома".

46. 30 августа 2016 года японская компания "Кансай электрик пауэр" объявила, что компания "АРЕВА" начала изготовление на своем заводе "Мелокс" во Франции 16 топливных сборок с МОКС-топливом для 4-го энергоблока АЭС "Такахама".

47. В сентябре 2016 года Ульбинский металлургический завод (УМЗ), дочернее предприятие национальной компании по производству урана в Казахстане "Казатомпром", и Компания урановых ресурсов CGNPC, дочернее предприятие Китайской генеральной ядерно-энергетической корпорации (CGNPC), подписали соглашение о создании завода по производству топливных сборок мощностью 200 тонн в год на основе существующего завода НАК с целью поставки топливных таблеток для китайских ядерных энергетических реакторов.

48. Заметным событием в области технологии топлива тяжеловодных реакторов с водой под давлением является недавнее успешное завершение Национальной комиссией по атомной энергии Аргентины 1500-часовых испытаний на долговечность на контуре высокого давления с целью проверки новой конструкции топлива для АЭС "Атуча-2" с измененными дистанционирующими решетками. Основными целями новой конструкции являются упрощение процесса производства топлива и снижение его стоимости.

А.3.2. Обеспечение гарантированных поставок

49. В декабре 2010 года Совет управляющих Агентства принял резолюцию GOV/2010/70, в которой он одобрил создание Банка низкообогащенного урана (НОУ) МАГАТЭ в соответствии с положениями документа GOV/2010/67. В июне 2015 года Совет управляющих одобрил соглашение с принимающим государством относительно Банка НОУ МАГАТЭ между Агентством и Казахстаном, а в декабре 2015 года Агентство и Казахстан завершили работу над

основной правовой базой для создания на площадке УМЗ в Усть-Каменогорске Банка НОУ МАГАТЭ. Впоследствии Агентство и Казахстан успешно осуществляли данный проект.

50. В январе 2016 года Казахстан ввел в действие закон "Об использовании атомной энергии". После принятия этого нового закона было начато обновление регулирующей основы, в рамках которого уже введен в действие ряд регулирующих положений и правил, а некоторые из них находятся на заключительной стадии экспертизы. В результате ТЭО был сделан вывод, что более экономичным является не обновление существующего объекта, а строительство нового хранилища для Банка НОУ МАГАТЭ, и это позволит предусмотреть упрощенные и надежные механизмы обеспечения физической безопасности, а также включение в его проект усовершенствованных функций безопасности. В марте 2016 года группа экспертов Агентства посетила УМЗ с целью оценки хода работ, связанных с проектированием нового хранилища и пришла к выводу, что в проекте предусмотрены надлежащие меры по обеспечению ядерной безопасности и физической ядерной безопасности. Строительство нового хранилища началось летом 2016 года, и эксперты Казахстана рассчитывают, что это хранилище будет введено в эксплуатацию и готово к приему НОУ во второй половине 2017 года. Агентством в настоящее время начата деятельность по подготовке к приобретению НОУ, который будет храниться в Банке НОУ МАГАТЭ. Проводится окончательная доработка программы обращения с цилиндрами, которая обеспечит долгосрочную безопасность и физическую безопасность цилиндров на месте, а также во время их последующей перевозки без необходимости периодической перекомпрессии НОУ из цилиндров.

51. Другие имеющиеся механизмы обеспечения гарантированных поставок изложены в "Обзоре ядерных технологий – 2012" (документ GC(56)/INF/3).

А.3.3. Конечная стадия топливного цикла

Обращение с отработавшим топливом

52. Длительность хранения зачастую превышает первоначально лицензированный срок службы хранилищ или даже их проектный срок службы. Важность управления старением стала приоритетной проблемой в последние годы как следствие большой длительности графиков работ, необходимых для разработки усовершенствованных решений по рециклированию или создания установок для окончательного захоронения. Именно такова ситуация в государствах, где были развернуты системы сухого хранения, рассчитанные на относительно короткий срок использования.

53. Для обеспечения постоянной безопасности разрабатываются руководящие материалы по управлению старением и вспомогательные проекты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР), особенно в Германии и США. Например, КЯР разрабатывала "Managing Aging Processes in Storage (MAPS) Report" ("Доклад об управлении процессами старения при хранении (УПСХ)", выпущенный для комментариев в сентябре 2016 года в помощь независимым операторам хранилищ топлива при продлении срока действия лицензии. С целью разработки технической основы и методологии руководящих материалов, предназначенных для государств-членов, в октябре 2016 года Агентством также начато осуществление проекта координированных исследований по программам управления старением для систем сухого хранения отработавшего топлива.

54. К концу 2016 года, согласно оценкам, объемы отработавшего ядерного топлива, находящегося на хранении, достигли примерно 273 000 тонн тяжелого металла (тТМ), при этом

темпы его накопления составляют около 7000 тТМ/год⁷. В течение 2016 года были введены в эксплуатацию еще пять вне реакторных хранилищ отработавшего топлива. Все эти пять хранилищ – сухого типа, и в них используется технология бетонных контейнеров. Они расположены в ИгнаLINE (Литва), Пало Верде (Мексика), Сайзуэлле (Великобритания), Уоттсбаре (США) и Саммере (США). Распределение по континентам 151 вне реакторного хранилища, действующего в 27 странах, представлено на рисунке А-5. США, где в настоящее время имеется 70 сухих хранилищ, содержащих около 36% общего инвентарного количества отработавшего топлива в этой стране, продолжают на ежегодной основе вводить в эксплуатацию новые сухие хранилища. Согласно текущим прогнозам, к 2020 году в США будет насчитываться 74 независимых сухих хранилища отработавшего топлива.

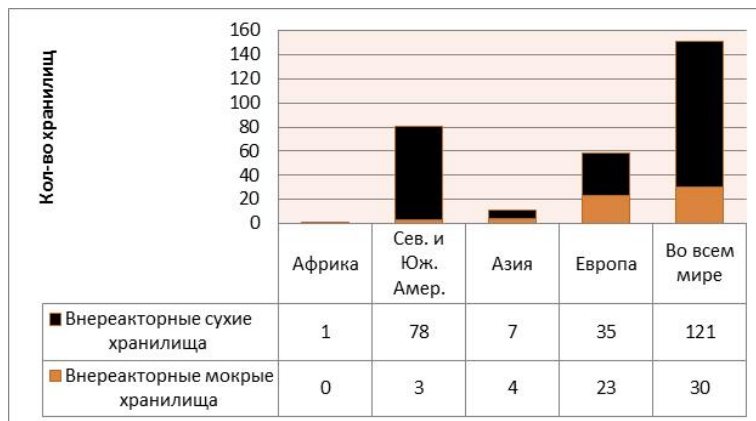


РИС. А-5. Распределение по континентам вне реакторных хранилищ отработавшего топлива

55. В силу различных причин имели место задержки в создании новых вне реакторных хранилищ в Японии, Испании и Украине. В настоящее время ожидается, что один из этих проектов, вне реакторное хранилище Муцу в Японии, начнет функционировать в 2019 году.

56. В 2016 году на АЭС "Уилфа" в Соединенном Королевстве началась подготовка к выгрузке топлива после того, как 30 декабря 2015 года был остановлен последний действовавший реактор. Начиная с 1970-х годов на АЭС "Уилфа" имеются старейшие действующие сухие хранилища отработавшего топлива энергетических реакторов. Цель заключается в выгрузке топлива из активных зон реакторов и связанных с ними сухих хранилищ до конца 2018 года. Министерство по вопросам бизнеса, энергетики и промышленной стратегии Соединенного Королевства приступило к реализации новой британской программы ядерных исследований и инновационной деятельности. Первоначальный этап этой программы, финансируемый в размере 20 млн ф.ст. (25 млн долл.) в период с 2016 года по 2018 год, охватывает пять основных тем: усовершенствованные виды топлива, материалы и производство, проектирование реакторов, усовершенствованное рециклирование и стратегический инструментарий. Это отражает более широкие обязательства правительства Соединенного Королевства по удвоению расходов на энергетические инновации, которые, как ожидается, достигнут к 2021 году более 40 млн ф.ст. (50 млн долл.) в год.

57. В Российской Федерации разработана новая программа по обращению с отработавшим ядерным топливом на период 2016-2018 годов и до 2020 года, заменяющая предыдущую программу, которая завершена. Она охватывает перевозку отработавшего ядерного топлива из российских АЭС либо на завод по переработке топлива ПО "Маяк" в Озерске, либо в централизованное промежуточное хранилище Горно-химического комбината (ГХК) в

⁷ Ежегодный объем выгружаемого на всех АЭС в мире отработавшего топлива составляет около 10 000 тТМ.

Железногорске для последующей переработки. На территории ГХК имеются бассейны с водой, которые могут быть использованы в будущем для хранения отработавшего ядерного топлива из реакторов ВВЭР-1000 Балаковской, Калининской, Нововоронежской и Ростовской АЭС, а также быстрого реактора БН-600 Белоярской АЭС. На территории ГХК располагается также, начиная с 2012 года, централизованное сухое промежуточное хранилище, позволяющее хранить до 8129 тонн российского отработавшего ядерного топлива из реакторов РБМК-1000 Ленинградской, Курской и Смоленской АЭС. Завод по переработке топлива ПО "Маяк" увеличил производственную мощность по переработке на 35%. В 2016 году на него впервые стало поступать отработавшее ядерное топливо из реактора РБМК-1000 Ленинградской АЭС. Была также начата переработка отработавшего уран-циркониевого топлива, использовавшегося в советских и российских ледоколах и десятилетиями накапливавшегося в хранилищах.

58. В Литве рядом с остановленной Игналинской АЭС сооружено промежуточное хранилище отработавшего ядерного топлива для хранения отработавшего ядерного топлива, выгружаемого из 1-го и 2-го энергоблоков этой станции. Хранилище вмещает около 190 железобетонных контейнеров, обеспечивающих хранение около 17 000 топливных сборок, которые будут храниться в течение 50 лет. Завершив холодные испытания в декабре 2016 года, объект находится на продвинутой стадии ввода в эксплуатацию.

59. Финансовые трудности и вопросы отвода земельных участков в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС являются основными факторами, которые привели к отсрочке до конца 2018 года осуществления проекта строительства в Украине централизованного хранилища отработавшего топлива.

60. Предварительная работа по выбору площадки для нового завода по переработке ядерного топлива в Ляньюньган в провинции Цзянсу, Китай, была приостановлена из-за проблем, связанных с позицией общественности. Тем не менее от планов строительства не отказываются, поскольку в качестве возможных мест осуществления данного проекта рассматриваются пять других провинций Китая.

А.3.4. Вывод из эксплуатации, восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами

Снятие с эксплуатации ядерных установок

61. Во всем мире были окончательно остановлены либо выводятся из эксплуатации 158 ядерных энергетических реакторов; 17 из них уже окончательно выведены из эксплуатации. Были окончательно остановлены либо выводятся из эксплуатации более 150 установок топливного цикла; 127 из них уже окончательно выведены из эксплуатации. Кроме того, более 180 исследовательских реакторов были окончательно остановлены или находятся на стадии вывода из эксплуатации. Полностью выведены из эксплуатации свыше 300 исследовательских реакторов и критических сборок.

62. В течение 2016 года на АЭС "Дандженесс-А" в Соединенном Королевстве были внедрены инновационные подходы, такие как использование водолазов для очистки бывших бассейнов выдержки. Оказывается постоянная поддержка посредством дальнейшего проведения НИОКР, главным образом в странах, давно осуществляющих ядерно-энергетические программы, таких как Бельгия, Испания, Российская Федерация, Соединенное Королевство, США, Франция и Япония. Недавним примером является инициатива RACE ("Remote Applications in Challenging Environments" ("Дистанционные применения в сложных условиях")) в Великобритании, которая официально стартовала в мае 2016 года.

63. Вывод из эксплуатации АЭС после аварии является специфической и сложной проблемой, с которой в настоящее время приходится иметь дело ряду стран. В Японии был достигнут заметный прогресс в подготовке к выводу из эксплуатации АЭС "Фукусима-дайти" (дополнительная информация приведена ниже во вставке). Еще одним примером послеаварийных мероприятий является завершение, после нескольких лет, строительных работ и при поддержке со стороны международных доноров, сооружения нового безопасного конфайнмента над 4-м энергоблоком Чернобыльской АЭС в Украине.



РИС. А-6. Новый безопасный конфайнмент над 4-м энергоблоком Чернобыльской АЭС (слева, вид со строительной площадки, справа, вид со стороны 3-го энергоблока). Высота сооружения – 108 метров, длина – 162 метра, ширина – 257 метров, вес – примерно 36 000 тонн. (Фото: Чернобыльская АЭС).

64. Осуществление проектов вывода из эксплуатации также продолжается в Болгарии, Литве и Словакии, где АЭС были окончательно остановлены еще до окончания их проектного срока службы, при этом финансовая поддержка обеспечивается через Европейский банк реконструкции и развития.



РИС. А-7. Работы по демонтажу в турбинных залах энергоблоков 1 (слева) и 2 (справа) Игналинской АЭС в Литве (Фото: Игналинская АЭС).

Ход работ по выводу из эксплуатации атомной электростанции "Фукусима-дайити"

На четырех из шести реакторов на АЭС "Фукусима-дайити" произошли повреждение активной зоны и/или водородные взрывы. Вывод из эксплуатации этих реакторов является беспрецедентным проектом, который проводится в рамках среднесрочной и долгосрочной дорожной карты⁸ и технического стратегического плана⁹, которые были приняты японскими властями. На параллельном мероприятии 60-й очередной сессии Генеральной конференции Агентства в сентябре 2016 года представители Японии отметили достигнутый прогресс и представили планы решения, при содействии международного сообщества, таких проблем, как извлечение обломков топлива.

Одной из основных проблем является загрязненная вода, которая образуется в результате проникновения грунтовых вод в реакторные здания и смешивания их с охлаждающей жидкостью, используемой для охлаждения обломков топлива. Загрязненная вода очищается с помощью системы удаления нуклидов. В рамках усилий, направленных на то, чтобы не допустить поступления воды к загрязненным источникам, были смонтированы морозильные трубы с целью создания непроницаемых стенок со стороны суши, блокирующих проникновение подземных вод, и в марте 2016 года было начато частичное замораживание этих стенок. Для предотвращения утечек загрязненной воды в октябре 2015 года были закрыты непроницаемые стенки со стороны моря.

1535 топливных сборок, которые хранились в бассейне 4-го энергоблока, были полностью удалены в 2014 году. В качестве подготовки к удалению топливных сборок из 1-го энергоблока (392 топливные сборки), 2-го энергоблока (615 топливных сборок) и 3-го энергоблока (566 топливных сборок) были начаты работы по дезактивации и экранированию рабочих этажей с целью дополнительного снижения доз облучения.

При обследовании состояния внутренних узлов первичных гермооболочек (ПГО) реакторных блоков использовались мюонная томография и робототехника. В результате инспектирования с помощью робота внутренних узлов ПГО 1-го энергоблока было установлено отсутствие серьезных повреждений такого оборудования, как циркуляционные насосы первого контура, а также наличие отложений на значительных участках днища сухого бокса. Анализ результатов исследования методом мюонной томографии, проведенного на 2-м энергоблоке, позволил обнаружить на днище корпуса реактора теневое изображение вещества высокой плотности, которое может представлять собой обломки топлива.

⁸ С докладом "Mid-and-Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station" ("Среднесрочная и долгосрочная дорожная карта вывода из эксплуатации атомной электростанции "Фукусима-дайити" компании ТЭПКО"), выпущенным 12 июня 2015 года межминистерским советом по вопросам загрязненной воды и вывода из эксплуатации, можно ознакомиться в интернете по адресу http://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/pdf/20150725_01b.pdf.

⁹ С резюме документа "Technical Strategic Plan 2016 for Decommissioning of the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc." ("Технический стратегический план 2016 года по выводу из эксплуатации атомной электростанции "Фукусима-дайити" компании "Токио электрик пауэр компани холдингс"), выпущенным 13 июля 2016 года Корпорацией по содействию компенсации ядерного ущерба и выводу из эксплуатации, можно ознакомиться в интернете по адресу http://www.dd.ndf.go.jp/en/strategic-plan/book/20160926_SP2016esum.pdf.

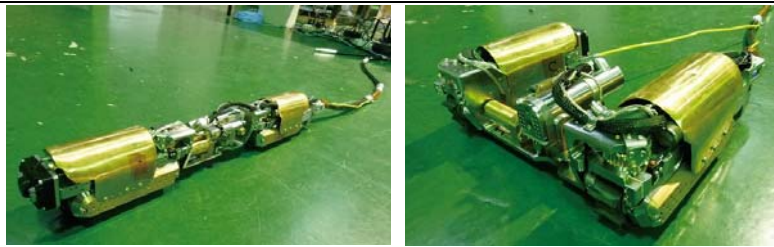


РИС. А-8. Изменяющий форму робот, используемый для проверки состояния внутренних узлов ПГО 1-го энергоблока (Фотографии: Международный научно-исследовательский институт по выводу из эксплуатации ядерных установок, Япония).

С целью улучшения обстановки на площадке проводятся интенсивные работы по дезактивации. В ситуации, когда дополнительная эффективная доза внутри границ площадки составляет менее 1 мЗв/год, на приблизительно 90% территории площадки более нет необходимости использовать полнолицевые маски или защитную одежду.

Корпорацией по содействию компенсации ядерного ущерба и выводу из эксплуатации был учрежден Совет по партнерским связям в области НИОКР по проблемам вывода из эксплуатации с целью активизации НИОКР путем содействия сотрудничеству с соответствующими учреждениями. Японским агентством по атомной энергии (ЯААЭ) была создана новая действующая в Японии глобальная организация по вопросам НИОКР под названием "Лаборатории по сотрудничеству в области научных вопросов вывода из эксплуатации". Кроме того, ЯААЭ открыла в Нарахе Центр по развитию дистанционных технологий, где будут проводиться разработка и проверочные испытания оборудования с дистанционным управлением, такого как роботы и связанные с ним технологические процессы. ЯААЭ также приступило к строительству Аналитического и исследовательского центра компании "Окума".

Обращение с изъятыми из употребления закрытыми радиоактивными источниками

65. Продолжались исследования вариантов обращения с изъятыми из употребления закрытыми радиоактивными источниками (ИЗРИ) по окончании срока их службы, включая их захоронение совместно с другими отходами в соответствующих хранилищах. Увеличилось число вариантов рециклирования и возвращения в страну происхождения. В ряде стран, включая Гану, Малайзию и Филиппины, находятся на различных стадиях разработки проекты скважинного захоронения.

66. В 2016 году был осуществлен ряд успешных операций по удалению ИЗРИ из помещений пользователей и постановке их под контроль в надлежащих условиях хранения. Из Ливана и Туниса были успешно возвращены в страну происхождения ИЗРИ категории 1 французского производства (в каждом конкретном случае один источник), а еще два источника были возвращены в страну происхождения из Камеруна. Один ИЗРИ категории 1 был изъят из головки блока телерапии в Уганде и перемещен в надежное и безопасное хранилище. Два ИЗРИ категории 1 были изъяты из больницы и помещены в надежное и безопасное хранилище в Иордании. В ряде государств-членов были начаты работы по изъятию источников категории 1 и 2, в том числе в Албании, Буркина-Фасо, Ливане и бывшей югославской Республике Македонии, причем, как ожидается, эти работы будут завершены в 2017 году.

67. Достигнут значительный прогресс в интеграции мобильных горячих камер в различные проекты скважинного захоронения с целью сведения к минимуму манипуляций с источниками

и исключения ненужных транспортных операций. Кроме того, был разработан мобильный инструментарий для облегчения операций по кондиционированию ИЗРИ категорий 3-5 и содействия подготовке к скважинному захоронению.

68. Во Вьетнаме, Индонезии, Малайзии, Непале, Филиппинах и Таиланде были завершены работы по кондиционированию ИЗРИ, а местный персонал в этих странах прошел соответствующую подготовку.

69. Агентство расширило доступ более широкой группы пользователей в государствах-членах к Международному каталогу закрытых радиоактивных источников и устройств, что облегчает идентификацию обнаруживаемых на местах ИЗРИ. В 2016 году была начата работа по внесению в каталог дополнительных сведений об источниках и устройствах с целью дальнейшего повышения его полезности.

70. В октябре 2016 года была начата операция по удалению высокоактивного ИЗРИ в Бразилии, которую планируется завершить в феврале 2017 году. В соответствии с соглашением о трехстороннем сотрудничестве между Бразилией, Канадой и США более 80 ИЗРИ категорий 1 и 2, произведенных в Канаде и США, будут подвергнуты обработке и отправлены за границу. Группа источников первой категории будет отправлена компании "Гамма-сервис рисайклинг" в Лейпциге, Германия, для вторичной переработки, а остальные будут возвращены в США. Эти работы будут выполняться прошедшими подготовку группами из Южноафриканской ядерно-энергетической корпорации.

Обращение с радиоактивными отходами перед захоронением

71. В Аргентине начаты работы по запуску в Атомном центре "Эсейса" установки по цементации и уплотнению низкоактивных отходов, поступающих из Национальной комиссии по атомной энергии (в основном в связи с эксплуатацией исследовательских реакторов, производством радиоизотопов и исследовательской деятельностью) и из других внешних источников отходов (в результате использования при изготовлении топлива и в медицинских, промышленных и исследовательских применениях).

72. Управлением по радиационной и ядерной безопасности Финляндии была выдана лицензия на полномасштабную эксплуатацию установки по отверждению отходов на АЭС "Ловийса". На этой установке будет производиться обработка имеющихся и будущих жидких отходов низкого и среднего уровня активности (включая ионообменные смолы и шламы), образующихся в процессе эксплуатации станции. Данная установка является хорошим примером того, как комплексное планирование обращения с отходами приводит к созданию единой установки, предназначенной для эффективного обращения с отходами, являющимися наследием прошлого, отходами, образующимися в ходе эксплуатации в настоящее время и будущими инвентарными количествами отходов.

73. Минимизация отходов является одной из ключевых целей на АЭС "Фукусима-дайти", где ежедневно образуются большие количества предметов, представляющих собой твердые отходы, такие как защитная одежда (перчатки, защитные костюмы) и эксплуатационные отходы (бумага, пластик, ветошь, дерево). В связи с этим компания "Токио электрик пауэр" недавно ввела в эксплуатацию установку по сжиганию различных твердых отходов, состоящую из двух технологических линий по обработке производительностью по 300 кг отходов в час. Получаемая в результате зола составляет лишь малую часть первоначального объема и будет храниться в бочках на площадке в ожидании захоронения.

74. Австралия завершила проектирование полномасштабного комплексного завода по переработке отходов, поступающих с имеющейся установки по производству молибдена-99, с использованием технологии "Синрок". В 2017 году планируется начать строительство. В ходе

технологического процесса "Синрок" происходит иммобилизация жидких радиоактивных отходов и фиксация их в прочной матрице из «синтетической горной породы» с целью захоронения.

75. На заводе в Селлафилде в Соединенном Королевстве введена в эксплуатацию установка по остекловыванию отходов в контейнерах (ООК). Остекловывание является устоявшейся технологией иммобилизации жидкостей и шлама и превращения их в прочную стеклообразную форму отходов, пригодную для захоронения. Система ООК "Геомелт" предназначена для обработки небольших объемов проблемных отходов, для которых в настоящее время не существует метода захоронения.

76. В марте 2016 года компания "Селлафилд лимитид" (Соединенное Королевство) объявила, что она переместила все находящиеся в емкостях оставшиеся от прошлого запасы ядерного топлива из бассейна для хранения реакторного топлива в современное здание хранилища. Это позволило на 70% снизить уровни радиоактивности в 68-летнем бассейне для хранения отработавшего топлива и значительно уменьшить риски для людей и окружающей среды.

Захоронение радиоактивных отходов

77. В всем мире эксплуатируются установки для захоронения радиоактивных отходов всех категорий, за исключением высокоактивных отходов и/или отработавшего топлива (заявленного в качестве отходов). В их число входят пункты траншейного захоронения очень низкоактивных отходов (например, в Испании, США, Франции и Швеции) или низкоактивных отходов (НАО) в засушливых районах (например, в США, Южной Африке); приповерхностные инженерные сооружения для НАО (например, в Венгрии, Китае, Индии, Испании, Польше, Словакии, Соединенном Королевстве, Франции, Чешской Республике, Японии); и инженерные сооружения для низко- и среднеактивных отходов (НСАО), находящиеся в геологических формациях на различных глубинах (например, в Венгрии, Германии, Норвегии, Республике Корея, США, Финляндии, Чешской Республике).

78. Другие пункты захоронения НСАО находятся на различных стадиях лицензирования или строительства, например, в Бельгии (Дессель), Болгарии (Радана), Германии (Конрад), Исламской Республике Иран (Талмеси), Канаде (Кинкардин), Литве (Стабатишкес), Румынии (Салиньи) и Словении (Врбина).

79. Варианты захоронения отходов радиоактивных материалов природного происхождения зависят от национальных правил и варьируются от пунктов траншейного захоронения до подповерхностных инженерных сооружений, таких как в Норвегии.

80. В Австралии правительство штата Южная Австралия получило от своей Королевской комиссии по ядерному топливному циклу доклад и объявило, что оно будет выполнять девять из двенадцати содержащихся в нем рекомендаций. Они включают в себя проведение дальнейшего исследования с целью оценки возможности создания в Южной Австралии пунктов хранения и захоронения отработавшего ядерного топлива и среднеактивных отходов.

81. Государственное предприятие по обращению с радиоактивными отходами Болгарии получило лицензию и приступило к строительству приповерхностного могильника для НАО на площадке "Радана" вблизи АЭС "Козлодуй".

82. В Канаде федеральное правительство должно в конце 2017 года принять решение о проведении экологической экспертизы разработанного компанией "Онтарио пауэр дженерейшн" проекта строительства пункта глубинного геологического захоронения НСАО на площадке Брюс в Кинкардине, Онтарио. Кроме того, была начата экологическая экспертиза предложения Ядерных лабораторий Канады о создании пункта приповерхностного захоронения радиоактивных отходов низкой активности и прочих подходящих для этого отходов на площадке Чок-Ривер.

83. В Китае после принятия решения о строительстве подземной исследовательской установки (ПИУ) в массиве кристаллических пород горного района Бейшан продолжалась разработка программы захоронения в глубоких геологических формациях. В рамках программы были проведены исследования площадки и произведен итерационный выбор площадки во вмещающей осадочной формации.

84. Правительство Эстонии в марте 2016 года приняло решение о том, что будущая установка для захоронения отходов в стране будет расположена на одной площадке с имеющимся центральным хранилищем в бывшем учебном центре подводного флота в Палдиски.

85. В Финляндии в декабре 2016 года начались работы по сооружению первого в мире пункта геологического захоронения отработавшего ядерного топлива в Олкилуото.

86. По запросу Французского управления по ядерной безопасности в ноябре 2016 года Агентством была проведена независимая экспертиза вариантов обеспечения безопасности в рамках проекта геологического захоронения высокоактивных отходов "Сижео".

87. Правительство Германии получило от своей национальной комиссии по хранению высокоактивных отходов доклад, в котором рекомендуется приступить к процессу выбора национальной площадки для глубинного геологического хранилища. В нем изложены подробные рекомендации относительно того, какие имеющие отношение к безопасности критерии исключения и критерии для сравнительных оценок следует рассматривать и какие процессы участия заинтересованных сторон должны быть организованы с целью достижения широкого признания общественностью решений о выборе площадки. Кроме того, правительство получило доклад об оценке затрат и финансирования национальных обязательств в отношении конечной стадии, включая захоронение радиоактивных отходов.

88. В Исламской Республике Иран продолжается строительство пункта приповерхностного захоронения на площадке "Талмеси", куда поступили первые контейнеры с отходами для хранения на площадке в ожидании начала операций по захоронению.

89. В Республике Корея разработана национальная политика в области обращения с высокоактивными отходами, основанная на рекомендациях ее Комиссии по регулированию общественного участия в деятельности по обращению с отработавшим ядерным топливом. В ней представлен график разработки программы геологического захоронения, включая выбор площадки для подземной исследовательской лаборатории и строительство и эксплуатацию установки для геологического захоронения. Второй этап создания пункта захоронения НСАО на площадке «Волсонг», который предусматривает строительство камер приповерхностного хранилища камерного типа, в настоящее время рассматривается с целью выдачи лицензии.

90. Российская Федерация успешно осуществляет свою стратегию создания на территории страны сети приповерхностных хранилищ. Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами получил две лицензии на приповерхностное захоронение на существующем ядерном объекте в Уральском регионе, причем поданы еще две заявки на выдачу лицензий на захоронение на двух других существующих ядерных объектах. Также проводится оценка заявки на лицензию для ПИУ, являющейся первой частью запланированного будущего пункта глубокого геологического захоронения недалеко от Красноярска.

91. В июне 2016 года Шведское управление по радиационной безопасности одобрило заявку на выдачу лицензии для глубокого геологического хранилища отработавшего топлива, и в 2017 году, как ожидается, состоится еще одно основное слушание по данному вопросу. Процесс лицензирования расширения хранилища для короткоживущих НСАО, известного как хранилище для окончательного захоронения короткоживущих радиоактивных отходов, все еще продолжается.

92. Швейцария успешно осуществляет вторую стадию процесса выбора площадки для глубокого геологического хранилища. Он предусматривает активное взаимодействие с "региональными конференциями" заинтересованных сторон из регионов, в которых расположены выбираемые площадки, завершение кампании по 3D-сейсмической характеристике площадок и получение лицензий на бурение для программы определения характеристик площадки на основе данных бурения. Сравнительные оценки основаны на 13 критериях и 49 показателях, как это предусмотрено национальным компетентным органом по безопасности.

93. В июле 2016 года компетентный орган по планированию в Камбрии, Соединенное Королевство, одобрил строительство двух новых камер в хранилище низкоактивных отходов Соединенного Королевства, наряду с его расширением путем строительства третьей камеры. Это гарантирует будущее данной установки, расположенной возле селения Дригг, до 2050 года. Строительные работы планируется начать в 2017 году.

А.4. Безопасность

94. На атомных электростанциях всего мира продолжалось совершенствование и улучшение систем безопасности. Эти работы включали в себя выявление и учет уроков аварии на АЭС "Фукусима-дайти", повышение эффективности глубокоэшелонированной защиты, укрепление потенциала аварийной готовности и реагирования, поддержание и активизацию работ по наращиванию потенциала и защиту населения и окружающей среды от ионизирующих излучений.

95. Агентством были определены приоритетные задачи в области ядерной безопасности, решение которых способствует укреплению глобальной системы ядерной безопасности. Эти приоритетные задачи в области ядерной безопасности связаны с широким диапазоном видов деятельности Агентства в сферах ядерной безопасности, радиационной безопасности, безопасности перевозки и безопасности отходов. Агентством опубликованы пересмотренные Требования безопасности в рамках Серии норм безопасности МАГАТЭ с целью учета уроков аварии на АЭС "Фукусима-дайти". Эти публикации включают пять изданий категории "Требования безопасности", предназначенные для применения на АЭС, которые были изданы как целенаправленные пересмотренные издания "в качестве поправок". Кроме того, были выпущены полностью пересмотренные варианты двух других документов категории "Требования безопасности", касающихся административного и практического руководства в целях обеспечения безопасности, а также безопасности исследовательских реакторов. Были продолжены рассмотрение и пересмотр соответствующих руководств по безопасности¹⁰.

96. Анализ данных Международной информационной системы по опыту эксплуатации атомных электростанций позволил выявить ряд текущих проблем, включая слабые места в проектах станций или эксплуатационной практике во время некоторых внешних опасных ситуаций, а также во внедрении модификаций на станциях. Эти данные также показывают, что проблемой по-прежнему является недостаточный контроль работы подрядчиков и что увеличивается количество инцидентов, связанных с ухудшением характеристик компонентов вследствие старения.

¹⁰ Подробные сведения приведены в документе МАГАТЭ «Обзор ядерной безопасности - 2017» (GOV/2017/3).

97. Программы долгосрочной эксплуатации (ДЭ) и управления старением внедряются на все большем числе АЭС во всем мире. По состоянию на конец 2016 года 46% из 450 эксплуатируемых во всем мире ядерных энергетических реакторов находились в эксплуатации в течение 30-40 лет и еще 15% – более 40 лет.

98. Международная группа по ядерной безопасности (ИНСАГ) отметила, что современные проекты реакторов разрабатываются с целью уменьшения рисков возникновения внутренних событий до весьма низких уровней. Преобладающим источником риска могут являться внешние события, что оправдывает постоянное уделение внимания этой проблеме в предстоящие годы. Эксперты, принимавшие участие в технических совещаниях Агентства, по-прежнему выражали заинтересованность в использовании уроков аварии на АЭС "Фукусима-дайити" применительно к: а) учету неопределенностей, связанных с оценкой экстремальных опасностей; б) необходимости использования при оценке внешних опасностей данных, относящихся как к недавним, так и к давним событиям в прошлом; в) учету сочетаний внешних опасностей; г) учету воздействия внешних опасностей на многоблочные площадки; и е) использованию вероятностных подходов к анализу внешних событий.

99. Уровень эксплуатационной безопасности АЭС по-прежнему высок, о чем свидетельствуют показатели безопасности, информацию о которых собирают Агентство и Всемирная ассоциация организаций, эксплуатирующих атомные электростанции. На рис. А-9 показано количество внеплановых или аварийных остановов реакторов в автоматическом и ручном режимах на каждые 7000 часов (приблизительно один год) эксплуатации энергоблока. Число аварийных остановов является лишь одним из ряда возможных показателей безопасности, но обычно этот показатель используется в качестве индикатора успеха в плане повышении уровня безопасности станции посредством снижения числа нежелательных и незапланированных теплогидравлических и связанных с изменением реактивности переходных процессов, требующих аварийных остановов реактора.

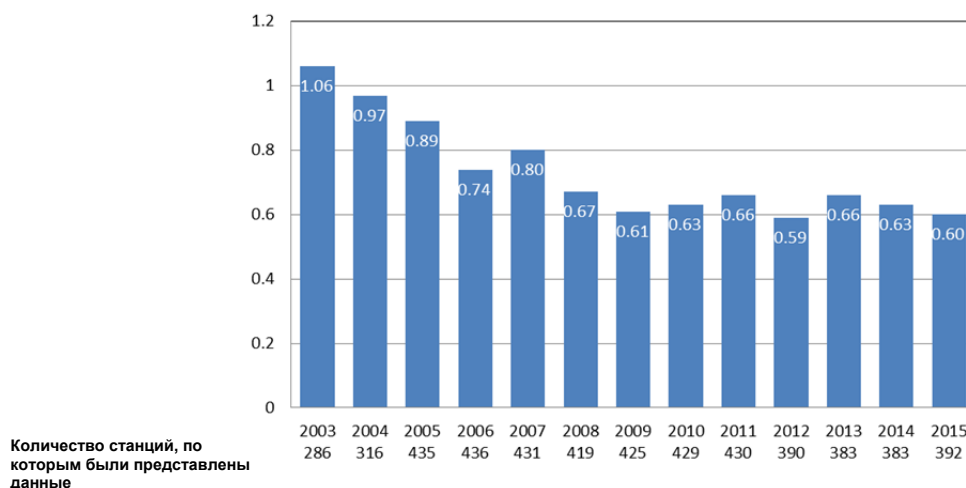


РИС. А-9. Средняя частота аварийных остановов: число остановов в автоматическом и в ручном режиме на 7000 часов работы энергоблока (Источник: Информационная система МАГАТЭ по энергетическим реакторам: www.iaea.org/pris).

100. В ряде государств-членов дозы облучения населения в результате медицинского использования излучения превышают естественный радиационный фон и дозы, получаемые от других источников антропогенного происхождения. По мере расширения мирного использования радиационных технологий число государств-членов, в которых возникает такая ситуация, как ожидается, будет возрастать. Индивидуальное медицинское облучение можно

существенно уменьшить (в некоторых районах на 20-50%) путем более тщательного выбора лечебных процедур и применения эффективных мер радиационной защиты. Апробированные подходы к оптимизации радиационной защиты пациентов при диагностической визуализации реализуются во всем мире лишь частично, и для их более широкого и надлежащего использования в целях повышения качества и безопасности необходимы постоянные усилия.

101. Комплексные радиотерапевтические технологии и процедуры все чаще внедряются в регионах, где они ранее не применялись, в связи с чем возникает необходимость принятия надлежащих мер безопасности. Хотя эксперты в массе своей считают лучевую терапию эффективным видом лечения, признается также, что необходимо продолжить совершенствование мер безопасности.

В. Атомные и ядерные данные

102. Совместная международная организация библиотек оцененных данных (СМОБОД), работа которой координируется Агентством по ядерной энергии ОЭСР (ОЭСР/АЯЭ), стимулирует прогресс в оценках сечений захвата нейтронов нуклидами, особенно актуальными с точки зрения ядерных технологий: изотопами кислорода, железа, урана и плутония. Преимущества осуществляемой СМОБОД координации усилий экспертов в области ядерной науки во всем мире привели к повышению точности крупномасштабного моделирования ядерной критичности и переноса нейтронов. Оценки СМОБОД рассматриваются в качестве кандидатов для включения во всемирные библиотеки ядерных данных, такие как библиотека файлов оцененных ядерных данных ENDF/B-VIII (США), японская библиотека оцененных нейтронных данных, объединенная библиотека оцененных ядерных и термоядерных данных (ОЭСР/АЯЭ), китайская библиотека оцененных ядерных данных и библиотека оцененных ядерных данных на базе кода TALYS (Европейская комиссия/МАГАТЭ).

103. Международная сеть оценщиков данных о строении и распаде ядра (NSDD) является всемирной инициативой по сотрудничеству в области сбора и оценки данных о базовой структуре и параметрах распада нуклидов. Использование базы данных NSDD учеными-ядерщиками недавно получило значительный импульс после ее сопряжения с такими современными коммуникационными технологиями, как веб-сайт "LiveChart of Nuclides" в Агентстве и приложение "Isotope Browser", запущенное Агентством в 2013 году. Это бесплатное приложение для операционных систем Android и iOS обеспечивает поиск информации по нуклидам на мобильном устройстве и уже было загружено около 40 000 раз.

104. База данных EXFOR («экспериментальные данные по ядерным реакциям») теперь содержит более чем 22 000 наборов экспериментальных данных о ядерных реакциях с 1935 года по настоящее время. Эта уникальная база данных лежит в основе ядерных данных библиотек, которые используются для всех ядерных технологий, прежде всего в областях анализа АЭС, проблем топливного цикла, инновационных проектов реакторов, термоядерного синтеза и производства медицинских изотопов. С целью постоянного обновления базы данных сформированы новые совместные партнерские связи, особенно в Китае и Индии.

105. Инновационный подход к анализу радиационных повреждений с использованием ядерных данных позволяет в настоящее время объединить физические явления, характеризующиеся совершенно разными масштабами величин. Благодаря возможностям современных

компьютеров теперь можно оценивать функции отклика на повреждение – такие как стандарты NRT¹¹- и arc-("athermal recombination-corrected" ("с коррекцией на атермическую рекомбинацию")) смещений на атом (dpa (с/а)) и замещений на атом, а также керма (кинетическая энергия, выделившаяся в веществе) и газовыделение – на более научной основе, включая количественное выражение неопределенностей. Эти события будут иметь последствия для экранирования реакторов деления и синтеза, а также ускорителей.

106. Отмечается заметный рост деятельности и числа публикаций в области производства медицинских изотопов с использованием ускорителей и связанного с этим использования библиотек данных по ядерным реакциям под действием заряженных частиц для разработки наиболее оптимальных способов производства таких медицинских изотопов.

107. Пересчет неопределенностей основных ядерных и атомных данных применительно к крупномасштабным ядерным устройствам расширяется теперь с традиционной области критичности на другие аспекты безопасной и надежной ядерной деятельности. К важным областям исследований, в которых в настоящее время учитываются оценки неопределенности, относятся оценка радиационных повреждений в реакторах ядерного деления и синтеза, использование атомных и молекулярных данных для моделирования с учетом возбужденных состояний атомов водорода и гелия в термоядерной плазме и получения данных об эрозии и удержании трития в бериллиевых материалах, соприкасающихся с плазмой.

108. В сентябре 2016 года Объединенный исследовательский центр (ОИЦ) Европейской Комиссии, ОЭСР/АЯЭ и МАГАТЭ совместно провели в Брюгге (Бельгия) Международную конференцию по ядерным данным для науки и техники, в работе которой приняли участие около 450 экспертов. Были представлены последние разработки в области технологии ядерных данных, такие как экспериментальные возможности в Институте образцовых материалов и измерений ОИЦ в Гееле, Бельгия и более систематические подходы к получению ядерных данных с помощью кода TALYS.

109. Были получены улучшенные ядерные данные для индуцированных альфа-частицами реакций на фторе, которые имеют важное значение при анализе для целей гарантий.

110. Китай наращивает усилия по оценке ядерных данных для реактора на солевых расплавах (MSR). Различные виды экспериментальной деятельности и деятельности по моделированию, координируемые Китайским центром ядерных данных в Пекине, в настоящее время ориентированы на получение данных, связанных с MSR и оказывающих влияние на безопасность и экономику.

111. Европейская Комиссия осуществляет инвестирование в широкомасштабное получение ядерных данных в рамках проекта ЧАНДА ("решение проблем в области ядерных данных"), причем лаборатории, университеты и исследовательские лаборатории почти из всех стран Европейского союза сотрудничают в области получения ядерных данных. Основное внимание уделяется минимизации радиоактивных отходов и системам на быстрых нейтронах. Разработка новых библиотек ядерных данных приведет к высокому качеству вычислительного анализа усовершенствованных реакторных систем.

¹¹ Стандарт NRT-dpa является мерой повреждения в материале, предложенный Норгеттом, Робинсоном и Торренсом в 1975 году.

С. Применения ускорителей и исследовательских реакторов

С.1. Ускорители

112. Ускорители частиц были разработаны с целью решения фундаментальных вопросов, возникающих у ученых, исследующих внутреннюю структуру и свойства атомного ядра и физические законы, определяющие взаимодействие излучения с веществом. Сегодня применение во всем мире десятков тысяч ускорителей в промышленности, медицине, охране окружающей среды и фундаментальных исследованиях, включая субатомную физику и астрофизику, приносит пользу миллионам людей в их повседневной жизни. Для удовлетворения постоянно растущего спроса на применение ускорителей в передовых научных исследованиях и поддержания и расширения широкого спектра применений, приносящих значительные социально экономические выгоды, жизненно важно и далее улучшать и двигать вперед технологии ускорителей. Технологические инновации приводят к тому, что ускорители приближаются к пределам с точки зрения энергии, типов и размеров пучков ускоренных частиц. Еще одна задача заключается в уменьшении размеров и стоимости ускорителей для промышленных и медицинских применений.

С.1.1. Новые методы накачки-зондирования, разработанные для локального исследования радиационных повреждений

113. Наше понимание воздействия радиации улучшается благодаря экспериментам и моделированию. Захватывающим новым событием является быстрое возникновение методов накачки-зондирования, когда короткие, интенсивные ионные импульсы (получаемые на индукционных ускорителях, таких как NDCX-II в Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли или лазерно-плазменные ускорители) могут вызывать изменения структурной динамики в материалах, которые могут затем быть локально отслежены с помощью быстродействующих структурных зондов, например, методом дифракции ультра-быстрых электронов или с использованием интенсивных рентгеновских импульсов. Эти новые методы позволяют локально исследовать ионные радиационные эффекты. Это улучшает наше понимание фундаментальных вопросов и может ускорить разработку новых материалов с улучшенными характеристиками и радиационной стойкостью в условиях высокой радиационной нагрузки.



РИС. С-1. Ускоритель NDCX-II¹² в Национальной лаборатории им. Лоуренса в Беркли, США, позволяет исследовать структурную динамику в материалах. На фотографии показан 10-метровый ускоритель, блок мишени которого находится на переднем плане (Фото: Лаборатория в Беркли)

¹² Для получения более подробной информации см. P.A. Seidl, et al., Nucl. Inst. Methods A800 (2015) 98–103.

С.1.2. Новые биосовместимые радиационные дозиметры, использующие сфокусированные ионные пучки

114. Характеристики радиационных дозиметров, изготовленных из синтетических алмазов, имеют ряд преимуществ по сравнению с более традиционными устройствами, включая радиационную стойкость и биосовместимость, особенно при использовании в протонной терапии. Сфокусированные ионные пучки с широким диапазоном энергии протонов 5-250 МэВ используются для оценки пригодности устройств на монокристаллах алмаза в качестве точных дозиметров. Высокоэнергетические пучки соответствуют клинической практике, а низкоэнергетические пучки, используемые в системе сканирующего ядерного микроскопа, позволяют детально измерять отклик устройства и таким образом проводить оценку новых конструкций детекторов. Изображения, полученные с использованием метода измерения заряда, индуцированного ионным пучком (IBIC) при энергии микропучка 5,5 МэВ, позволяют детально измерять отклик устройства наряду с эффективностью сбора заряда, которая может достигать 100%.

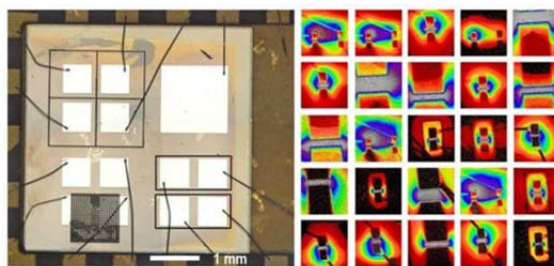


РИС. С-2. Изображения показывают матрицу прототипов дозиметров, изготовленных из синтетического алмаза, пригодного для использования в устройствах, и подборку карт радиационного отклика различных конструкций, измеренного методом IBIC с использованием облучения ионами He^+ с энергией 5,5 МэВ. (Фото: Проф. Д. Джэмисон, Мельбурнский университет; д-р Дж. Дэвис, Университет Уоллонгонга; и д-р Д. Прокопович, АНСТО)

С.1.3. Рассеяние нейтронов с использованием ускорителей

115. Благодаря развитию протонных ускорителей в течение последнего десятилетия, усредненный по времени поток нейтронов от источников нейтронов скалывания, таких как Источник нейтронов скалывания в США и будущий европейский источник нейтронов скалывания в Швеции, превысил самые высокие потоки, получаемые в реакторных пучках. Беспрецедентная яркость этих источников в сочетании с проникающей способностью нейтронов и их сильным рассеянием на водороде и при воздействии магнитных моментов обещает достижения в сферах энергии и магнитных материалов, биологических наук, археологии, геологии и конструкционных материалов.

116. Для использования в таких применениях нейтроны необходимо замедлять, и традиционно для этого применяли громоздкие криогенные замедлители, на выходе которых в направлении экспериментальных установок испускалась лишь малая доля нейтронов. Поэтому основное внимание уделяется новому поколению материалов и конструкций замедлителей. Путем выбора одного из спиновых изомеров водорода – параводорода – могут быть построены жидкие холодные замедлители в форме стержней или дисков. Такие конструкции уменьшают поглощение нейтронов, и спектрометры могут быть размещены вокруг источника более эффективно. Аналогичным образом, твердый метан является весьма эффективным холодным замедлителем, но он чувствителен к радиационному повреждению. Поэтому в настоящее время изучаются новые твердые материалы и конструкции замедлителей. Требуется точное знание

сечений захвата нейтронов для материалов-кандидатов, и необходимые измерения проводятся на многих научно-исследовательских ускорителях, в том числе в Аргентине, США, Южной Африке и Японии. В качестве еще одного способа борьбы с радиационным повреждением в настоящее время разрабатываются, например, в Российской Федерации, прототипные конструкции, в которых гранулы из этих новых материалов можно вдвигать в камеру, а затем удалять и регенерировать.



РИС. С-3. Площадка европейского источника нейтронов скалывания в Лунде, Швеция, по состоянию на октябрь 2016 года. Этот самый мощный в мире источник нейтронов, работающий в тандеме с импульсным линейным ускорителем протонов с энергией 2 ГэВ, обеспечивающим среднюю мощность пучка 5 МВт, запланирован к запуску в 2019 году (Источник: https://dam.esss.lu.se/asset-bank/images/assets/33/40_2S5D41851.jpg).

С.2. Исследовательские реакторы

117. В таблице С-1 приведены некоторые применения исследовательских реакторов. Их мощность может варьироваться от нуля (например, в случае критической или подкритической сборки) до приблизительно 200 МВт (тепл.). В отличие от энергетических реакторов, исследовательские реакторы обладают гораздо большим разнообразием конструкций и могут работать в различных режимах – стационарных или импульсных.

118. Согласно базе данных Агентства по исследовательским реакторам, по состоянию на 31 декабря 2016 года в 70 странах построено 774 исследовательских реактора, из которых 249 находятся в эксплуатации в 56 странах. Наибольшее количество работающих или временно остановленных исследовательских реакторов находится в Российской Федерации (55), затем следуют США (42), Китай (17) и Япония (14). Во многих развивающихся странах также имеются действующие исследовательские реакторы, в том числе 10 установок в Африке. В мировом парке исследовательских реакторов 64 установки работают на мощности свыше 5 МВт, создавая нейтронные потоки большой интенсивности для применений в связи с различными продуктами и услугами.

Таблица С-1. Распространенные виды применений исследовательских реакторов во всем мире¹³.

Тип применения ^a	Число соответствующих исследовательских реакторов ^b	Число государств-членов, в которых находятся используемые установки
Обучение/подготовка кадров	165	51
Нейтронно-активационный анализ	118	51
Производство радионуклидов	87	43
Нейтронная радиография	69	37
Облучение материалов/топлива	68	27
Нейтронное рассеяние	45	30
Геохронология	27	23
Трансмутация (легирование кремния)	24	16
Трансмутация (драгоценные камни)	17	10
Нейтронная терапия, в основном НИОКР	16	11
Прочие применения ^c	120	36

^a Более подробно эти применения описаны в недавней публикации Агентства "Applications of Research Reactors" ("Применение исследовательских реакторов") (IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-5.3, Vienna, 2014).

^b Из 249 рассмотренных исследовательских реакторов (230 в эксплуатации, 19 временно остановлены), по состоянию на 31 декабря 2016 года.

^c К другим применениям относятся калибровка и тестирование контрольно-измерительных приборов, эксперименты с биологической защитой, измерения ядерных данных и посещения и семинары по линии связей с общественностью.

119. Многие действующие исследовательские реакторы все еще имеют относительно низкий коэффициент использования, и возраст половины из них превышает 40 лет. Большинство этих реакторов требует постоянного внимания в сферах стратегического планирования, управления старением, модернизации и реконструкции. Продолжают наращиваться усилия по повышению эффективности использования и получению дополнительных доходов. За последние три года эксплуатирующими организациями 41 исследовательской реакторной установки были подготовлены и представлены на рассмотрение Агентства стратегические планы¹⁴.

120. В рамках международного сотрудничества продолжают работы по пропагандированию и расширению использования исследовательских реакторов в целях создания потенциала в ядерной области, в том числе, наряду с другими областями, в областях образования и подготовки кадров. Одним из примеров является проект реакторной интернет-лаборатории (РИЛ), реализация которого была начата в 2015 году и который осуществлялся на реакторах в

¹³ На основе сведений в базе данных по исследовательским реакторам Агентства: <http://nucleus.iaea.org/RRDB/>.

¹⁴ Агентство пересмотрело свой руководящий документ от 2001 года, озаглавленный "Strategic planning for research reactors: Guidance for reactor managers" (IAEA-TECDOC-1212) ("Стратегическое планирование для исследовательских реакторов: руководящие материалы для менеджеров реакторов" (МАГАТЭ-TECDOC-1212)), включив в него аспекты, связанные с новыми исследовательскими реакторами или крупными проектами реконструкции и сведения об опыте эффективно эксплуатируемых установок, подкрепленные многочисленными примерами. Пересмотренный вариант этого документа планируется к публикации в 2017 году в качестве выпуска в Серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии № NG-T-3.16.

Латинской Америке и Карибском бассейне и Европе. Целью данного проекта является обеспечение связи через интернет между университетами и исследовательскими институтами, где эксплуатируются исследовательские реакторы задействованные в области образования и профессиональной подготовки. В 2016 году продолжалось осуществление проекта РИЛ, причем было проведено шесть прямых трансляций в Латинской Америке и Карибском бассейне (сеансы связи с реактором RA-6 НКАЭ в Аргентине в качестве базовой установки с передачей данных организациям-получателям в Колумбии, на Кубе и в Эквадоре) и пять прямых трансляций в Европе и Африке (сеансы связи с реактором ISIS Комиссариата по атомной энергии и альтернативным источникам энергии Франции (КАЭ) с передачей данных организациям-получателям в Беларуси, Литве, Объединенной Республике Танзании и Тунисе). Еще одним примером является механизм ИСЕРР (международные центры передового опыта на базе исследовательских реакторов), которому Агентство оказывает содействие и целью которого является поощрение сотрудничества между государствами-членами в целях создания потенциала в ядерной области и активизации НИОКР. После назначения первого ИСЕРР в 2015 году – а именно КАЭ, представленного его исследовательскими центрами в Саклэ и Кадараше – Научно-исследовательский институт атомных реакторов в Димитровграде, Российская Федерация, был назначен в качестве ИСЕРР в 2016 году, а бельгийский центр ядерных исследований (Мол, Бельгия) стал кандидатом на такое назначение.



РИС. С-4. Слева: Во время совещания Агентства по координации регионального проекта технического сотрудничества RAF/I/005 в Комиссию по атомной энергии Танзании ведется прямая трансляция демонстрационного эксперимента на исследовательском реакторе ISIS КАЭ в Саклэ (Франция) (Фото: МАГАТЭ) Справа: Прямая трансляция из лаборатории реактора НКАЭ RA-6 в Барилоче, Аргентина (Фото: Национальная комиссия по атомной энергии НКАЭ).

121. В ряде стран сооружаются новые исследовательские реакторы, которые станут основными национальными установками, способствующими развитию инфраструктуры и программ в области ядерной науки и технологий, включая ядерную энергетику. Продолжается сооружение новых исследовательских реакторов в Аргентине, Бразилии, Индии, Республике Корея, Российской Федерации, Саудовской Аравии и Франции. Несколько государств-членов, в том числе Беларусь, Бельгия, Вьетнам, многонациональное государство Боливия, Нидерланды и США, имеют официальные планы строительства новых исследовательских реакторов. Вопрос о строительстве таких установок рассматривают и другие страны, такие, как Азербайджан, Бангладеш, Гана, Кения, Кувейт, Ливан, Малайзия, Монголия, Мьянма, Нигерия, Объединенная Республика Танзания, Сенегал, Судан, Таджикистан, Таиланд, Тунис, Филиппины, Эфиопия и Южная Африка¹⁵. В 2016 году были успешно завершены

¹⁵ Публикация Агентства "Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project" ("Специфические особенности и основные этапы проектов исследовательских реакторов") (Серия изданий

пусконаладочные работы на Иорданском исследовательском и учебном реакторе – многоцелевом исследовательском реакторе мощностью 5 МВт (тепл.), расположенном в кампусе Иорданского научно-технологического университета.

122. Развитию международного сотрудничества и расширению круга пользователей исследовательских реакторов и заинтересованных в их эксплуатации сторон способствует создание при содействии Агентства¹⁶ региональных сетей и объединений по использованию исследовательских реакторов. В 2016 году две организации, эксплуатирующие исследовательские реакторы – Австралийская организация по ядерной науке и технике (АНСТО) и Делфтский реакторный институт в Нидерландах – были назначены в качестве центров сотрудничества МАГАТЭ в сферах различных аналитических методов для материаловедческих исследований, экологических исследований и промышленных применений и нейтронно-активационных и связанных с нейтронными пучками методологий для исследовательских реакторов, соответственно.

123. К концу 2016 года 97 исследовательских реакторов были переведены на НОУ топливо или подтверждены как официально остановленные, в том числе одна установка для производства молибдена-99, в которой использовался ВОУ. Важными достижениями в 2016 году явились перевод на НОУ топливо китайского прототипа миниатюрного реактора-источника нейтронов (МРИН), который достиг критичности в марте, и реактора ВВР-К в Казахстане, который достиг критичности в апреле, а также удаление всего ВОУ из быстрой критической сборки в Японии. Агентство вместе с Китаем, США и другими заинтересованными странами продолжает поддерживать проводимые в Гане работы по конверсии и удалению работающей на ВОУ активной зоны МРИН, завершение которых ожидается в 2017 году. Были начаты работы в поддержку конверсии нигерийского МРИН.

124. Деятельность, связанная со сведением к минимуму используемого ВОУ, включает возврат ВОУ топлива исследовательских реакторов в страну происхождения, где оно было подвергнуто обогащению. К концу 2016 года в рамках программы возврата произведенного в США ВОУ топлива было завершено удаление почти 1300 кг свежего и отработавшего ВОУ топлива исследовательского реактора. В рамках программы возврата ВОУ топлива российского производства за этот же период времени было удалено 2228 кг свежего и отработавшего ВОУ топлива исследовательского реактора. В сентябре 2016 года Польша, США, Российская Федерация и Агентство возвратили в Российскую Федерацию из исследовательского реактора "Мария" в Отвоцк-Сверке, Польша, последние оставшиеся 61 кг ВОУ материалов российского производства.

125. Для конверсии высокопоточных и высокоэффективных исследовательских реакторов требуется усовершенствованное уран-молибденовое топливо. Несмотря на достигнутый в этой области значительный прогресс, для обеспечения коммерческой доступности сертифицированного НОУ топлива необходимы дальнейшая работа в области его испытаний под облучением, послереакторных исследований и методов его изготовления.

МАГАТЭ по ядерной энергии № NP-T-5.1) и ряд вспомогательных документов призваны помочь государствам-членам в этой области.

¹⁶ Агентство оказывает поддержку ряду объединений по использованию исследовательских реакторов в странах Балтии, Карибского бассейна, Центральной Африки, Центральной Азии, Восточной Европы, Средиземноморья и Содружества Независимых Государств и Глобальной сети исследовательских реакторов TRIGA. В последнем случае Агентство недавно выпустило документ "History, Development and Future of TRIGA Research Reactors" ("История, развитие и будущее исследовательских реакторов TRIGA") (Серия технических докладов № 482, МАГАТЭ, Вена, 2016).

126. Хотя в 2016 году серьезного дефицита молибдена-99 не было, эксплуатационные проблемы на перерабатывающих установках сохраняются. Отключения некоторых важных для всего мира установок в 2016 году не привели к какому-либо дефициту. Бельгийский реактор BR2 – одна из главных облучательных установок по производству молибдена-99 – 19 июля 2016 года возобновил работу после девятимесячного останова на расширенное техническое обслуживание и модернизацию. 31 октября 2016 года производство молибдена-99 на национальном универсальном исследовательском реакторе Канады было прекращено, но он продолжает работу в режиме "горячего резерва" в качестве резервной производственной мощности на маловероятный случай общемирового дефицита в период с 1 ноября 2016 года по 31 марта 2018 года. Другие крупные производители увеличили производство с целью компенсации этой потери.

127. Продолжается перевод процессов производства медицинских изотопов с ВОУ на НОУ, при этом основными поставщиками молибдена-99, произведенного на основе НОУ, остаются АНСТО (Австралия) и компания "НТП радиоизотопс" (Южная Африка). В 2016 году АНСТО достигла значительного прогресса на своей новой производственной установке, строительство которой, как ожидается, будет завершено в начале 2017 года. Компания "НТП радиоизотопс" продолжает перевод своих технологических процессов на исключительное использование НОУ. Два других крупных производителя - Институт радиоэлементов в Бельгии и компания "Маллинкродт" в Нидерландах – успешно продолжали работу по переводу своих промышленных производственных процессов с ВОУ на НОУ.

Д. Продовольствие и сельское хозяйство

Д.1. Использование ядерных и смежных методов для контроля аутентичности пищевых продуктов

128. Основными проблемами для пищевой промышленности и потребителей являются качество и безопасность продуктов питания. Повторяющиеся кризисы, связанные с аутентичностью и безопасностью пищевых продуктов, могут представлять угрозу для общественного здоровья и спровоцировать потерю доверия общественности к стабильности качества продуктов питания. Глобализация торговли продовольствием усилила необходимость эффективных систем контроля пищевых продуктов с целью защиты потребителей от загрязненных и фальсифицированных продуктов питания. Преступления, связанные с пищевыми продуктами – умышленная ложная маркировка или фальсификация продовольственных товаров на организованной основе и в больших масштабах с целью получения финансовой выгоды – стали основной преступной деятельностью, которая может приводить к значительным экономическим потерям и дискредитировать целые экономические секторы, создавая препятствия международной торговле. Хотя причиной фальсификации пищевых продуктов является финансовая выгода, зачастую существует также риск для безопасности продуктов питания, так как в отношении фальсифицированного или контрафактного продукта не применяются такие же меры контроля, как в случае подлинного продукта, а его ингредиенты могут быть неизвестны. К примерам этого относятся добавление меламина в молочный порошок с целью увеличения показателя содержания белка, что привело к многим тысячам заболеваний и нескольким смертям младенцев ввиду токсичности меламина; фальсификация высококачественного оливкового масла холодного отжима путем добавления более дешевых масел, таких как арахисовое масло, которые не указываются на этикетке и могут стать причиной серьезных аллергических реакций; и даже контрафактный рис, изготовленный из картофельного крахмала и промышленных синтетических смол.

D.1.1. Аналитические методы

129. Необходимость применения аналитических методов в поддержку механизмов аутентификации и отслеживаемости происхождения пищевых продуктов стремительно возрастает и может усилиться в будущем по мере роста сложности цепочек поставок продовольствия и достижений в области обработки и технологии пищевых продуктов. Ядерные методы обеспечивают ключевые атрибуты, необходимые для проверки подлинности продуктов питания.

130. Измерение соотношений встречающихся в природе стабильных изотопов биоэлементов (водорода, углерода, азота, кислорода и серы) в продуктах питания зачастую может предоставлять информацию об их географическом происхождении или методе производства путем сопоставления с соотношениями изотопов, присутствующих в окружающей среде или в производственном процессе. Стабильные изотопы тяжелых элементов (например, стронция) могут также предоставлять информацию, касающуюся геологии района происхождения, и эта «сигнатура» передается через почвы растениям и животным. Поскольку стабильные изотопы являются внутренними характеристиками атомов в пищевых продуктах, их распределение и соотношения трудно подделывать в мошеннических целях.

131. Профили содержания элементов в продуктах питания предоставляют важную информацию о безопасности в отношении концентрации потенциально токсичных элементов и могут быть источником информации, которая связывает пищевой продукт с местом его производства. Многоэлементный состав тканей животных до некоторой степени отражает состав растительности, которой они питаются. Например, щелочные металлы, особенно рубидий и цезий, которые легко могут стать подвижными в почве и легко переносятся в растения, являются хорошими индикаторами принадлежности к определенному географическому региону.

132. Метаболический фингерпринтинг – анализ метаболитов, являющихся результатом клеточных и молекулярных процессов в организме – также используется для проверки подлинности. Метаболомика может быть либо целенаправленной, то есть сфокусированной на группах соответствующих метаболитов с целью предоставления прямой функциональной информации для моделирования, либо нецеленаправленной, с целью обнаружения структур в метаболоме, которые могут выявлять различия между наборами проб, и может использоваться для построения моделей для классификации неизвестных проб. Примером является спин-генерированное определение профилей фингепринтов с использованием спектроскопии протонного ядерного магнитного резонанса (ЯМР) с целью отбраковочной проверки фруктовых соков и вин.

133. Эти методы в сочетании с другими, такими как колебательная спектроскопия, анализ ДНК и микробный фингерпринтинг, оказываются неоценимыми для проверки подлинности продуктов питания.

134. Для успешного применения таких методов требуются исследование их применения в отношении различных продовольственных товаров, разработка обширных баз данных результатов измерений подлинных продуктов питания и надежный статистический анализ и моделирование.

Доступные методы тестирования подлинности

135. Новейшие разработки в области аналитических приборов делают необходимые аналитические методы более доступными. Некоторые приборы, которые ранее использовались только в лабораториях, стали выпускаться в более доступном настольном, портативном или переносном исполнении, что позволяет использовать их для скрининга. Например, недавно

появились относительно доступные настольные ЯМР-спектрометры, которые могут проводить скрининг-анализ, ранее осуществлявшийся на дорогих ЯМР-спектрометрах с высокой напряженностью поля, которые требуют специализированной инфраструктуры и целенаправленно подготовленного персонала. Подобным же образом теперь коммерчески доступны и находят применение в тестировании продуктов питания переносные рентгенофлуоресцентные и ближние инфракрасные спектрометры. К другим методам, реализуемым в настольных или портативных приборах и потенциально пригодным для применения при тестировании подлинности, относятся спектрометрия подвижности ионов, в которой используется источник ионизации на основе никеля-63 и которая в последнее время стала широко применяться для скрининга на наличие взрывчатых веществ и наркотиков в аэропортах, а также измерение изотопного соотношения методом молекулярной изотопной спектрометрии с лазерной абляцией.

136. Экономическая эффективность и доступность современных методов означает, что они могут использоваться заинтересованными сторонами в пищевой промышленности, регулирующими органами и потребителями для скрининга пищевых продуктов в нескольких точках пищевой цепочки, что позволило бы существенно повысить эффективность систем контроля. В случае необходимости подозрительные продукты затем могут быть протестированы с использованием высококачественных подтверждающих методов в эталонной лаборатории с целью получения более подробной информации для последующих исследований.

D.2. Нейтронный зонд космического излучения: новый метод мониторинга влажности почвы в масштабах района

137. На нужды сельского хозяйства расходуется около двух третей потребляемой во всем мире пресной воды. Чтобы помочь решению проблем глобального изменения климата и быстрого роста численности населения, сельскохозяйственные сообщества во всем мире должны максимально увеличить урожаи при одновременном повышении эффективности использования воды путем орошения. Для достижения этой цели потребуются методы мониторинга почвенных водных ресурсов в целях повышения эффективности применения оросительной воды. Традиционные методы измерения содержания почвенных вод (СПВ) предусматривают применение расположенных в различных точках на местах устройств, которые передают информацию о СПВ в тех точках, где они размещены. Такого рода зондирование на местах зачастую не позволяет получать в масштабах района всю информацию о СПВ, в том числе о его естественной неоднородности, если не имеется сети расположенных в различных точках передающих устройств. Нейтронный зонд космического излучения (НЗКИ) представляет собой новое устройство, способное обеспечивать дистанционное получение и количественную оценку информации о СПВ в масштабах района с охватом большой пространственной области (круг радиусом приблизительно 250 метров или площадью 20 га), и ему не свойственны связанные с затратами времени и инвазивностью аспекты традиционных сетей определения СПВ с датчиками в различных точках. Сообщества могут использовать предоставляемую НЗКИ информацию о влажности почвы, что позволит более эффективно управлять все более скудными водными ресурсами.

138. Метод НЗКИ основан на детектировании ядерных частиц высоких энергий, поступающих из космоса в атмосферу. Многие из этих частиц будут сталкиваться с газами в атмосфере, при этом они теряют энергию и претерпевают ряд превращений в частицы с меньшей энергией, которые в конечном итоге вблизи поверхности почвы становятся нейтронами (рис. D-1). Эти нейтроны легко поглощаются атомами водорода. Это означает, что присутствие в окружающей среде водорода — это основной механизм, посредством которого поступающие нейтроны

исчезают из почвы и атмосферы. Это верно для всех форм водорода в заданной среде, независимо от того, изменяются ли эти источники водорода быстро (почвенная влага) или медленно (растительность, поверхностные воды или почвенный органический материал), или же они не изменяются с течением времени (вода в глинистых минералах или техногенных структурах). НЗКИ пассивно обнаруживает эти нейтроны, когда они проходят через почву и воздух, и определяет число отсчетов нейтронов в единицу времени. Поскольку водород присутствует в толще и на поверхности земли преимущественно в составе воды, можно установить связь между счетом нейтронов и количеством воды, присутствующей в почве в той или иной области. В методологию НЗКИ входит процесс калибровки, целью которого является удаление сигнала от водорода в окружающей среде, не связанного с СПВ. Этот процесс осуществляется путем аттестации на местах кампаний по отбору проб.

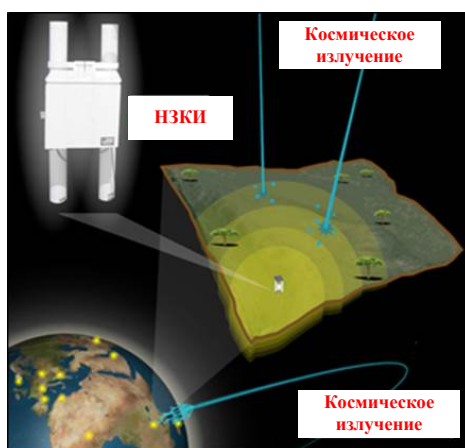


РИС. D-1. Иллюстрация поступающего космического излучения, взаимодействующего с атмосферой и приводящего к появлению на поверхности почвы нейтронов, которые могут быть измерены на ландшафтном уровне с помощью НЗКИ. (Фото: МАГАТЭ)

139. Использование метода НЗКИ в качестве фиксированного стационарного инструмента мониторинга почвенных вод для целей сельского хозяйства является устоявшейся практикой в государствах-членах во всем мире¹⁷. Хотя этот метод имеет большой потенциал в плане получения информации о почвенной влаге в масштабах района¹⁸, реакция зонда на неоднородность СПВ в естественной окружающей среде является предметом тщательного изучения^{19,20}. Усилия, направленные на совершенствование использования НЗКИ для изучения пространственной неоднородности СПВ, привели к исследованиям и разработке новых и более универсальных мобильных НЗКИ. Мобильный НЗКИ, выполненный в виде рюкзака или установленный на транспортном средстве, ведет себя точно так же, как стационарный зонд с такой же зоной наблюдения. Мобильность наделяет метод НЗКИ способностью изучения пространственной неоднородности влажности почвы в окружающей среде (рис. D-2), что показывает ученым и фермерам, где земля сухая, а где нет, предоставляя им информацию,

¹⁷ Zreda, M., Shuttleworth, W. J., Zeng, X., Zweck, C., Desilets, D., Franz, T., Rosolem, R.: COSMOS: the COsmic-ray Soil Moisture Observing System, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 4079–4099, 2012.

¹⁸ Franz, T. E., Wahbi, A., Vreughenhil, M., Weltin, G., Heng, L., Oismueller, M., Strauss, P., Dercon, G., Desilets, D., Using cosmic-ray neutron sensors to monitor landscape scale soil water content in mixed land use agricultural systems, *Appl. & Environ. Soil Sci.*, Article ID 4323742, 11 pages, 2016.

¹⁹ Desilets, D., Zreda, M., Ferre, T. P. A.: Nature's Neutron Probe: Land Surface Hydrology at an Elusive Scale with Cosmic-Rays, *Water Resour. Res.*, 46, W11505, 7 pages, 2010.

²⁰ Avery, W. A., Finkenbiner, C., Franz, T. E., Wang, T., Nguy-Robertson, A. L., Suyker, A., Arkebauer, T., Muñoz-Arriola, F.: Incorporation of globally available datasets into the roving cosmic-ray neutron probe method for estimating field-scale soil water content, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 20, 3859–3872, 2016.

необходимую для точного орошения. Однако необходимы дополнительные исследования для оптимизации использования этого мобильного метода и его доступности государствам-членам. Объединенный отдел ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в продовольственной и сельскохозяйственной областях в настоящее время принимает активное участие в этих работах.

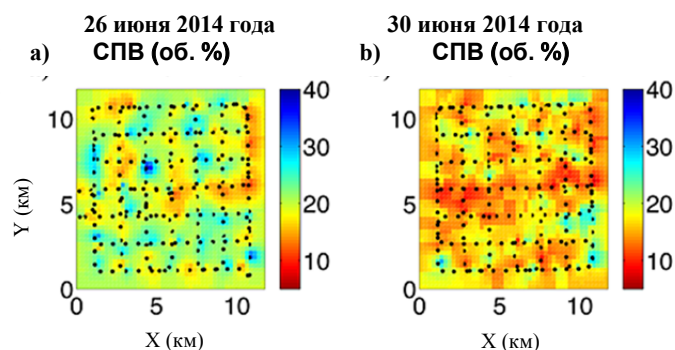


РИС. D-2. Производительность мобильного НЗКИ при выявлении и количественном определении пространственной изменчивости СПВ на территории сельскохозяйственного назначения. Черные точки показывают места измерений в течение двух периодов обследования с интервалом в один месяц. (Источник: Franz et al., Combined Analysis of Soil Moisture Measurements from Roving and Fixed Cosmic-Ray Neutron Probes for Multiscale Real-Time Monitoring, Geophys. Res. Lett., 42, 3389–3396, 2015)

D.3. Картирование с помощью радиационных гибридов для разработки генетических инструментов с целью поддержки программ разведения скота

140. Генетическое улучшение сельскохозяйственных животных с целью увеличения производства молока, мяса и волокна традиционно основывается на отборе и селекции животных с высокими характеристиками. Благодаря последним достижениям в области геномики теперь можно оценить племенную ценность животных, как только они рождаются, с помощью геномных инструментов, таких как ДНК-чипы. Разработка ДНК-чипов для оценки животных требует секвенирования и картирования геномов животных. Карты геномов позволяют определить местоположение конкретных особенностей в хромосомах организма. Они являются важнейшими инструментами при выявлении генов, ответственных за болезни или характеристики производства и воспроизводства.

141. Карту генома можно разработать с помощью обычных методов или радиоизотопных методов. Обычные методы картирования – например, картирование сцепления генетических признаков – основаны на естественных явлениях рекомбинации и требуют породистых животных в последующих поколениях. В случае домашнего скота такие методы не только связаны с огромными затратами и периодами времени (из-за продолжительных интервалов смены поколений), но также приводят к получению карт с низким разрешением. Применение радиоизотопных методов помогает преодолеть эти ограничения путем имитации явлений генетической рекомбинации и ускорения процесса картирования генома с целью более быстрой разработки инструментов для повышения продуктивности животноводства.

D.3.1. Радиоизотопные методы картирования геномов скота

142. Источники на основе кобальта-60 или рентгеновское излучение можно использовать для облучения и неупорядоченного разрушения генома скота с образованием нескольких фрагментов. Как правило, используется доза излучения в диапазоне от 30 до 150 Гр, а полученные в результате разрушения фрагменты хромосом геномов скота восстанавливаются в клетках грызунов. Концы хромосом быстро заживают после облучения и вводятся или перемещаются в хромосомы грызунов при слиянии клеток особей скота с клетками грызунов. Около 90-100 таких гибридных клеток грызунов – скота затем анализируются на наличие или отсутствие ДНК-маркеров. Для заданной дозы излучения те маркеры, которые расположены дальше друг от друга в хромосоме, скорее всего будут разрушены и попадут в отдельные хромосомные фрагменты, которые могут быть интегрированы в различные гибридные клетки. Частота таких поломок не только помогает оценить расстояние между маркерами, но также определяет их порядок в хромосомах, позволяя получать плотные карты геномов скота. Разрешение таких карт радиационных гибридов обычно зависит от использованной дозы радиации, причем более высокая доза увеличивает разрешение карты. Таким образом, карты радиационных гибридов весьма полезны, особенно при подготовке карт высокого разрешения геномов скота с относительно низкими затратами и в более короткие сроки, чем при использовании обычных методов.

D.3.2. Применение карт радиационных гибридов в животноводстве

143. Карты радиационных гибридов высокого разрешения облегчают разработку ДНК-чипов, которые широко используются для улучшения пород молочного скота с целью повышения молочной продуктивности. Результирующая технология геномной селекции радикально изменила промышленность искусственного оплодотворения (ИО), значительно увеличив годовой генетический выигрыш в плане производства молока. Рыночная доля молодых ИО быков, отбираемых на основе этой технологии, в настоящее время достигла более чем 50% во многих промышленно развитых странах, а другие аграрные развивающиеся страны с интересом ожидают внедрения новой технологии в свои системы молочного животноводства. Аналогичным образом геномные карты высокого разрешения были разработаны для других видов скота, включая овец, буйволов и свиней. В последнее время панели радиационных гибридов, разработанные Агентством, были использованы исследователями во всем мире при сборке первого в мире проекта геномной последовательности²¹ и разработки карты высокого разрешения всего генома²² для коз – еще одной важной породы скота в развивающихся странах. Это также помогло в разработке ДНК-чипа, который может использоваться для разведения коз с целью повышения производства мяса.

D.3.3. Последствия для продовольственной безопасности и цели в области устойчивого развития

144. Пока еще не существует карт радиационных гибридов и геномных инструментов для многих видов важных с точки зрения сельского хозяйства пород скота, таких, как верблюды, одомашненные зебу, альпаки, ламы, яки, ослы, гайалы и кролики. Эти породы скота хорошо чувствуют себя в двух основных видах экстремальных условий – жарком пустынном климате и

²¹ Dong, Y., et al. (2013). Sequencing and automated whole-genome optical mapping of the genome of a domestic goat (*Capra hircus*). *Nature Biotechnology* 31, 135–141

²² Du, X., et al. (2014). An update of the goat genome assembly using dense radiation hybrid maps allows detailed analysis of evolutionary rearrangements in Bovidae. *BMC Genomics* 15, 625

высокогорных холодных регионах — и обеспечивают средства к существованию большого числа маргинальных фермеров. Например, верблюды играют важную роль в жизни нескольких миллионов кочевых скотоводов в Африке и Азии, и в ряде стран быстро растет спрос, в частности, на верблюжье молоко.

145. Разработка и создание карт радиационных гибридов и геномных инструментов помогут осуществить программы селекции для увеличения продуктивности такого скота и повышения продовольственной безопасности. В последние годы значительно возрос спрос государств-членов на панели радиационных гибридов для составления карт генома вышеупомянутых пород скота. Агентство и его лаборатории ФАО/МАГАТЭ служат центром по разработке и распространению таких панелей и других необходимых ресурсов (например, соответствующих биологических эталонных материалов, ресурсов картирования и программных средств) для государств-членов.



РИС. D-3. (Слева) Облучение клеток верблюда для построения панелей радиационных гибридов. (Справа) А. Живые гибридные клетки извлекаются из чашки с клеточной культурой. В. Колония клеток радиационных гибридов для картирования генома. (Фото: МАГАТЭ)

Е. Здоровье человека

Е.1. Успехи в области лечения рака предстательной железы: диагностика и терапия

Е.1.1. Общие сведения

146. Рак предстательной железы входит в число трех наиболее распространенных раковых заболеваний мужчин во всем мире и наряду с раком легких, печени, желудка и кишечника является одной из наиболее распространенных причин смерти от рака у мужчин. После простатэктомии или внешней лучевой терапии у 54% пациентов может возникать биохимический рецидив, который определяется как повышение уровня простат-специфического антигена (ПСА) в сыворотке крови. Локальный рецидив в ложе предстательной железы после радикальной простатэктомии можно предсказать с точностью около 80%. Тип используемой терапии основывается не только на уровнях ПСА, но также и на других тестах с использованием метода диагностической визуализации, таких как сканирование костей с целью исключения метастазов, или компьютерная томография (КТ) или магнитно-резонансная визуализация с целью выявления локальных рецидивов.

147. Несмотря на хорошую чувствительность при проведении различия между локальным рецидивом и удаленным рецидивом, имеющиеся средства прогнозирования, такие как номограммы, не позволяют получить информацию о реальном местонахождении рецидива (например, в лимфатических узлах или в костях, в тазу или вне таза) или фактическом числе метастазов. Кроме того, у многих пациентов с раком простаты уровень ПСА возрастает, что может быть совместимо как с локальными, так и с системными рецидивами. По этой причине нет возможности планировать целенаправленную терапию спасения, учитывая вероятность риска, определяемую только номограммами. Поэтому пациентов обычно направляют на консервативную радиотерапию ложа простаты (если есть подозрение относительно локального рецидива) или на системное лечение методом гормональной терапии, таким как антиандрогенная терапия в случае подозрения на системный рецидив.

Е.1.2. Диагностика

148. Обычные методы визуализации, включая КТ, сцинтиграфию костей и магнитно-резонансные методы, обеспечивают низкие уровни точности при повторных исследованиях пациентов непосредственно после выявления биохимического рецидива. Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) – КТ с холином показала неоптимальную чувствительность при применении у пациентов с ранней стадией биохимического рецидива, т. е. у пациентов с низким уровнем ПСА в сыворотке крови после радикальной терапии. В течение последнего десятилетия было установлено, что такие методы ядерной медицины, как ПЭТ с ^{11}C -холином и ^{18}F -холином, оказываются более точными, чем обычная диагностическая визуализация при повторном исследовании пациентов с биохимическим рецидивом, и позволяют отличать локальный рецидив, все еще не выходящий за пределы таза, от системного рецидива.

149. Оптимальные сроки проведения спасательных процедур для получения наилучших результатов с точки зрения прогнозирования наступают тогда, когда развитие заболевания еще невелико, а не тогда, когда уровни ПСА в сыворотке начинают достигать значения, обнаруживаемого после радикальной терапии. В этом контексте наличие диагностического теста, потенциально способного выявлять различие между первоначальным рецидивом или местно-регионарным рецидивом, который может быть потенциально излечим, и системным рецидивом, который можно лечить посредством только паллиативных подходов, может иметь решающее значение.

Е.1.3. Последние события и тенденции

150. Недавно была разработана новая молекула, ориентированная на простатический специфический мембранный антиген (ПСМА). ПСМА является мембранным ферментом, высокий уровень экспрессии которого выявляется в основном в клетках рака предстательной железы при сравнении с его экспрессией в здоровой ткани предстательной железы. В предварительных исследованиях по диагностике ранних рецидивов заболевания недавно разработанный ^{68}Ga -ПСМА, как внеклеточный ингибитор ПСМА, используемый в качестве радиофармацевтического препарата при ПЭТ-КТ визуализации, показал значительно более высокую точность, чем метод ПЭТ-КТ с ^{18}F -холином. Эти исследования также документально подтвердили лучшее соотношение сигнала опухоли и фона при ПЭТ-КТ с ^{68}Ga -ПСМА по сравнению с ПЭТ-КТ с ^{18}F -холином при идентификации подозрительных поражений на предмет рецидивов.

151. Дальнейшие исследования, проведенные на больших популяциях пациентов с биохимическим рецидивом после радикальной терапии, показали отличную диагностическую способность ПЭТ-КТ с ^{68}Ga -ПСМА при повторном исследовании пациентов с биохимическим рецидивом болезни даже в тех случаях, когда уровни ПСА в сыворотке оказывались весьма

низкими. В последние месяцы использование этого изотопного индикатора вызывает особый и растущий интерес в научном сообществе. Этот радиофармацевтический препарат также показал высокую специфичность (>90%) в исследованиях, в которых гистологический анализ использовался в качестве эталона для проверки результатов ПЭТ (рис. Е-1). И наконец, ни в одном из исследований, описанных в литературе, не сообщается о неблагоприятных явлениях или клинически обнаруживаемых фармакологических эффектах в связи с этим методом.

152. По причинам, изложенным выше, ПСМА может быть отличной молекулярной мишенью для разработки радиоиндикатора для ПЭТ-КТ визуализации, так как он позволяет обнаруживать ранние рецидивы заболевания.

153. Успех клинического применения ^{68}Ga -ПСМА для диагностики привел к разработке метода лечения с использованием той же самой молекулы, но меченой высокоэнергетическим изотопом, таким как лютеций-177 или иттрий-90. Проведенные клинические испытания показали очень хорошие результаты, но для валидации этого нового метода лечения необходимы дополнительные испытания. Использование одной и той же молекулы как для диагностики, так и для лечения называется "тераностикой", и именно таким образом применяется ПСМА в лечении рака предстательной железы.

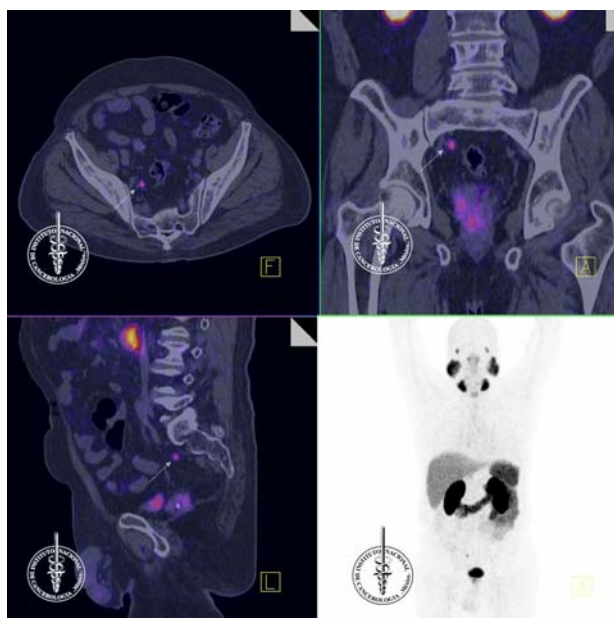


РИС. Е-1. Пациент с раком предстательной железы в анамнезе, получающий хирургическое и химиотерапевтическое лечение. Для оценки лечебных мероприятий после терапии было проведено исследование методами ядерной медицины с использованием ПЭТ-КТ с ^{68}Ga -ПСМА. Стрелка показывает аномальное поглощение изотопного индикатора в лимфоузле, указывающее на рецидив заболевания. (Фото: Национальный институт онкологии, Мексика)

Г. Водные ресурсы

Г.1. Новые разработки в области использования изотопов в осадках для диагностики погоды и климата

154. Осадки являются основным источником всей воды в реках, озерах и водоносных горизонтах. Процессы, в результате которых образуются осадки, в основном бывают двух типов: конвективные и слоистые. Осадки из конвективных облаков, такие как выпадающие при грозах, имеют высокую интенсивность (сильный дождь в течение короткого периода времени), но они выпадают на ограниченной площади (около 10-25 км²), а осадки из слоистых облаков имеют низкую интенсивность, но выпадают в течение гораздо больше длительных периодов времени и на большей площади (>500 км²). Ожидается, что осадки из конвективных облаков, приводящие к большему числу наводнений и других стихийных бедствий, усиливаются по мере потепления климата.

155. Из-за различий атомных масс кислорода и водорода их изотопные отношения ведут себя по-разному в конвективных облаках или слоистых облаках и, как следствие, изотопные отношения в них должны быть разными. Используя изменчивость изотопных отношений для классификации количеств дождя из конвективных облаков или слоистых облаков, можно достигнуть понимания происходящих в облаках процессов и характера их изменения в разные времена года, что позволяет лучше моделировать их как для краткосрочного моделирования погоды, так и для анализа последствий долгосрочных климатических изменений.

156. Возможность использования этой изменчивости изотопных отношений для получения информации о влиянии климата на водный баланс Земли признавалась уже в начале 1950-х годов и была одной из основных причин создания Агентством в 1960 году в сотрудничестве со Всемирной метеорологической организацией (ВМО) Глобальной сети «Изотопы в осадках» (ГСИО). Изотопные данные ГСИО позволили понять, что полярный и континентальный лед (в Антарктике, Арктике, Гренландии и горах Анд и Гималаев) содержит относящуюся к прошлому информацию об изменениях водного баланса в связи с похолоданием или потеплением климата.

157. Известно, что изотопные данные ГСИО и данные других наблюдений оказываются различными при выпадении осадков из различных типов облаков, например, в случае быстрого ливня или продолжительного медленного дождя. Однако эти различия изотопных данных не считались достаточными для того, чтобы обеспечить лучшее понимание процессов, происходящих в облаках. Недавно проведенная в Агентстве²³ работа показала, что действительно имеется существенная корреляция между изотопными отношениями и процессами в облаках, ответственными за выпадение осадков, и эта новая информация может значительно повысить полезность данных ГСИО для понимания как краткосрочных связанных с погодой, так и долгосрочных связанных с климатом процессов.

²³ Aggarwal, Pradeep K, Ulrike Romatschke, Luis Araguas-Araguas, Dagnachew Belachew, Frederick J. Longstaffe, Peter Berg, Courtney Schumacher & Aaron Funk, "Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios", Nature Geoscience, Vol. 9, pp 624-629.

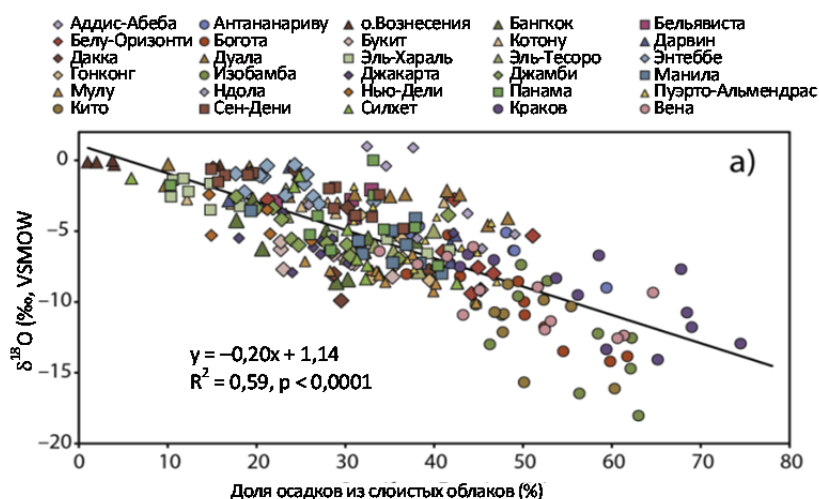


РИС. F-1. Связь между долгосрочным средним содержанием кислорода-18, измеренным в суммарных месячных количествах осадков, и долей осадков из слоистых облаков на некоторых тропических и среднеширотных станциях сети ГСИО. Остальная часть фракции дождя связана с конвективными облаками. (Источник: Aggarwal, P. et al., *Proportions of convective and stratiform precipitation revealed in water isotope ratios. Nature Geoscience, Vol. 9*).

158. Данные РЛС на борту спутника для измерения тропических осадков (ИТО), который был запущен совместно космическими агентствами США и Японии в 1998 году, использовались для оценки соотношения типов дождя в период 1998-2014 годов. При сопоставлении этих пропорций типов дождя с изотопными данными ГСИО за тот же период времени обнаруживается четкая корреляция между данными двумя параметрами (рис. F-1). Дождь из конвективных облаков имеет более высокие изотопные отношения, а дождь из слоистых облаков – более низкие изотопные отношения. Большая часть осадков, собираемых ежедневно или ежемесячно, представляет собой смесь двух типов дождя.

159. До настоящего времени считалось, что уровень содержания трития в осадках свидетельствует о смешивании континентальной и океанской влаги. Однако недавнее исследование по этой тематике показывает, что содержание трития также зависит от пропорций типов дождя. Оказалось, что содержание трития в осадках из конвективных облаков повышается, когда облака очень высокие (высота более 6 км над поверхностью земли), а размер некоторых частиц льда возрастает при повышении влажности на высотах более 5 км, где высок природный уровень содержания трития. Это происходит потому, что тритий образуется в стратосфере и попадает в тропосферу (где образуются облака и осадки) в результате влагообмена.

160. Регулярные измерения стабильных изотопов и трития в осадках в течение части суток или в суточных осадках помогут лучше понять краткосрочную изменчивость динамики облаков, определяющую изменения фракций дождя. Изотопные данные могут использоваться в качестве независимого диагностического инструментального средства для мониторинга изменчивости типа осадков и влияния на него изменений климата.

161. Новые технологические разработки, в которых типы осадков дифференцируются на основе изотопных вариаций, помогут улучшить климатические модели (или модели глобальной циркуляции) и моделирование осадков из конвективных облаков. Точная и детализированная информации в этой области может улучшить способность государств-членов прогнозировать и смягчать последствия изменения климата.

Г. Окружающая среда

Г.1. Использование изотопных инструментальных средств для исследования проблемы подкисления океана

162. Мировые океаны занимают более 70 процентов поверхности Земли и по существу определяют ее климат. При рациональном подходе к управлению океаны могут также играть важную роль в обеспечении рабочих мест и продовольствия для населения мира. В океанах образуется более половины объема кислорода на Земле, и в то же время они поглощают значительную часть избыточного тепла и важных парниковых газов, таких как двуокись углерода (CO_2), которые производит человечество. Вместе с тем теперь мы знаем, что в мировых океанах происходят серьезные изменения химии морской воды.

Г.1.1. Подкисление океана — еще одна проблема, связанная с CO_2

163. С начала промышленной революции выбросы CO_2 неуклонно возрастали, и сегодня концентрация CO_2 в атмосфере превысила 400 ч./млн. (0,04 процента). В настоящее время океан способен поглотить около четверти годового объема выбросов CO_2 в атмосферу. Поскольку уровни содержания CO_2 в атмосфере неуклонно растут, растут также уровни содержания CO_2 в океане (рис. Г-1). Хотя первоначально ученые уделяли основное внимание преимуществам удаления содержащегося в океанах CO_2 , многолетние наблюдения, проводившиеся в океанах, в настоящее время ясно показывают, что существуют также серьезные негативные аспекты — поглощенный в океанах CO_2 изменяет химический состав морской воды посредством процесса, называемого подкислением океана.

164. В ходе этого процесса выделяются свободные ионы водорода (H^+), что приводит к снижению pH морской воды, а также снижению концентраций ионов карбоната (CO_3^{2-}) в тех случаях, когда некоторые ионы H^+ соединяются с карбонатом, образуя бикарбонат (HCO_3^-). Палеореконструкции предполагают, что pH морской воды оставался относительно постоянным в течение миллионов лет; однако в последние полтора столетия с момента начала промышленной революции во всем мире наблюдается систематическое снижение pH. В то время как нынешнее снижение pH может показаться относительно небольшим (0,1 единицы, или увеличение кислотности приблизительно на 26%), лучшие имеющиеся в настоящее время научно обоснованные прогнозы²⁴ основаны на предположении, что продолжение выбросов, вероятно, приведет к снижению в этом столетии pH поверхностных морских вод еще на 0,4 единицы (эквивалентному повышению кислотности примерно на 150%).

²⁴ Hoegh-Guldberg, O., et al. (2007). Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification, Science 14 Dec 2007: Vol. 318, Issue 5857, pp. 1737-1742 DOI:10.1126/science.1152509

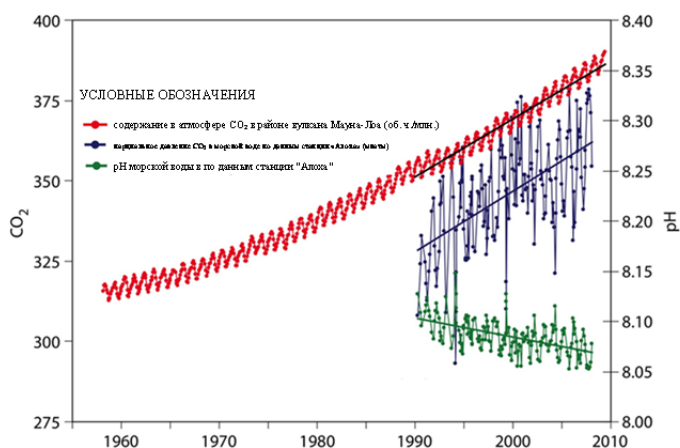


РИС. G-1. Увеличение содержания CO_2 в атмосфере и снижение pH поверхностных вод океана, измеренные на метеорологической станции Мауна-Лоа, Гавайи, и на станции "АЛОХА" в рамках программы долгосрочного наблюдения за состоянием океана "Hawaii Ocean Time-series". (Источник: Feely R.A., Doney S.C. and Cooley S.R., 2009. *Ocean acidification: Present conditions and future changes in a high- CO_2 world. Oceanography* 22(4), 36–47)

G.1.2. Биологические последствия подкисления океана

165. Поскольку подкисление океана оказывает влияние на химический состав глобальной морской среды, основные биологические процессы также подвергаются воздействию, которое иногда оказывается критически серьезным. Самые разнообразные морские организмы (например, многие моллюски, ракообразные, кораллы, коралловые водоросли и фораминиферы) используют карбонат-ионы для создания скелетов из карбоната кальция. Важно отметить, что карбонат-ионы являются также основой для обызвествленных пластинок кохколитов — микроскопического планктона, являющегося частью основы морской пищевой цепочки. Кроме того, уровни растворенного CO_2 могут оказывать влияние на физиологию морских организмов, которые зачастую выживают лишь в узком диапазоне экологических параметров, в том числе уровня растворенной CO_2 и pH.

166. Устойчивое подкисление океана может влиять на морские организмы различным образом. Что касается рыбы, повышение уровня содержания CO_2 в океанах может оказывать самое различное воздействие, в том числе изменения поведения, влияние на образование отолита (слуховой косточки у рыб), на рост молодых особей и на модель поведения "хищник-жертва". У ракообразных с раковинами из карбоната кальция, таких как устрицы, моллюски и морские гребешки, подкисление океана может оказывать пагубное воздействие на рост, физиологию и выживание. У планктона, который другие морские организмы используют для питания и часть которого подвергается обызвествлению, подкисление океана может влиять на рост, физиологию и выживание с возможными последствиями для всей пищевой сети — например, морские птероподы уже имеют очень тонкие раковины, и эти раковины могут быстро растворяться в морской воде с pH 7,8, который, по данным текущих прогнозов, является ожидаемым pH морской воды в 2100 году. Для кораллов, скелеты которых состоят из карбоната кальция, создание и поддержание этих структур в условиях растущего подкисления океана усложнится, и также может быть нарушена связь между кораллами и их симбиотическими динофлагеллятами, что будет приводить к обесцвечиванию кораллов. Проведенные в широких масштабах наблюдения позволяют предположить, что повышенные уровни CO_2 оказывают сильное воздействие, приводящее к обесцвечиванию кораллов (рис. G-2).



РИС. G-2. Обширное обесцвечивание кораллов, Маршалловы острова. (Фото: МАГАТЭ)

G.1.3. Применение ядерных методов для понимания последствий подкисления океана

167. Несколько радиоизотопов уникально подходят для количественной оценки биологического воздействия подкисления океана, в том числе кальций-45 для изучения скорости кальцификации, углерод-14 для оценки первичного производства морского фитопланктона, стронций-85 для оценки скорости биоминерализации, цинк-65 для изучения метаболизма морских организмов и набор меченых радиоизотопами микроэлементов (например, серебро-110m, кадмий-109, кобальт-57, кобальт-60, марганец-54, селен-75) для изучения зависимых от pH скоростей биоаккумуляции и очищения. Изотопный состав бора-10 и бора-11 в долгоживущих кораллах может быть использован при реконструкции pH морской воды для того, чтобы понять существовавшие в прошлом условия окружающей среды и объяснить прогнозируемые изменения pH океана в будущем.

168. В последние годы были достигнуты громадные успехи в области науки о подкислении океана²⁵. Техническая база современных экспериментов укрепляется благодаря использованию радиоизотопов и мультирадиоизотопного подхода для исследования влияния прогнозируемого снижения pH океана на морские организмы. Проводимые в Лабораториях окружающей среды Агентства контролируемые эксперименты по воздействию подкисления океана на некоторые виды кораллов, моллюсков и рыб показывают явно выраженные метаболические и физиологические изменения после продолжительного воздействия снижения pH окружающей среды. Успехи в области применения радиоизотопов, в том числе парные изотопные исследования (например ^{134,137}Cs), позволяют по-новому взглянуть на далеко идущие последствия подкисления океана при воздействии в будущем на океанические среды таких дополнительных нарастающих стресс-факторов, как температура и/или растворенный кислород.

Н. Радиационные технологии

Н.1. Культурное наследие: изучение и сохранение с использованием радиационных технологий

169. Объекты культурного наследия часто представляют собой бесценные и бережно хранимые артефакты, требующие осторожного обращения и сложных методов сохранения. Радиационные методы используются для проведения подробных обследований объектов, их укрепления и

²⁵ Центром информации по данным вопросам является Международный координационный центр по проблеме подкисления океана <https://www.iaea.org/ocean-acidification/page.php?page=2181>

помогают бороться с их ухудшением или деградацией. В случае необходимости артефакты также могут быть освобождены от вредителей, что улучшит их сохранность. Радиационные методы становятся все более совершенными и все более приемлемыми для заинтересованных учреждений, ответственных за обращение с культурными артефактами.

Н.1.1. Изучение и обследование

170. Радиационные методы способны помочь исследовать подлинность картины или установить, есть ли еще один слой под поверхностью, выяснить, изготовлен ли артефакт из золота или просто покрыт золотом или оценить хрупкость древней статуи перед ее транспортировкой — и все это без какого-либо ущерба для объекта. Рентгеновская флуоресценция (РФ) является инструментом, который может помочь при проведении элементного анализа материалов и часто используется в музеях для изучения различных артефактов (рис. Н-1).

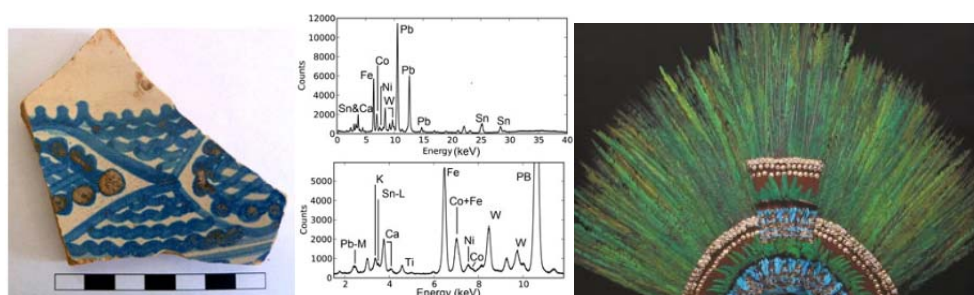


РИС. Н-1. Элементный анализ фрагмента керамики седьмого века (слева) и редкого мексиканского головного убора шестнадцатого века, который проводился с помощью портативного устройства РФ с целью выявления оригинального золотого украшения и элементов, добавленных впоследствии (справа). (Фото: МАГАТЭ)

171. Так же, как методы медицинской радиологии позволяют получать изображения внутренних органов человеческого тела, рентгенографические методы могут раскрывать внутреннюю структуру статуй и выявлять возможные недостатки. Различные рентгенографические методы (такие как обычная рентгенография, гамма-радиография, радиография с использованием ускорителей, рентгеноскопия, бета-радиография или радиография с использованием вторичных электронов, электронно-эмиссионная радиография, нейтронная радиография, автордиография и компьютерная томография) помогают обследовать и изучать произведения искусства (Рис. Н-2, Н-3 и Н-4).



РИС. Н-2. При изучении предметов искусства, таких как эта картина из Городского музея античного искусства, Турин, Италия, в музеях используются различные рентгеновские методы, такие как метод индуцированного протонами рентгеновского излучения и методы, основанные на применении ускорителей. (Фото: LABEC/INFN, Италия)



РИС. Н-3. Рентгеновский снимок позволяет предположить, что голова и туловище этой статуи Юпитера, расположенный в Виль д'Эврэ, Франция, были соединены между собой путем сварки. (Фото: Ж.Л. Бутэн)

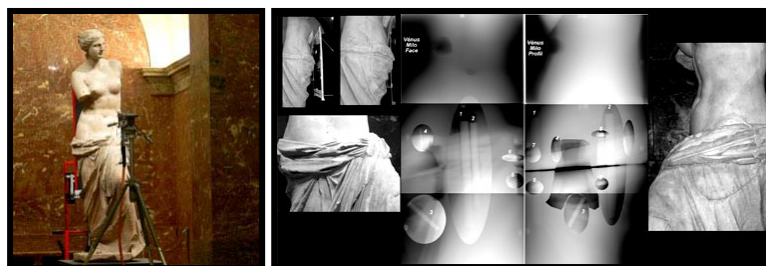


РИС. Н-4. Гамма-рентгенограмма, показывая внутреннюю структуру статуи Венеры Милосской в музее Лувр, Франция, и использованная при принятии решений перед транспортировкой. (Фото: МАГАТЭ)

Н.1.2. Использование радиационных методов для сохранения и укрепления артефактов

172. Инфекционное заражение артефактов культурного наследия может приводить к ускоренному ухудшению их состояния и создавать опасность для здоровья лиц, работающих с такими объектами. В обычных методах дезинфекции, используемых в медицине и сельском хозяйстве для обработки больших количеств объектов, таких как фумигация, применяются токсичные химические вещества, например, формальдегид, этанол или оксид этилена, или требуются жесткие режимы обработки с применением высокой температуры и давления, которые недопустимо использовать в отношении многих культурных артефактов. Эксперименты, проведенные в 1950-х годах (гамма облучение насекомых, питающихся древесиной) впервые продемонстрировали биоцидный эффект ионизирующего излучения. По мере внедрения в промышленности технологии радиационной обработки расширялось ее использование при дезинсекции артефактов культурного наследия. Радиационная обработка, которая является апробированным методом стерилизации медицинских продуктов, продуктов питания и тканевых трансплантатов – это безреагентный метод обработки объектов культурного наследия при комнатной температуре. Поскольку облучение не только избавляет от использования токсичных химических веществ, но также обеспечивает равномерное, тщательное проникновение независимо от размера и формы объекта и не оставляет каких-либо остаточных вредных веществ, оно является привлекательным вариантом для сохранения культурного наследия, безопасным как для персонала, так и для окружающей среды. Радиационная деконтаминация безопасно осуществляется уполномоченными лицами на утвержденных установках.

Дезинфекция мумии Рамзеса II

173. Мумия Рамзеса II, демонстрируемая в египетском музее в Каире, была перевезена на выставку во Францию в 1976 году, и было установлено, что она заражена личинками, насекомыми и разнообразными грибами, хотя и не содержит каких-либо болезнетворных бактерий. Французский Национальный музей естественной истории по согласованию с

египетскими властями провел в 1977 году в региональной мастерской по сохранению объектов культурного наследия "Нюклеарт" санитарную обработку этой мумии с помощью гамма-облучения. Консорциум лабораторий и музеев в Париже и Гренобле осуществлял управление процессом радиационной обработки после тщательного планирования и тестирования. С целью определить дозу облучения, достаточную для эффективного уничтожения всех видов грибов (более 60 видов) без воздействия на другие ткани мумии, такие как волосы, текстиль, кожа и зубы, для тестирования были выбраны более четырехсот проб тканей других мумий. Большой размер (длина 1,72 м) и специфическая форма мумии, а также наличие внутри нее различных материалов потребовали сложных дозиметрических расчетов с использованием точных математических моделей для обеспечения одинаковой дозы 18 кГр. Мумия Рамзеса II была успешно облучена после проверки с помощью двух моделей мумии и отправлена обратно в Египет, где она остается в хорошем состоянии сорок лет спустя.

Проект "РАДИАРТ", Португалия

174. Португальские плитки восемнадцатого века в Национальном музее плитки в Лиссабоне были подвергнуты обработке дозой излучения ~4 кГр с целью уничтожения бактерий на поверхности и грибов внутри, которые вызывали зеленое окрашивание. Процесс облучения обеспечил эффективность уничтожения микробов более 70%.

Исследовательский центр Касакиа, Италия

175. Проведенные в Исследовательском центре Касакиа Итальянского национального агентства по новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому развитию исследования воздействия гамма-излучения на материалы показали, что ионизирующее излучение является чрезвычайно эффективным средством уничтожения вредных насекомых (при дозах 0,2 – 0,5 кГр) и микрогрибов (при дозах 3-8 кГр). Исследования показали, что даже при дозе излучения 10 кГр стойкость цветов фотографических отпечатков на чистой целлюлозе или бумаге сохранялась независимо от того, был ли процесс сопряжен с использованием альбумина, серебряного желатина, коллодия или анилина, что свидетельствует о полезности радиационной технологии для обработки старых и микробиологически зараженных фотографий.

«Капсула времени», Бразилия

176. Шкатулка из дерева и свинца, содержащая некоторые из старейших документов периода Бразильской империи (XIX век), была найдена внутри фундамента здания в городе Рио-де-Жанейро. Перед реставрацией эта шкатулка была подвергнута обработке дозой излучения 8-10 кГр на многоцелевой гамма-облучательной установке Института ядерных и энергетических исследований ИПЕН/НКЯЭ, Бразилия, (рис. Н-5).



РИС. Н-5. "Капсула времени" подвергается противогрибковой обработке. (Фото: (П. Васкес, Институт ядерных и энергетических исследований ИПЕН/НКЯЭ, Сан-Паулу, Бразилия).

Хрома – сохранение замороженного детеныша мамонта

177. В 2008 году в Сибири, Российская Федерация, был обнаружен замороженный детеныш мамонта. Возраст тела этого мамонтенка, названного Хромой по названию реки, на берегах которой он был найден, составляет, согласно оценкам, более 50 000 лет, и оно является, пожалуй, старейшей находкой подобного рода. Хотя тело хорошо сохранилось, необходимо было инактивировать любые следы бактерий или других потенциально патогенных организмов, которые могли на нем находиться. Гамма-облучение оказалось наиболее подходящим методом неразрушающей биоцидной обработки всего тела. В июле 2010 года замороженный мамонтенок был подвергнут обработке дозой 20 кГр в Гренобле, Франция, и теперь он сохраняется в хорошем состоянии и демонстрируется общественности. (Рис. Н-6.)



РИС. Н-6. Мамонтенок Хрома сохраняется после облучения в июле 2010 года. (Фото: Д-р Квок Хой ТРАН, АРК-Нюклеарт, КАЭ-Гренобль)



IAEA

60 лет

Атом для мира и развития

www.iaea.org

Международное агентство по атомной энергии

Vienna International Centre, P.O. Box 100

1400 Vienna, Austria

Телефон: (+43-1) 2600-0

Факс: (+43-1) 2600-7

Эл. почта: Official.Mail@iaea.org