

Генеральная конференция

GC(59)/INF/2

10 июля 2015 года

Общее распространение

Русский

Язык оригинала: английский

Пятьдесят девятая очередная сессия

Пункт 17 предварительной повестки дня
(GC(59)/1)

Обзор ядерных технологий – 2015

Доклад Генерального директора

Резюме

- В ответ на просьбы государств-членов Секретариат ежегодно подготавливает всеобъемлющий обзор ядерных технологий. Ниже прилагается доклад нынешнего года, в котором освещаются заметные события, происшедшие в 2014 году.
- Для рассмотрения в "Обзоре ядерных технологий – 2015" выбраны следующие области: энергетические применения, атомные и ядерные данные, применения ускорителей и исследовательских реакторов, использование ядерных методов для повышения эффективности ветеринарии, успехи в области медицинской радиационной дозиметрии, радиофармпрепараты, изотопы в климатических и гидрологических исследованиях и изучение изменений в морской среде при помощи ядерных методов.
- Окончательный вариант доклада будет подготовлен в свете обсуждения в Совете управляющих и представлен государствам-членам в качестве информационного документа на 59-й очередной сессии Генеральной конференции. Рекомендуется, чтобы Совет рассмотрел и принял к сведению «Обзор ядерных технологий – 2015».
- Информация о деятельности МАГАТЭ, связанной с ядерной наукой и технологией, также содержится в Ежегодном окладе МАГАТЭ за 2014 год (GC(59)/7), в частности в разделе "Технология"; и в докладе о Техническом сотрудничестве за 2014 год (GC(59)/INF/3).
- В данный документ были внесены изменения, с тем чтобы в максимально возможной степени учесть конкретные замечания Совета управляющих и другие замечания, полученные от государств-членов.

Обзор ядерных технологий – 2015

Доклад Генерального директора

Резюме

1. В конце 2014 года во всем мире насчитывалось 438 действующих ядерных энергетических реакторов и общемировая генерирующая мощность АЭС составляла 376,2 ГВт (эл.). Только один реактор был переведен в режим постоянного останова. Пять новых объектов были подключены к энергосетям, и начались работы по строительству трех новых реакторов. Как и прежде, перспективы роста в краткосрочной и долгосрочной перспективе связывались прежде всего с Азией, особенно с Китаем. Из всех строящихся реакторов, которых насчитывалось 70, 46 находились в Азии, и там же размещались 32 из 40 реакторов, которые были подключены к энергосетям с 2004 года.
2. Сегодня ядерно-энергетические мощности существуют в 30 странах, и примерно такое же число стран изучают возможность включения ядерной энергетики в национальную структуру энергопроизводства, строят соответствующие планы или уже активно работают над этим. Из 30 стран, эксплуатирующих АЭС, 13 либо сооружают новые станции, либо активно завершают ранее приостановленные проекты строительства, а 12 планируют построить новые станции или завершить приостановленные проекты строительства. Ряд стран, принявших решение о создании ядерно-энергетического комплекса, находятся на продвинутых стадиях подготовки инфраструктуры.
3. По прогнозам, составленным Агентством в 2014 году, к 2030 году рост мощностей в секторе ядерной энергетики составит от 8% до 88%. Рост населения и спроса на электроэнергию в развивающихся странах, признание роли ядерной энергии в снижении выбросов парниковых газов, важность бесперебойного энергоснабжения и волатильность цен на органическое топливо указывают на то, что ядерная энергия будет играть важную роль в энергобалансе в долгосрочной перспективе.
4. На атомных электростанциях (АЭС) всего мира продолжали совершенствоваться системы безопасности. Это включало в себя анализ и учет уроков аварии на АЭС "Фукусима-дайти", повышение эффективности глубокоэшелонированной защиты, укрепление потенциала аварийной готовности и реагирования, активизацию работы по созданию потенциала и защиту населения и окружающей среды от ионизирующих излучений.

5. Несмотря на поступившую информацию о крупных затратах на разведку и разработку месторождений, многие новые проекты в области горной добычи были или вскоре будут приостановлены ввиду низких цен на уран. Нетрадиционные урановые ресурсы позволяют дополнительно расширить ресурсную базу, а исследования, посвященные экономически обоснованной добыче урана из морской воды, дают многообещающие результаты.

6. Мировые обогатительные мощности по-прежнему превосходят совокупный годовой спрос, а другие звенья топливного цикла функционируют на более или менее постоянном уровне. С целью содействовать обеспечению гарантированных поставок была проделана большая работа над финансовыми, юридическими и техническими механизмами, необходимыми для создания банка низкообогащенного урана (НОУ) МАГАТЭ в Казахстане.

7. Практически всем государствам-членам приходится иметь дело с той или иной формой радиоактивных отходов. На Научном форуме, состоявшемся в ходе 58-й очередной сессии Генеральной конференции Агентства, была подчеркнута необходимость выработки всеобъемлющего, комплексного, охватывающего весь жизненный цикл подхода к обращению с радиоактивными отходами и особо отмечен тот факт, что практические решения для этого уже найдены.

8. Поскольку во многих государствах-членах принятие политических решений по поводу обращения с отработавшим топливом было отложено, мировой объем находящегося на хранении отработавшего топлива продолжал возрастать. В 2014 году со всех АЭС в виде отработавшего топлива было сброшено около 10 000 т тяжелого металла (ТМ), в результате чего суммарный объем ТМ составил примерно 380 500 т, из которых примерно 258 700 т хранилось на реакторе либо вне реакторных установок.

9. Значительный опыт вывода из эксплуатации, накопленный с начала нынешнего столетия, станет подспорьем в масштабной работе, которую предстоит проделать в этой области в предстоящие годы. Во всем мире 149 ядерных энергетических реакторов были окончательно остановлены либо выводятся из эксплуатации; 17 из них уже окончательно выведены из эксплуатации. Несколько более половины всех действующих реакторов находятся в строю уже более 30 лет, а около 14% из них – более 40 лет. Хотя некоторые из них могут продолжать работать до 60 лет, многие 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 и несколько сотен других ядерных установок, таких, как установки для обращения с радиоактивными отходами и установки топливного цикла.

10. Аналогичным образом, некоторые страны накопили надлежащие технические ресурсы и экспертные знания в области реабилитации территорий, затронутых прошлой деятельностью и авариями, но многие национальные программы по-прежнему сталкиваются с серьезными трудностями, мешающими осуществлению программ реабилитации. Япония добилась больших успехов в реабилитации территорий, затронутых аварией на АЭС "Фукусима-дайти", и была налажена хорошая координация между деятельностью по реабилитации, с одной стороны, и усилиями по реконструкции и возрождению территорий – с другой. Особое значение имеет обмен опытом реабилитационных мероприятий с международным сообществом.

11. Международные круги, работающие с ядерными данными, приступили к объединению файлов оцененных ядерных данных – краеугольного камня всех ядерных технологий – в рамках проекта Агентства по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ/ОЭСР) под названием "Совместная международная организация библиотек

оцененных данных". Это предполагает создание единых файлов по наиболее важным элементам, а именно водороду, кислороду, железу и старшим актинидам, которые могут использоваться во всех оценочных проектах для всех нужд.

12. В 2014 году в Европе было начато осуществление двух крупных проектов по ускорителям. Новая многоцелевая экспериментальная установка Агентства, представляющая собой конечный блок тракта пучка рентгеновской флюоресценции в лаборатории "Элеттра" в Триесте, Италия, откроет доступ к современной синхротронной установке для групп исследователей из государств-членов, особенно развивающихся.

13. Большинство из 247 действующих исследовательских реакторов и критических установок по-прежнему используются крайне неэффективно, а средний срок их службы составляет свыше 45 лет. В шести странах сооружаются новые установки, а в ряде других разрабатываются планы или изучается вопрос о строительстве новых установок. Такие инициативы, как "Реакторная интернет-лаборатория" и создание международного центра МАГАТЭ на базе исследовательского реактора, призваны содействовать развитию международного сотрудничества в области образования и подготовки кадров, а также эффективного использования подобных установок.

14. Хотя в 2014 году крупного дефицита медицинского изотопа молибден-99 не отмечалось, эксплуатационные проблемы на перерабатывающих установках и старых исследовательских реакторах по-прежнему возникали.

15. Во всем мире продолжалась деятельность по минимизации использования высокообогащенного урана (ВОУ) в гражданском ядерном секторе, и сегодня 92 из 200 исследовательских реакторов, охватываемых американской Инициативой по сокращению глобальной угрозы (ИСГУ), переведены на низкообогащенное урановое (НОУ) топливо или официально остановлены. К концу 2014 года программы возврата ВОУ топлива американского и российского происхождения были выполнены на 76% и 85%, соответственно.

16. Лаборатории ядерных применений Агентства в Зайберсдорфе, близ Вены, содействуют повышению доступности мирных ядерных технологий для государств-членов с 1962 года. Большая часть такой помощи предоставляется по линии программы технического сотрудничества МАГАТЭ в форме прямого удовлетворения потребностей государств-членов в таких областях, как продовольствие и сельское хозяйство, здоровье человека, земная среда и ядерные контрольно-измерительные приборы. Новая инициатива Агентства – проект реконструкции лабораторий ядерных применений (ReNuAL) – это первая полная реконструкция лабораторий со времени их создания. Цель проекта – модернизация лабораторий и оснащение их всем необходимым для того, чтобы они помогали государствам-членам в решении глобальных задач развития в предстоящие два десятилетия.

17. Ядерные и смежные технологии играют важную роль в охране здоровья животных, особенно в контексте диагностики заболеваний и изучения свойств патогенных организмов.

18. Важным средством защиты животных и людей от болезней являются вакцины. Недавние успехи в области облучения вакцин позволяют создавать метаболически активные, но нереплицирующиеся вакцины, которые тем самым вызывают реакцию иммунной системы, схожую с воздействием живого патогена.

19. Для борьбы с распространением трансграничных заболеваний важнейшее значение имеет их ранняя, оперативная диагностика. Хотя ферменты и флуоресцентные красители и эффективны с точки зрения диагностики и удобны для использования в полевых условиях, в тех случаях, когда необходим высокий уровень чувствительности и избирательности (например, для диагностики птичьего гриппа H5N1, ящура, лихорадки Рифт-Валли или африканской чумы свиней), требуется применение ядерных методов.

20. С появлением технологий, основанных на амплификации нуклеиновых кислот (например, полимеразной цепной реакции), значительно улучшилась диагностика инфекционных болезней. Главное преимущество этих технологий состоит в том, что в организме животных могут быть выявлены крайне низкие уровни инфекции, что позволяет обнаружить патоген прежде, чем разовьется болезнь. Раннее обнаружение патогенов важно для предупреждения вспышек таких болезней, как геморрагическая лихорадка Эбола (ГЛЭ), сильнейшая вспышка которой произошла в Западной Африке в 2014 году. Агентство включилось в международные усилия, оказав помощь африканским государствам-членам в создании или укреплении национального и регионального потенциала и наладив взаимодействие в вопросах применения быстрых и точных лечебно-диагностических методов. Одна из таких технологических платформ – полимеразная цепная реакция с обратной транскрипцией (ОТ-ПЦР) – признана одним из быстрых и эффективных методов диагностики ГЛЭ.

21. Метод анализа стабильных изотопов (АСИ) может использоваться как средство для изучения эпидемиологии зоонозных заболеваний. Использование стабильных изотопов для характеристики той или иной популяции предполагает изучение изотопных сигнатур у нескольких репрезентативных для всей популяции особей. Если известен изотопный профиль той или иной конкретной популяции, любые особи из ее состава могут дать информацию о глобальной миграции этого вида.

22. Эффективное измерение дозы облучения, которой подвергается пациент во время лучевой терапии и диагностики, важно как для проверки того, соответствуют ли лечебные процедуры предписаниям, так и для оценки риска, связанного с радиационным облучением пациентов в ходе сеансов медицинской визуализации.

23. Диагностическая визуализация с использованием рентгеновского излучения применяется в различных видах обследований: от простой проекционной рентгенографии до усовершенствованной динамической томографической визуализации. Результатом этого стало появление широкого ряда дозиметрических величин, измерительных приборов и методов, все из которых связаны с определенным риском для лиц, работающих в клиниках.

24. Одним из ключевых условий для проведения лучевой терапии является наличие последовательных референтных дозиметрических эталонов и процедур. В настоящее время разрабатываются новые нормы и руководства с учетом последних достижений в развитии методов и технологий лучевой терапии.

25. В последнее время стали шире применяться методы лучевой терапии с использованием малых полей, что усиливает неопределенность в сфере клинической дозиметрии и ставит под сомнение уместность применения существующих референтных дозиметрических протоколов, которые разрабатывались для более крупных полей. В настоящее время разрабатывается свод положений по дозиметрии, который позволит стандартизировать дозиметрию малых полей.

26. Предпочтительным видом дозиметра для калибровки радиоактивных источников, которые используются в брахитерапии, являются калиброванные камеры колодезного типа. При этом не имеется согласованных на международном уровне руководящих принципов гарантии/контроля качества всех источников, используемых в брахитерапии, а также соответствующих рекомендованных дозиметрических приборов. Прилагаются усилия к установлению стандартов измерения поглощенной дозы в воде, чтобы гармонизировать их со сводами положений о дозиметрии в дистанционной лучевой терапии.

27. Достигнуты впечатляющие успехи в разработке технологий производства радиоизотопов, позволивших сделать более доступными ряд новых радионуклидов, включая галлий-68, медь-64, цирконий-89 и цинк-63, и облегчивших разработку основанных на использовании ускорителей технологий для коммерческого производства технеция-99m, который остается наиболее популярным диагностическим радионуклидом. Наличие новых радиоизотопов для использования в медицине может открыть путь к решению еще не изученных клинических проблем. Эти разработки радикально меняют положение в области ядерной медицины.

28. Задача обеспечения доступа к безопасной питьевой воде, а также достаточного снабжения пресной водой для санитарных нужд, производства продуктов питания и электроэнергии сохраняет свою актуальность для многих стран. В последние годы новые изотопные инструменты и подходы в сочетании с инновационными аналитическими разработками способствовали существенному расширению применения природных изотопов для изучения, мониторинга и оценки воздействия изменения климата на водные и другие природные ресурсы.

29. Комплексные, научно обоснованные оценки водных ресурсов крайне важны для устойчивого развития. Появление более простых, дешевых и не требующих частого технического обслуживания лазерных инструментов способствует расширению применения стабильных изотопов. В ближайшем будущем ожидается дальнейший рост спроса на новые изотопные инструменты для датировки подземных вод, требующей более сложных аналитических методов для измерения изотопов инертных газов и долгоживущих радионуклидов.

30. Увеличение концентрации диоксида углерода (CO_2) в атмосфере все больше влияет на состояние морской среды. Радионуклиды — это мощные инструменты для изучения изменений круговорота углерода и воздействия этих изменений на морскую флору и фауну. Они также могут применяться для реконструкции изменений химического состава морской воды в прошлые геологические эпохи, которая позволяет проанализировать нынешние изменения и их потенциальное влияние на состояние океанов в будущем.

31. Когда океанская вода поглощает CO_2 , она подкисляется, что, в свою очередь, влияет на морские организмы. Радиоизотопы используются для изучения изменений в процессах, происходящих в морских организмах, таких, как кальцификация, биоминерализация и метаболизм, в связи с таким повышением кислотности.

32. Ядерные методы и методы стабильных изотопов используются для реконструкции прошлых событий, связанных с загрязнением, отслеживания тенденций в загрязнении и оценки эффективности мер по борьбе с ним. Они также используются для изучения наземных источников загрязнения питательных веществ, которые вызывают эвтрофикацию прибрежных зон, проведения различия между антропогенными и природными концентрациями загрязнителей, выявления источников загрязнения для криминалистических исследований загрязнения, а также для выявления биотоксинов, связанных с вредоносным цветением водорослей.

33. Загрязнение прибрежных вод нефтепродуктами — это глобальная экологическая проблема, обусловленная выбросами нефтяных углеводородов. Возрастает потребность в чувствительных и надежных методах мониторинга нефтяного загрязнения и его воздействия, а также в разработке методов, которые позволяют регулирующим органам выяснить происхождение нефтяного загрязнения. Для более точной локализации следов нефтяных пятен в целях отслеживания источников нефти в морской среде применяется анализ содержания стабильного изотопа углерода в нефтяных углеводородах в сочетании с химическими методами.

Обзор ядерных технологий – 2015

Основной доклад

А. Энергетические применения

А.1. Ядерная энергетика сегодня

1. По состоянию на 31 декабря 2014 года в мире эксплуатировалось 438 ядерных энергетических реакторов суммарной мощностью 376,2 ГВт (эл.)¹ (см. таблицу А-1). Это немногим больше – примерно на 4,5 ГВт (эл.) – суммарной мощности 2013 года.
2. Из общего числа находящихся в эксплуатации реакторов приблизительно 81,5% – это реакторы с легководным замедлителем и теплоносителем, 11,2% – реакторы с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем, 3,4% – легководные реакторы с графитовым замедлителем и 3,4% – газоохлаждаемые реакторы (рис. А-1). Две установки представляют собой быстрые реакторы с жидкометаллическим теплоносителем.

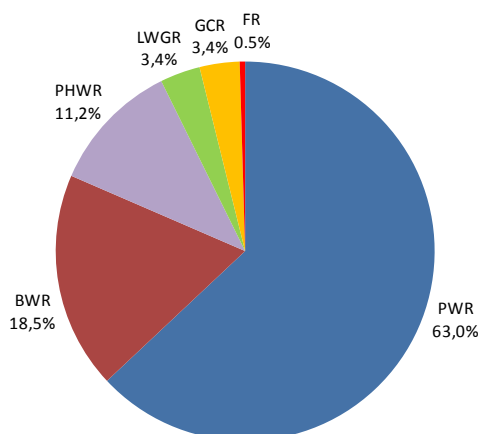


РИС. А-1. Распределение реакторов по типам в настоящее время (BWR – кипящий реактор; FR – быстрый реактор; GCR – газоохлаждаемый реактор; LWGR – легководный реактор с графитовым замедлителем; PHWR – корпусной тяжеловодный реактор; PWR – реактор с водой под давлением).

3. В Японии все 48 действующих реакторных блоков работали в 2014 году в автономном режиме. В ноябре 2014 года губернатор префектуры Кагосима дал разрешение на повторный пуск блоков 1 и 2 АЭС "Сэндай", которые стали первыми энергоблоками в стране, допущенными к эксплуатации ядерным регулирующим органом в соответствии с новыми нормами безопасности, введенными после аварии на АЭС "Фукусима-дайити" в марте 2011 года. В декабре 2014 года Управление по ядерному регулированию в Японии одобрило повторный запуск реакторных блоков 3 и 4 на АЭС "Такахама".

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

4. В 2014 году к энергосети были подключены пять новых реакторов: "Атуча-2" (692 МВт (эл.)) в Аргентине, "Ниндэ-2" (1018 МВт (эл.)), "Фуцин-1" (1000 МВт (эл.)) и "Фанцзяшань-1" (1000 МВт (эл.)) в Китае и "Ростов-3" (1011 МВт (эл.)) в России. Строительство реакторного блока "Атуча-2" первоначально было начато в 1981 году, но было отложено и возобновлено только в 2009 году.

5. В 2014 году только один реактор был переведен в режим постоянного останова. Одноблочная АЭС "Вермонт янки", США, прекратила коммерческое функционирование 29 декабря 2014 года по финансовым соображениям.

6. В 2014 году было начато строительство только трех объектов: энергоблока 2 Белорусской АЭС в Беларуси, "Барака-3" в Объединенных Арабских Эмиратах (ОАЭ) и CAREM-25 – маломощного LWR интегрального типа с водой под давлением в Аргентине

7. По состоянию на 31 декабря 2014 года на стадии строительства находилось 70 реакторов. Как и в предыдущие годы, расширение мощностей, а также развитие ядерной энергетики в кратко- и долгосрочной перспективе происходили преимущественно в Азии (рис. А-2), прежде всего в Китае. Из общего числа строящихся реакторов 46 располагаются в Азии, и там же находятся 32 из 40 новых реакторов, подключенных к энергосети с 2004 года.

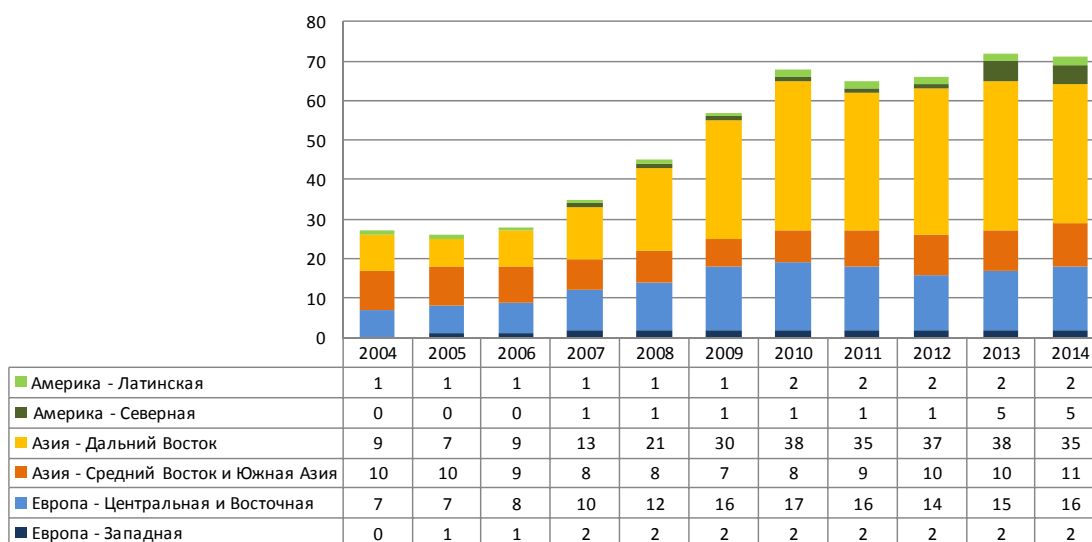


РИС. А-2. Число строящихся реакторов по регионам.

8. В 2014 году несколько стран существенно продвинулись в работе по созданию своей первой АЭС. В ОАЭ Федеральное управление по ядерному регулированию одобрило заявку Ядерно-энергетической корпорации Эмиратов на строительство еще двух энергоблоков на площадке Барака. Блоки 1, 2 и 3 АЭС "Барака" уже сооружаются и должны быть введены в эксплуатацию к 2017, 2018 и 2020 годам, соответственно.

9. В Беларуси в апреле 2014 года была произведена первая заливка бетона в основание второго блока и начат этап строительства надземных сооружений блока 1. Эти два блока представляют собой реакторы ВВЭР-1200, которые будут сооружаться по контракту с компанией "Атомстройэкспорт" (Российская Федерация), подписанному в июле 2012 года.

10. Турция продолжает развивать инфраструктуру для своей ядерно-энергетической программы. В декабре 2014 года министерство окружающей среды и городского планирования одобрило результаты оценки воздействия на окружающую среду четырех

блоков ВВЭР-1200, намеченных к сооружению в Аккую. В октябре 2014 года турецкий регулирующий орган привлек организацию технической поддержки для помощи в изучении и оценке заявки на выдачу лицензии на строительство в Аккую, которая должна быть подана в 2015 году. После подписания межправительственного соглашения с Японией в 2013 году Турция также ведет работы по второму проекту АЭС в Синопе и в сотрудничестве со своими партнерами приступила к обследованию площадки и подготовке технико-экономического обоснования.

11. В январе совет министров Польши подтвердил решение о включении в структуру энергопроизводства ядерных установок мощностью примерно 6000 МВт (эл.), причем первый из блоков планируется ввести в строй к 2024 году.

12. В 2013 году Вьетнам подготовил технико-экономическое обоснование для двух площадок под строительство в Ниньтхуане АЭС суммарной мощностью 4000 МВт (эл.). В ноябре 2014 года Вьетнам принял у себя повторную миссию по комплексному рассмотрению ядерной инфраструктуры (ИНИР), которая высказала замечания относительно хода реализации мер по развитию его ядерной инфраструктуры. Кения, Марокко и Нигерия подали официальные заявки на проведение миссий ИНИР в 2015 году.

13. Ряд стран, принявших решение о создании ядерно-энергетического комплекса, находятся на продвинутых стадиях подготовки инфраструктуры. После подписания Бангладеш в 2011 году межправительственного соглашения с Российской Федерацией о сотрудничестве в строительстве двухблочной АЭС "Рооппур" в 2013 году в стране начались работы по подготовке площадки, а само строительство предполагается начать в 2016 году. В октябре 2013 года Иордания выбрала российскую компанию "Атомстройэкспорт" в качестве предпочтительного подрядчика и в настоящее время ведет работу по характеристике площадки Амра. В августе 2014 года миссия ИНИР заключила, что Иордания продвинулась вперед в создании ядерной инфраструктуры, и вынесла рекомендации по дальнейшим действиям.

14. Ряд стран продолжают изучать возможность создания ядерной энергетики. Некоторые активно готовятся к принятию обоснованного решения о возможной реализации ядерно-энергетической программы, а ряд стран разрабатывают национальные энергетические стратегии с возможным включением в энергобаланс ядерной энергетики. На этом этапе в центре внимания находится создание комплексной правовой и регулирующей инфраструктуры, необходимой для ядерно-энергетической программы, наряду с подготовкой требуемых кадровых ресурсов.

15. Важную роль в обеспечении постоянного наличия компетентных специалистов для безопасного, надежного и устойчивого управления ядерно-энергетической программой или ее свертывания по-прежнему играет создание потенциала. Значение работы по созданию потенциала было также подчеркнуто в Плане действий МАГАТЭ по ядерной безопасности (утвержденном Генеральной конференцией в 2011 году), содержащем призыв к тому, чтобы государства-члены, имеющие ядерно-энергетические программы, а также те, кто планирует начать реализацию такой программы, укрепляли, развивали, сохраняли и осуществляли свои программы по созданию потенциала. На Международной конференции Агентства по развитию людских ресурсов для ядерно-энергетических программ: создание и поддержание потенциала, состоявшейся в Вене в мае 2014 года, более 300 участников из 65 государств-членов и 5 международных организаций обсудили глобальные проблемы создания потенциала и подчеркнули важность обеспечения устойчивого притока в отрасль квалифицированных кадров.

Таблица А-1. Действующие и строящиеся ядерные энергетические реакторы в мире
(по состоянию на 31 декабря 2014 года)^а

СТРАНА	Действующие реакторы		Строящиеся реакторы		Электроэнергия, произведенная на АЭС в 2014 году		Общий опыт эксплуатации за период до 2014 года	
	Число энерго-блоков	Всего МВт (эл.)	Число энерго-блоков	Всего МВт (эл.)	ТВт·ч	% от общего объема производства	Годы	Месяцы
АРГЕНТИНА	3	1 627	1	25	5,3	4,1	73	2
АРМЕНИЯ	1	375			2,3	30,7	40	8
БЕЛАРУСЬ			2	2 218				
БЕЛЬГИЯ	7	5 927			32,1	47,5	268	7
БОЛГАРИЯ	2	1 926			15,0	31,8	157	3
БРАЗИЛИЯ	2	1 884	1	1 245	14,5	2,9	47	3
ВЕНГРИЯ	4	1 889			14,8	53,6	118	2
ГЕРМАНИЯ	9	12 074			91,8	15,8	808	1
ИНДИЯ	21	5 308	6	3 907	33,2	3,5	418	6
ИРАН, ИСЛАМ. РЕСП.	1	915			3,7	1,5	3	4
ИСПАНИЯ	7	7 121			54,9	20,4	308	1
КАНАДА	19	13 500			98,6	16,8	674	6
КИТАЙ	23	19 007	26	25 756	123,8	2,4	181	7
КОРЕЯ, РЕСПУБЛИКА	23	20 717	5	6 370	149,2	30,4	450	1
МЕКСИКА	2	1 330			9,3	5,6	45	11
НИДЕРЛАНДЫ	1	482			3,9	4,0	70	0
ОБЪЕДИНЕННЫЕ АРАБСКИЕ ЭМИРАТЫ			3	4 035				
ПАКИСТАН	3	690	2	630	4,6	4,3	61	8
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ	34	24 654	9	7 371	169,1	18,6	1 157	3
РУМЫНИЯ	2	1 300			10,8	18,5	25	11
СЛОВАКИЯ	4	1 814	2	880	14,4	56,8	152	7
СЛОВЕНИЯ	1	688			6,1	37,3	33	3
СОЕДИН. ШТАТЫ АМЕРИКИ	99	98 639	5	5 633	798,6	19,5	4 012	4
СОЕДИНЕН. КОРОЛЕВСТВО	16	9 373			57,9	17,2	1 543	7
УКРАИНА	15	13 107	2	1 900	83,1	49,4	443	6
ФИНЛЯНДИЯ	4	2 752	1	1 600	22,6	34,7	143	4
ФРАНЦИЯ	58	63 130	1	1 630	418,0	76,9	1 990	4
ЧЕШСКАЯ РЕСПУБЛИКА	6	3 904			28,6	35,8	140	10
ШВЕЙЦАРИЯ	5	3 333			26,5	37,9	199	11
ШВЕЦИЯ	10	9 470			62,3	41,5	422	6
ЮЖНАЯ АФРИКА	2	1 860			14,8	6,2	60	3
ЯПОНИЯ	48	42 388	2	2 650	0,0	0,0	1 694	4
Всего ^{б, в}	438	376 216	70	68 450	2 410,4		16 096	10

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 5032 МВт (эл.) в эксплуатации; 2 энергоблока мощностью 2600 МВт (эл.) в стадии строительства;
на АЭС выработано 40,8 ТВт·час электроэнергии, что составляет 18,9% общего производства электроэнергии;

в. 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 (200 лет, 1 месяц).

16. Наличие контрафактных, поддельных и подозрительных товаров (КППТ) становится все более острой проблемой для эксплуатирующих организаций и регулирующих органов; фиксируются случаи появления на рынке КППТ и соответствующих сертификатов качества. В некоторых случаях использование КППТ оборачивалось для действующих или строящихся АЭС серьезными экономическими проблемами, включая временный останов станции. Эксплуатирующие организации принимают все более широкий круг превентивных мер, включая расширение учебно-разъяснительной работы, установление более жестких требований к закупкам и проведение более строгих инспекций, а также сокращение использования услуг посредников. Регулирующие органы все чаще требуют, чтобы их ставили в известность о КППТ, в том числе о тех товарах, которые были выявлены до их применения на станции. Стремясь содействовать решению этой проблемы, в сентябре 2014 года Агентство провело техническое совещание, посвященное закупочной деятельности и КППТ. Кроме того, оно приступило к подготовке руководящих технических материалов по инженерно-техническим аспектам закупок. В них будут содержаться рекомендации о том, как избежать использования КППТ.

17. Из 438 действующих ядерных энергетических реакторов 225 находились в строю 30 и более лет (см. рис. А-3). Для долгосрочной эксплуатации сверх срока, на который выдана лицензия, существуют модели управления жизненным циклом станции. В основе модели, которой придерживаются в США и ряде других государств-членов, лежит идея подачи заявки на продление лицензии. Согласно этой модели, лицензирующий орган выдает лицензию на эксплуатацию на срок до 40 лет, которая может продлеваться на дополнительный период, не превышающий 20 лет, при подаче каждой заявки на продление. На конец 2014 года из 99 эксплуатируемых в США реакторов для 73 было одобрено продление лицензии на 20 лет. Другая модель лицензирования имеет в своей основе процесс периодического рассмотрения безопасности (ПРБ), который применяется в основном к европейским реакторам. Согласно этой модели, лицензиат должен проводить процесс ПРБ регулярно через определенные промежутки времени (обычно раз в десять лет) с целью убедиться в соблюдении условий лицензирования и экологических требований. ПРБ представляет собой всестороннее рассмотрение всех важных аспектов безопасности с целью выявления и устранения недостатков с учетом текущих требований лицензирования. Одной из главных проблем долгосрочной эксплуатации является разработка и осуществление программ управления старением для оценки целостности основных конструкций, систем и оставшегося срока службы критически важных компонентов. Агентство подготовило руководство по программам и множество руководств по управлению старением отдельных компонентов.

18. В 2012 году энергоблоки "Дул-3" и "Тианж-2" в Бельгии были остановлены после того, как в реакторных корпусах были выявлены дефекты. После тщательного обследования и после выполнения регулирующих требований в мае 2013 года они были вновь запущены. Тем не менее дополнительные металлургические испытания вынудили энергопредприятие Электрабель в марте 2014 года остановить их до тех пор, пока не будут устранены неопределенности, касающиеся воздействия нейтронов на механическую прочность стали, из которой изготовлен реакторный корпус. В целях обмена опытом в вопросах целостности конструкции на учебных курсах Агентства в сентябре 2014 года, организованных Центром исследований по энергетике, окружающей среде и технологиям (СИЭМАТ) в Мадриде, Испания, обсуждалась оценка механизмов деградации главных компонентов АЭС.

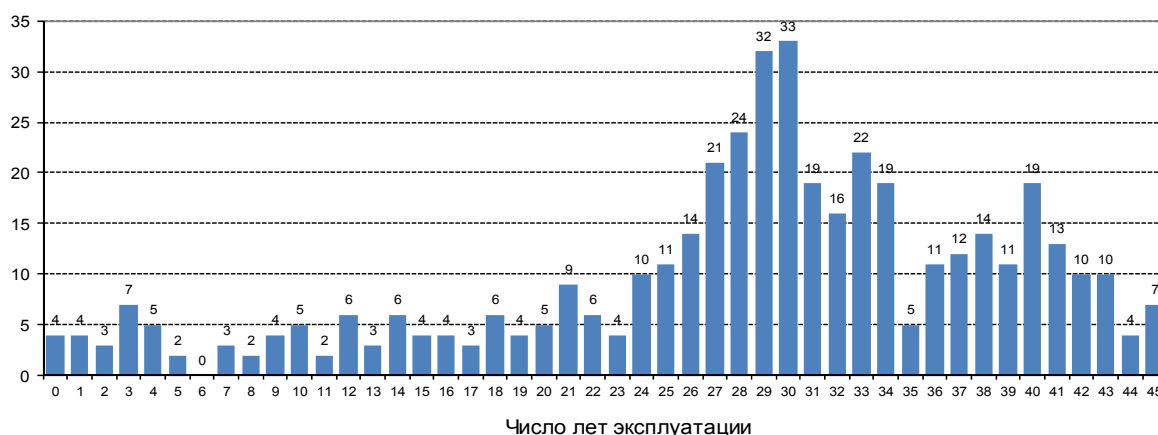


РИС. А-3. Распределение действующих энергетических реакторов по длительности эксплуатации на 31 декабря 2014 года (источник: Информационная система Агентства по энергетическим реакторам <http://www.iaea.org/pris>)

19. Результатом переоценки безопасности по следам аварии на АЭС "Фукусима-дайити" во многих случаях стало увеличение капитальных затрат в целях соблюдения новых регулирующих требований. Это отразится на стоимости выработки электроэнергии на АЭС и может повлиять на экономическую целесообразность долгосрочной эксплуатации. Чтобы оценить экономические последствия, Агентство приступило к подготовке нового технического руководства по методам экономической оценки долгосрочной эксплуатации АЭС.

А.2. Прогнозы развития ядерной энергетики

20. Согласно прогнозам Агентства, составленным в 2014 году, к 2030 году генерирующие мощности АЭС вырастут с текущего уровня в 372 ГВт (эл.) до 401 ГВт (эл.) по низкому прогнозу и до 699 ГВт (эл.) по высокому прогнозу. Эти прогнозы отражают положительный рост на 8% и 88% по низкому и высокому прогнозам, соответственно. Прогнозы 2014 года ниже примерно на 23 ГВт (эл.) по высокому прогнозу и на 34 ГВт (эл.) по низкому прогнозу² по сравнению с прогнозами 2013 года. В числе причин такого снижения – более ранний, чем предполагалось, вывод из эксплуатации реакторов, отсрочки со строительством новых объектов, а также увеличение затрат на внесение дополнительных усовершенствований, связанных с безопасностью. Тем не менее уровень интереса к ядерной энергетике по-прежнему высок в некоторых регионах, особенно в странах с развивающейся экономикой и растущими потребностями в энергии. Этот продолжающийся рост показывает, что фундаментальные факторы, способствующие дальнейшему использованию ядерной энергии, не изменились.

21. Эти прогнозы получены путем агрегирования оценок по отдельным странам. Эксперты принимают в расчет все действующие реакторы, возможное продление лицензий, запланированные остановки и проекты строительства, которые могут быть реально

² В прогнозах учтены как имеющиеся мощности (поставляющие электроэнергию в сеть в настоящее время), так и установленные номинальные мощности (которые имеются, но не поставляют электроэнергию в сеть в настоящее время).

осуществлены в государствах - членах Агентства в ближайшие несколько десятилетий. Прогнозы составляются путем оценки вероятности реализации каждого проекта в свете общих предположений по низкому и высокому сценарию. Они не призваны предугадать развитие событий и охватить весь спектр возможных будущих сценариев – от наименее до наиболее правдоподобного.

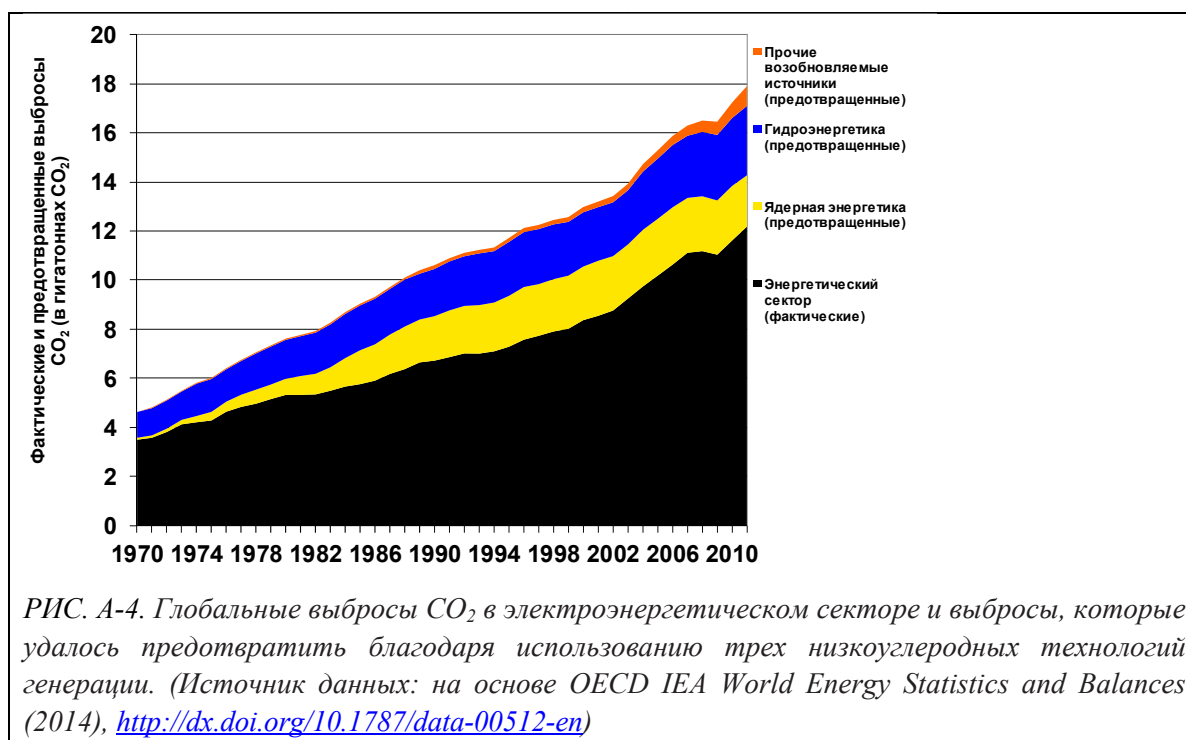
22. В краткосрочной перспективе ожидается, что низкие цены на природный газ и растущий потенциал субсидируемых возобновляемых источников энергии негативно повлияют на перспективы роста ядерной энергетики в некоторых промышленно развитых регионах. Низкие цены на природный газ частично обусловлены низким спросом в силу макроэкономических условий, а также техническим прогрессом. Кроме того, нынешний финансовый кризис продолжает создавать проблемы для таких капиталоемких проектов, как ядерно-энергетические. Эксперты исходили из предположения, что вышеупомянутые проблемы, наряду с аварией на АЭС "Фукусима-дайити", могут временно замедлить процесс строительства некоторых АЭС. Фундаментальные факторы роста населения и спроса на электроэнергию в развивающихся странах, признание роли ядерной энергии в снижении выбросов CO₂, проблемы надежности энергоснабжения и волатильность цен на органическое топливо указывают на то, что в долгосрочной перспективе ядерная энергия продолжит играть важную роль в энергобалансе.

Выбросы CO₂, которые уже удалось предотвратить благодаря ядерной энергетике³

Ядерная энергетика является частью мировой системы энергоснабжения вот уже более 50 лет. Ее дополнительным преимуществом можно считать отсутствие выбросов CO₂. На рисунке А-4 показаны исторические тренды для выбросов CO₂ в глобальном электроэнергетическом секторе и выбросов, которые были предотвращены благодаря использованию гидроэнергетики, ядерной энергетики и других возобновляемых источников энергии. Энергетический сектор в нижней части диаграммы показывает уровень фактических выбросов CO₂, произведенных за последние 40 лет. Приращенные значения, показанные над фактическими, - это выбросы, которые были предотвращены благодаря использованию ядерной энергетики, гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии и которые в 2011 году составили почти 6 гигатонн, т.е. объем выбросов CO₂ уменьшился на треть по сравнению с тем суммарным объемом, каким он был бы в противном случае. Согласно оценкам, чуть больше трети этого уменьшения выбросов CO₂ (2,1 гигатонн) произошло благодаря ядерной энергетике.

Такие оценки предотвращенных выбросов зависят от предположений относительно того, какой источник электроэнергии использовался бы вместо исходного. Для оценки предотвращенных выбросов предполагалось, что произведенное электричество генерировалось бы за счет роста мощностей установок, работающих на угле, нефти и природном газе, соразмерно их соответствующим долям в энергобалансе. Это консервативный подход, поскольку, вероятнее всего, ядерная энергетика пришла бы на смену углю, который в изобилии имеется в странах.

³Дополнительная информация о ядерной энергетике и изменении климата имеется по адресу: <http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/Pess/publications.html>



23. Международное энергетическое агентство (МЭА) Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) также публикует прогнозы мирового развития ядерной энергетики. Согласно центральному сценарию документа МЭА/ОЭСР «World Energy Outlook 2014» («Обзор мировой энергетики – 2014»), называемому «сценарий новой политики», мощность всех АЭС в мире достигнет в 2030 году 543 ГВт (эл.). Этот прогноз принципиально не отличается от прошлогоднего и находится практически посередине между прогнозами МАГАТЭ. На рисунке А-5 сравниваются прогнозы МАГАТЭ 2014 года, сценарии МЭА/ОЭСР 2014 года⁴ и прогнозы ВЯА 2013 года. Высокие сценарии трех организаций на 2020 и 2030 годы дают схожие результаты, тогда как прогнозы по низкому сценарию на 2030 год дают относительно большой разброс значений.

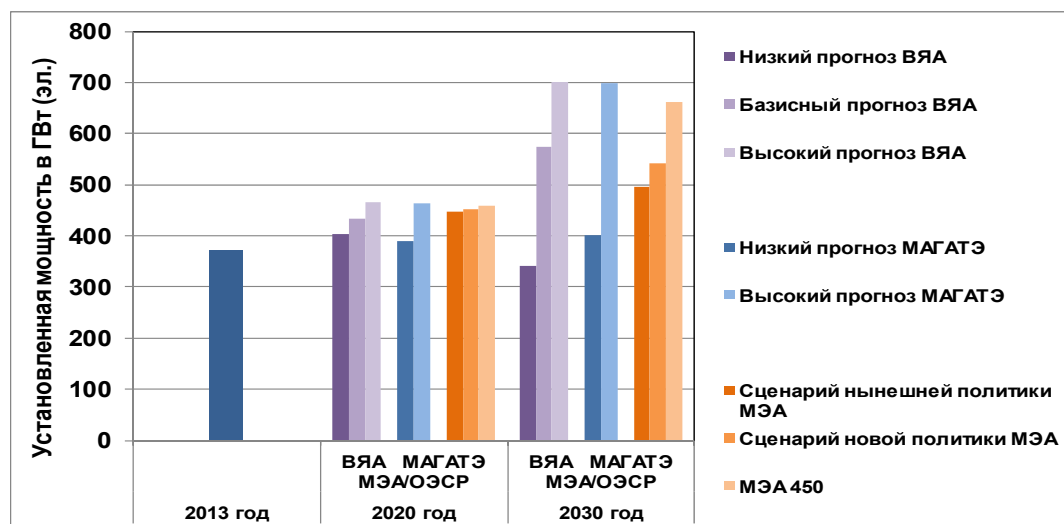


РИС. А-5. Сравнение ядерно-энергетических прогнозов МАГАТЭ с прогнозами МЭА 2014 года (на основе совокупной мощности в ГВт(эл.)) и прогнозами ВЯА 2013 года.

⁴ Данные МЭА/ОЭСР основаны на совокупной мощности в ГВт(эл.).

А.3. Топливный цикл

А.3.1. Ресурсы и производство урана

24. Спотовая цена на уран продолжала снижаться с приблизительно 90 долл./кг U в начале года до 70 долл./кг U в середине года и стала самой низкой за десятилетний период. Однако к августу 2014 года цены снова начали расти и достигли уровня 115 долл./кг U в ноябре 2014 года, прежде чем они снизились немного к концу года. Несмотря на сообщения о крупных затратах на разведку и разработку урановых месторождений, многие новые проекты в области добычи были или, как ожидается, вскоре будут приостановлены.

25. Ресурсную базу дополняют нетрадиционные ресурсы урана. Объемы потенциально извлекаемого урана в качестве второстепенного побочного продукта составляют, согласно текущим оценкам, приблизительно 8 миллионов тонн урана (Мт U). В 2014 году "ФосЭнерджи" объявила о том, что непрерывная эксплуатация демонстрационной установки, работающей на базе процесса "PhosEnergy", свидетельствует о том, что при работе в стационарном режиме достигаются высокие показатели извлечения урана (>92%). Бразильский проект "Санта-Китерия" по добыче фосфатов/урана по-прежнему находится в стадии разработки, и производство планируется начать в 2016 году.

26. Ведутся широкие исследования морской воды в качестве нетрадиционного источника урана. В мировых океанах растворены с весьма низкими концентрациями порядка 3,3 мкг/л (3,3 части на миллиард) приблизительно 4,5 миллиарда тонн урана, что представляет собой огромный энергетический ресурс. Исследования этого потенциального источника продолжаются. Новейшие достижения в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах (НИОКР), проведенных в Министерстве энергетики (МЭ) Соединенных Штатов Америки, позволили добиться сокращения расходов на извлечение примерно на 50% с 1230 долл./кг U до 610 долл./кг U.

27. Мировые ресурсы тория оцениваются примерно в 6-7 миллионов тонн. Хотя торий и используется как топливо на демонстрационной основе, все же для того, чтобы его можно было считать пригодным для коммерческого использования, еще потребуется значительная работа. Ожидается, что на стадию производства в ближайшем времени выйдут несколько проектов по редкоземельным элементам, позволяющих получать торий как побочный продукт и содержащие торий остатки, в частности «Кванефельд» в Гренландии (Королевство Дания). Компания «Тор энерджи» продолжала осуществление в Хальдене, Норвегия, пятилетней программы испытаний ториевого смешанного оксидного (MOX) топлива.

28. По оценкам ВЯА, объемы производства урана составили 58 394 т U в 2012 году и 59 370 т U в 2013 году. Ожидалось, что в 2014 году производственные мощности увеличатся приблизительно до 7530 т U в связи с началом эксплуатации урановых рудников «Сигар-Лейк» в Канаде и "Фор-Майл" в Австралии, а также началом добычи урана в качестве побочного продукта на никелевом руднике «Талвиваара» (Финляндия) и вводом в эксплуатацию двух новых предприятий по добыче урана методом подземного выщелачивания (ПВ) в Соединенных Штатах Америки. Однако фактическое увеличение будет ниже прогнозирувавшегося уровня из-за приостановки проекта «Талвиваара» и временного прекращения по технологическим причинам операций по добыче на «Сигар-Лейк».

29. Ожидается, что в среднесрочной перспективе доля производства урана методом ПВ, который по-прежнему остается доминирующим методом, будет продолжать расти. По данным ВЯА, в 2013 году доля добычи методом ПВ в мировом производстве составила приблизительно 46%, при этом в основном производство осуществляется в Казахстане (на него приходилось

38% общего объема мирового производства в 2013 году). Из-за неблагоприятных рыночных условий разработка новых месторождений в Казахстане была приостановлена, и объем производства в 2014 году останется на уровне 2013 года, составив 22 500 т U.

30. В марте была начата эксплуатация рудника "Сигар-Лейк" в Канаде. Однако в июле 2014 года в связи с возникновением технологических проблем операции по добыче были временно приостановлены. Годовой объем производства составляет в настоящее время 5000 т U/год и, как ожидается, возрастет до более 8000 т U/год начиная с 2018 года. В октябре 2014 года на горно-обогатительном комбинате "МакКлин Лейк" была произведена первая партия уранового концентрата из руды, добытой на руднике "Сигар-Лейк" (рис. А-6). В настоящее время комбинат подал заявку на получение разрешения увеличить лицензированную производительность до 9200 т U. Ввиду неблагоприятных условий на мировом рынке была официально отозвана заявка на строительство и эксплуатацию новых подземных урановых рудников в рамках "Проекта тысячелетия по добыче урана" в бассейне реки Атабаска на севере провинции Саскачеван.



РИС. А-6. В Канаде на горно-обогатительном комбинате "МакКлин Лейк" была произведена первая партия уранового концентрата из руды, добытой на руднике "Сигар-Лейк". (Фото: корпорация "Камеко")

31. В Намибии из-за ухудшения рыночных условий все действующие рудники и обогатительные предприятия сокращают производство, и, исключая рудник "Хусаб", осуществление всех других проектов по разработке месторождений было остановлено в ожидании более благоприятной рыночной конъюнктуры. Продолжаются строительные работы на руднике "Хусаб", который планируется ввести в эксплуатацию в 2015 году и который, возможно, выйдет на полную производственную мощность 5 770 т U в 2017 году. После короткого перерыва из-за неисправности резервуара для выщелачивания возобновились технологические операции по добыче на руднике "Рессинг". Национальная ядерная корпорация Китая (НЯКК) приобрела 25% уранового рудника "Лангер-Хайнрих" в Намибии.

32. Начало эксплуатации нового рудника "Имурарен" в Нигере, имеющего производственную мощность 5 000 т U, который планировалось ввести в эксплуатацию в 2015 году, по-видимому, будет отложено до 2017 года из-за условий рынка. Уже в 2017 году может быть начата добыча в рамках проекта "Мадауэла" с производительностью 1040 т U/год при запасах 39 600 т U плюс 11 260 т U месторождения "Мириам", которое может разрабатываться открытым способом.

33. В мае 2014 года в результате падения рыночных цен было остановлено производство на урановом руднике "Каелекера" фирмы "Паладин" в Малави. При условии улучшения ценовой рыночной ситуации производство может быть возобновлено в течение примерно девяти месяцев. По урановому месторождению "Летлхакане" в Ботсване проводится детальное

технико-экономическое обоснование, которое планируется завершить в 2015 году, при этом начало производства ожидается в 2017 году. Завершено аналитическое исследование по урановому проекту "Регибат" в Исламской Республике Мавритания.

34. В Австралии компания «Квазар ресорсиз» начала операции по добыче урана методом ПВ на месторождениях «ФорМайл Ист». Управление по охране окружающей среды шт. Западная Австралия рекомендовала к государственному утверждению совместный проект "Камеко" и "Мицубиси" на месторождении "Кинтайр". Принятие решения о разработке будет зависеть от будущих рыночных условий. В июне 2014 года были возобновлены операции по переработке накопленных запасов руды на руднике "Рейнджер", на котором произошел прорыв бака выщелачивания в конце 2013 года. В 2015 году планируется начать производство на участке "Рейнджер-3 Дипс". На карьере "Олимпик-Дэм" планируется провести пробные работы по кучному выщелачиванию медных и урановых руд в качестве низкзатратной альтернативы первоначальному плану, осуществление которого было прекращено в 2012 году.

35. В США в 2014 году в шт. Вайоминг начато производство в рамках проекта "Лост Крик".

36. В 2015 году Бразилия намеревается начать новые открытые горные разработки на месторождениях "Энхеньо". Ожидается, что этот рудник будет производить примерно 286 т U в год. Переработка руды будет осуществляться на комбинате "Каэтите", который также планируется расширить, увеличив суммарное производство до 670 т U/год начиная с 2015 года.

37. В Турции были завершены предварительные технико-экономические исследования по проекту ПВ "Темрезли" и выданы необходимые лицензии для разработки. Производство предполагается начать в 2016 году с годовым объемом 385 т U. В апреле 2014 года была выдана базовая лицензия на эксплуатацию уранового месторождения в Реторильо, Испания, которая может быть преобразована в лицензию на установку ядерного топливного цикла, если в процессе лицензирования будет подтверждено соответствие постановлению в ядерной области. Румыния планирует открыть новый урановый рудник на востоке страны ввиду истощения ресурсов на действующем руднике в Сучаве.

38. Иордания планирует инвестировать 140 млн долл. в проект по добыче урана после объявления о переоценке ресурсов в центральной части страны. Первоначальный объем производства в рамках этого проекта составит 300-400 т U/год с возможностью его наращивания до 1500 т U/год, и ожидается, что эксплуатация начнется через 4-5 лет.

39. В Гренландии (Королевство Дания) осуществляется технико-экономическое исследование по оценке добычи урана, редкоземельных элементов и цинка в районе Кванефельд. В случае реализации проекта в соответствии с планом ожидается, что начиная с 2016 года объемы производства будут составлять 425 т урана в год в качестве побочного продукта.

40. Исламская Республика Иран объявила о том, что урановый рудник в Саганде находится на заключительном этапе процесса подготовки. Уран будет добываться открытым и подземным способами, и переработка извлеченной руды будет осуществляться на комбинате вблизи Ардакана.

41. Согласно оценке ВЯА, добыча урана в 2014 году покрыла примерно 92% расчетного потребления урана реакторами, составляющего 70 015 т U. Это намного больше, чем в предыдущие несколько лет, главным образом вследствие прекращения крупных вторичных поставок из военных запасов в рамках программы, известной как "Соглашение ВОУ-НОУ" или программа "Мегатонны в мегаватты", которая была завершена в 2013 году. Остальные 8% покрывались за счет четырех вторичных источников: запасов обогащенного урана; урана,

переработанного из отработавшего топлива; МОХ-топлива с ураном-235, частично замененного плутонием, полученным из переработанного отработавшего топлива; повторного обогащения хвостов. Исходя из оценочных темпов потребления в 2013 году, срок эксплуатации ресурсов объемом 5,9 Мт U, который представляет собой примерный суммарный объем ресурсов, экономически доступный при нынешних рыночных ценах, составляет 84 года.

А.3.2. Конверсия, обогащение и изготовление топлива

42. В шести странах (Канаде, Китае, Российской Федерации, Соединенном Королевстве, США и Франции) эксплуатируются промышленные установки по конверсии закиси-оксида урана (U_3O_8) в гексафторид урана (UF_6), и небольшие установки по конверсии действуют в Аргентине, Бразилии, Исламской Республике Иран, Пакистане и Японии. Сухая технология отгонки летучих фторидов внедрена в США, в то время как на всех других предприятиях по конверсии применяется мокрый процесс. Суммарные мировые мощности по конверсии остались без изменения и составили примерно 76 000 т U в год в форме UF_6 . В настоящее время совокупный спрос на конверсионные услуги (если предположить, что концентрация урана-235 в хвостах обогащения⁵ равна 0,25%) равен 60 000-64 000 тонн в год.

43. "АРЕВА" во Франции вместо существующего предприятия по конверсии урана "КОМЮРЕКС I", которое планируется закрыть в 2015 году, запускает новый проект "КОМЮРЕКС II", производственные мощности которого будут находиться в Мальвези и Пьерлат. В целях модернизации своего конверсионного производства Топливная компания "ТВЭЛ" Российской Федерации планирует начать в 2015 году строительство нового центра по конверсии на Сибирском химическом комбинате (СХК); ввод в эксплуатацию первой очереди намечен на 2018 год и второй очереди – в 2020 году.

44. В настоящее время совокупные мировые мощности по обогащению составляют приблизительно 65 млн единиц работы разделения (ЕРР) в год, при этом общий спрос составляет приблизительно 49 млн ЕРР в год. Коммерческие услуги по обогащению предоставляются пятью компаниями: НЯКК (Китай), "АРЕВА" (Франция), Государственной корпорацией по атомной энергии "Росатом" (Российская Федерация), "ЮСЭК" (США) и "Уренко" (как в Европе, так и в США). Небольшие установки по обогащению имеются также в Аргентине, Бразилии, Индии, Исламской Республике Иран, Пакистане и Японии. Аргентина модернизирует свой газодиффузионный комплекс в Пильканиеу.

45. В 2014 году вышла на полную мощность вторая очередь завода "УРЕНКО Ю-Эс-Эй" по обогащению урана в шт. Нью-Мексико с объемом производства 3,7 млн ЕРР в дополнение к первой очереди, введенной в эксплуатацию в июне 2010 года, которая достигла своей максимальной проектной мощности 1,6 млн ЕРР в 2012 году. В настоящее время ведется строительство третьей очереди, которая после ее завершения в 2022 году позволит довести суммарную мощность завода до приблизительно 5,7 млн ЕРР.

46. "УРЕНКО Ю-Эс-Эй" является единственным предприятием по обогащению урана в стране. Планируется построить еще три завода по обогащению. "АРЕВА" намеревается построить центрифужный завод производительностью 3,3 млн ЕРР в Игл-Рок, шт. Айдахо. Компания

⁵ Остаточное содержание в хвостах или концентрация урана-235 в обедненной фракции косвенно определяет объем работы, который должен быть выполнен в случае конкретного количества урана для получения данной концентрации в конечном продукте. Более высокое остаточное содержание изотопа в хвостах при данном количестве обогащенного урана и данной концентрации в конечном продукте приводит к уменьшению необходимой степени обогащения, однако при этом возрастают потребности в природном уране и конверсии, и наоборот. Содержание урана в хвостах может широко варьироваться и обуславливать изменение потребностей в услугах по обогащению.

"Глобал лазер эниричмент" планирует построить завод по лазерному обогащению мощностью 6 млн ЕРР в Уилмингтоне, шт. Северная Каролина. Предполагается, что оба завода будут введены в эксплуатацию к 2020 году. Американский центрифужный завод (АЦЗ) компании "ЮСЭК", строительство которого было приостановлено в 2009 году, приступит к осуществлению новой программы НИОКР – Американской программы демонстрации и внедрения технологии центрифугирования, работы по которой будут проводиться до конца 2015 года. Цель этой программы – оказать поддержку реализации технологии американского проекта по созданию центрифужного завода и устранить некоторые технические недостатки, выявленные в 2014 году в центрифугах АЦЗ.

47. Завод по обогащению "Ресенде" бразильской компании "Индустриас нуклеарес ду Бразил" (ИНБ) обеспечит производство 80% обогащенного урана, необходимого в 2015 году для перезагрузки топлива на АЭС "Ангара-1". ИНБ планирует постепенно довести производство до 100%. Осуществляется исследование по удовлетворению потребностей в обогащении топлива для всех бразильских ядерных реакторов.

48. Проводится деконверсия⁶ обедненного UF_6 в оксид урана или UF_4 для долгосрочного хранения обедненного урана в более стабильной форме. В 2014 году совокупные мировые мощности по деконверсии оставались на уровне около 60 000 т UF_6 в год. В настоящее время основными действующими предприятиями являются: завод компании "АРЕВА" в Трикастене, Франция; два завода компании "Ураниум диспозишн сервисиз" в Портсмуте и Падьюка, США; установка "W-ЭХЗ" по деконверсии на "Электрохимическом заводе" (ЭХЗ) в Зеленогорске, Российская Федерация. В США в шт. Нью-Мексико по заказу компании "Интернэшнл айзотопс" строится завод по деконверсии. Компания "Уренко кемплантс", Соединенное Королевство, в 2010 году получила одобрение от регулирующего органа на планирование и строительство предприятия по переработке урановых "хвостов" и наметила осуществить его пуск в 2016 году. На этом предприятии будут перерабатываться имеющиеся у компании "Уренко" европейские запасы побочных продуктов производства обедненного урана, и оно будет состоять из завода по деконверсии UF_6 и нескольких подразделений для хранения, выполнения работ по техническому обслуживанию и переработке остатков.

49. Текущие годовые потребности в услугах по изготовлению топлива для легководных реакторов (LWR) оставались равными приблизительно 7000 тонн обогащенного урана в тепловыделяющих сборках, однако ожидается, что к 2015 году они возрастут примерно до 8000 т U в год. Потребности реакторов PHWR составили 3000 т U в год. В настоящее время существует несколько конкурирующих поставщиков большинства видов топлива. Совокупные мировые мощности по изготовлению топлива составляют примерно 13 500 т U в год (обогащенного урана) по топливу реакторов LWR и около 4 000 т U в год (природного урана) по топливу реакторов PHWR. С целью получения природного уранового топлива для PHWR уран очищается и конвертируется в диоксид урана (UO_2) в Аргентине, Индии, Канаде, Китае и Румынии.

50. В Китае после получения официального разрешения от регулирующего органа на 1-м энергоблоке АЭС "Тяньвань" – водо-водяном энергетическом реакторе (ВВЭР) было начато использование нового топлива ТВС-2М топливной компании "ТВЭЛ"; указанное топливо может эксплуатироваться в активной зоне в длительном 18-ти месячном цикле. Топливо этого типа уже используется в Российской Федерации на Балаковской и Ростовской

⁶ Для изготовления обогащенного уранового топлива обогащенный UF_6 необходимо преобразовать в порошкообразный UO_2 . Это первый шаг в изготовлении обогащенного топлива. Он называется реконверсией или деконверсией.

АЭС. Планируется также перевести на это топливо 2-й энергоблок АЭС "Тяньвань". Топливо ТВС-2М для строящихся 3-го и 4-го энергоблоков АЭС "Тяньвань" будет изготавливаться в Китае на заводе по производству топлива в Ибине.

51. Корпорация "Вестингауз электрик" в США разрабатывает термоакустические нейтронные датчики, устанавливаемые в сборках стержневых ТВЭЛов для контроля распределения мощности и температуры в активной зоне. Эти датчики позволят операторам осуществлять значительно более точный контроль состояния активной зоны, обеспечивая более эффективное использование топлива, а также помогут контролировать дефекты и параметры безопасности топливных стержней. Тестирование прототипа этих устройств будет проведено в 2015 году, и к 2019 году ожидается их широкое коммерческое использование.

52. Компании "Тосиба" и "ИБИДЕН" в Японии разработали новые технологии изготовления компонентов ядерного топлива из карбида кремния с целью создания устойчивого к авариям топлива, в частности, путем замены циркаловых оболочек в легководных реакторах. Разработан прототип крышки топливной сборки, и его тестирование в исследовательском реакторе начнется в 2016 году.

53. Предприятия по рециклированию топлива обеспечивают поставки вторичного ядерного топлива путем использования регенерированного урана (RepU) и МОХ-топлива. В настоящее время в Электростали, Российская Федерация, для компании "АРЕВА" производится приблизительно 100 т RepU в год. На производственной линии завода компании "АРЕВА" в Романе, Франция, производится топливо из RepU в объеме около 80 т тяжелого металла (ТМ) в год для реакторов LWR во Франции. Нынешние мировые мощности по изготовлению МОХ-топлива составляют примерно 250 т ТМ; основной завод расположен во Франции, и несколько предприятий меньшей мощности находятся в Индии, Российской Федерации и Японии.

54. Индия и Российская Федерация производят МОХ-топливо для использования в реакторах на быстрых нейтронах. В Российской Федерации в Железногорске (Красноярск-26) строится завод по изготовлению МОХ-топлива для реактора на быстрых нейтронах БН-800 и имеются также пилотные предприятия в Димитровграде в Научно-исследовательском институте атомных реакторов (НИИАР) и в Озерске в ПО "Маяк". Завод по изготовлению МОХ-топлива в НИИАР недавно был модернизирован и производит виброуплотненное МОХ-топливо. Изготовлена первая партия из 56 сборок МОХ-топлива для 4-го блока Белоярской АЭС с реактором на быстрых нейтронах БН-800, который достиг критичности в этом году. Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии (НИКИМТ-Атомстрой) разработал и изготовил установку дистанционной сварки для линии производства МОХ-топлива. Эта новая система будет использоваться на заводе по изготовлению МОХ-топлива в Железногорске.

55. Начато строительство экспериментального завода по производству топлива для опытного реактора на быстрых нейтронах БРЕСТ-300, который будет построен на СХК в Российской Федерации. Завершены также испытания тепловыделяющей сборки ТВС-5 со смешанным уран-плутониевым нитридным топливом (рис. А-7). Строительство БРЕСТ-300 планируется начать в 2016 году и завершить в 2020 году. БРЕСТ-300 представляет собой реактор со свинцовым теплоносителем, разработанный Научно-исследовательским и конструкторским институтом энерготехники (НИКИЭТ).



РИС. А-7. Тепловыделяющая сборка ТВС-5 – прототип топлива для усовершенствованного реактора БРЕСТ-300. (Фото: СХК)

56. В США на десять лет была продлена лицензия на сооружение частично построенного завода по изготовлению МОХ-топлива на площадке "Саванна-Ривер" в шт. Южная Каролина, и Конгресс США утвердил финансирование для продолжения строительства.

Обеспечение гарантированных поставок

57. В декабре 2010 года Совет управляющих одобрил создание в Казахстане банка низкообогащенного урана (НОУ) МАГАТЭ. С этого момента Секретариат Агентства осуществляет работу по подготовке финансовых, юридических и технических договоренностей для создания банка. Эта работа включает проведение комплексной технической оценки объекта, предлагаемого для размещения Банка НОУ МАГАТЭ. В 2014 году была проведена оценка программного воздействия факторов сейсмической безопасности на весь проект Банка НОУ МАГАТЭ с тем, чтобы определить, может ли геологический разлом, находящийся в непосредственной близости от предполагаемого места размещения Банка НОУ МАГАТЭ, повлиять на безопасность Банка НОУ МАГАТЭ. В ходе этой оценки программных рисков (ОПР), независимая проверка которой была проведена международной консалтинговой компанией по инженерной сейсмологии, был сделан вывод о том, что сейсмическая безопасность Банка НОУ МАГАТЭ может быть обеспечена при помощи надлежащих инженерно-технических мер даже при сценарии экстремального сейсмического события, который был учтен в ОПР. На основе результатов ОПР Агентство и Казахстан с уверенностью заключили, что Банк НОУ МАГАТЭ может быть размещен на территории Ульбинского металлургического завода (УМЗ). Продолжает функционировать запас НОУ в Ангарске, созданный после заключения в феврале 2011 года соглашения между правительством Российской Федерации и Агентством⁷.

А.3.3. Конечные стадии ядерного топливного цикла

58. Для обращения с отработавшим топливом энергетических реакторов используются две различные стратегии. Отработавшее топливо хранится и впоследствии перерабатывается с целью извлечения материала (урана и плутония), пригодного к использованию при изготовлении нового топлива, либо оно хранится в глубинном геологическом хранилище в ожидании захоронения. Рециклирование посредством переработки позволяет сократить размер (объем) подлежащего в конечном итоге удалению ВАО и максимизировать использование делящихся материалов для производства энергии. В настоящее время такие страны, как Индия,

⁷ Другие существующие механизмы гарантированных поставок описаны в «Обзоре ядерных технологий – 2012».

Китай, Российская Федерация, Соединенное Королевство и Франция, перерабатывают отработавшее топливо, тогда как другие страны, например Финляндия и Швеция, отдают предпочтение захоронению отработавшего топлива на территории добровольно принимающих их общин. Большинство стран еще не приняло решения относительно предпочтительной стратегии и в настоящее время поместило отработавшее топливо на хранение и следит за разработками, связанными с обеими стратегиями.

59. Директива 2011/70/Euratom Совета ЕС юридически обязывает государства – члены ЕС устанавливать и поддерживать политику обращения с отработавшим топливом и радиоактивными отходами. В ней указаны правила, которые должны соблюдаться каждым государством - членом ЕС, в частности в отношении национальной базы, соответствующего регулирующего органа, лицензиатов, знаний и навыков, финансовых ресурсов, прозрачности и отчетности. Каждое государство - член ЕС несет основную ответственность за обращение с отработавшим топливом и произведенными в нем радиоактивными отходами. В 2014 году Научный консультативный совет европейских академий (НКСЕА) опубликовал доклад "Management of spent nuclear fuel and its waste" ("Обращение с отработавшим ядерным топливом и его отходами") с целью информирования директивных органов по важным вопросам, которые необходимо учитывать при разработке соответствующих национальных программ. В докладе делается вывод о том, что при принятии политики в области топливного цикла следует учитывать: i) большую продолжительность (более 100 лет) всех топливных циклов и то, что, следовательно, целесообразно вырабатывать надежные технические решения, охватывающие весь процесс, при этом, однако, предусматривая альтернативные варианты, позволяющие при необходимости реагировать на будущие изменения в стратегии и планах; ii) гибкость в выборе будущих вариантов; iii) возможный положительный эффект от рециклирования топлива в реакторах на быстрых нейтронах; iv) национальные или региональные решения в реализации глубокого геологического захоронения; и v) необходимость организации образования и профессиональной подготовки для обеспечения долгосрочного безопасного обращения с отработавшим ядерным топливом.

60. В 2014 году Управление по ядерной энергии МЭ США выпустило окончательный доклад о результатах исследования по вопросам анализа и скрининговой оценки ядерного топливного цикла. Это трехлетнее исследование позволило определить "рамки" (логическую структуру и процессы с набором данных, методов и инструментов), облегчающие процесс принятия решений при проведении НИОКР в области ядерного топливного цикла. Были указаны четыре наиболее перспективных варианта, представляющих собой непрерывные топливные циклы с рециклированием на базе использования реакторов на быстрых нейтронах с топливом на основе урана, и определены НИОКР, необходимые для доработки этих топливных циклов, а также названы 14 других потенциально перспективных топливных циклов, могущих обеспечить повышение показателей.

61. В 2014 году США утвердили новые положения – "Правила длительного хранения отработавшего ядерного топлива", в соответствии с которыми отработавшее топливо может безопасно храниться в бассейнах выдержки отработавшего топлива и контейнерах для сухого хранения сверх предусмотренного в лицензии ресурса реактора до момента размещения ОЯТ в глубинном геологическом хранилище. Эти новые правила и связанное с ними "Заявление об общем воздействии на окружающую среду в связи с длительным хранением отработавшего ядерного топлива" заменяют "Решение, связанное с уверенностью в отношении отходов" и "Правила временного хранения", принятые в 2010 году. Комиссия по ядерному регулированию США (КЯР) возобновит работу по выдаче лицензий на новые реакторы и рассмотрению вопросов продления лицензий на старые реакторы, которая была приостановлена на два года в ожидании новых правил.

62. В Республике Корея независимая группа экспертов подготовила доклад для Государственной комиссии по делам обращения с отработавшим ядерным топливом (ГКДООЯТ), содержащий рекомендацию относительно проведения исследований по различным среднесрочным и долгосрочным методам обращения с ядерным топливом, включая постоянное захоронение, рециклирование, переработку и хранение. Кроме того, группа рекомендовала своевременно построить новые хранилища для временного хранения отработавшего топлива с использованием технологии сухого хранения. ГКДООЯТ является временным консультативным органом, который был создан в 2013 году с целью получения рекомендаций экспертов по различным решениям проблемы обращения с отработавшим топливом и должен представить свои концептуальные рекомендации правительству к июню 2015 года.

63. В 2014 году из всех АЭС было выгружено приблизительно 10 000 т ТМ в виде отработавшего топлива. Совокупный объем отработавшего топлива, которое было выгружено во всем мире, составляет приблизительно 380 500 т ТМ, из которых приблизительно 258 700 т ТМ хранятся в приреакторных или внереакторных хранилищах. Менее одной трети суммарного объема отработавшего топлива, выгруженного во всем мире, было подвергнуто переработке. В 2014 году общемировые промышленные мощности по переработке, сосредоточенные в пяти странах (Индии, Российской Федерации, Соединенном Королевстве, Франции и Японии), составили приблизительно 4800 т ТМ в год. Эти мощности, однако, не используются полностью.

64. В 2014 году предприятие по переработке отработавшего ядерного топлива "Магнокс" в Селлафилде, Соединенное Королевство, отметило 50-летие своей работы. Это предприятие переработало свыше 50 000 т U – столько же, сколько все другие заводы вместе взятые. Ожидается, что оно прекратит работу в 2017 году (рис. А-8).



РИС. А-8. Срок эксплуатации предприятия по переработке отработавшего ядерного топлива "Магнокс" в Селлафилде превысил 50-летний рубеж. (Фото: "Селлафилд, лтд.")

65. Пуск завода по переработке в Роккасё, Япония, который был намечен на 2014 год, будет отложен до 2016 года в целях обеспечения выполнения национальных нормативных требований.

66. В настоящее время расширяется централизованное сухое хранилище отработавшего ядерного топлива в Железнодорожке, Российская Федерация, которое было введено в эксплуатацию в 2012 году. В общей сложности будет три комплекса с суммарной вместимостью около 30 000 т U для хранения отработавшего топлива реакторов большой мощности канального типа (РБМК) и ВВЭР. Вторую очередь для хранения отработавшего

топлива РБМК планируется ввести в эксплуатацию в 2015 году. Ожидается, что в 2021 году вступит в строй перерабатывающий завод РТ-2, предназначенный для переработки топлива РБМК-1000.

67. В 2014 году между НЯКК Китая и "Канду энерджи" Канады было подписано рамочное соглашение о создании совместного предприятия для строительства реакторов CANDU с усовершенствованным топливом (AFCR). Конструкция реакторов AFCR позволит использовать регенерированный уран или торий в качестве топлива, обеспечивая тем самым снижение запасов отработавшего топлива и значительное сокращение потребностей в свежем урановом топливе. Отработавшее топливо четырех обычных реакторов PWR может оказаться вполне достаточным для работы одного блока AFCR (и получения рециклированного плутония для изготовления MOX-топлива).

68. Украина приступила к сооружению централизованного хранилища отработавшего ядерного топлива, которое будет служить в качестве вне реакторного хранилища отработавшего топлива реакторов РБМК-1000 и ВВЭР-440 Южно-Украинской, Ровенской и Хмельницкой АЭС. Этот объект будет построен на площадке между подлежащими переселению селами Старая Красница, Буряковка, Чистогаловка и Стечанка в Чернобыльской зоне отчуждения и будет содействовать экологической реабилитации зоны отчуждения и восстановлению хозяйственной деятельности на некоторых землях в пределах данной зоны. Ввод в эксплуатацию хранилища планируется на 2017 год.

69. 5 ноября 2014 года была завершена выемка в полном объеме 1331 отработавшей тепловыделяющей сборки, хранившейся в бассейне выдержки отработавшего топлива 4-го блока АЭС "Фукусима-дайти". Отработавшее топливо было помещено в общий бассейн для хранения, находящийся на площадке реактора, из которого старые сборки в металлических контейнерах переносятся в сухое хранилище, также расположенное на площадке реактора.

А.3.4. Снятие с эксплуатации, восстановительные мероприятия и обращение с радиоактивными отходами

70. Использование ядерных технологий любого рода – для производства энергии, научно-исследовательской деятельности, медицинских и промышленных применений – налагает обязательство обеспечивать безопасное обращение с образующимися радиоактивными отходами, а также планировать в связи с этим будущие работы по выводу из эксплуатации и восстановлению окружающей среды. Информация о текущем состоянии запасов радиоактивных отходов, т.е. о таких характеристиках, как объемы, места нахождения, условия и свойства, а также понимание будущих тенденций в генерации отходов имеет первостепенное значение для адекватного планирования требующихся объектов и мероприятий по обращению с отходами. Для безопасного обращения с радиоактивными отходами необходимо надлежащее обращение с потоками отходов, их обработка и кондиционирование, а также обеспечение достаточных мощностей по хранению, транспортировке между установками и окончательного захоронения.

71. На Научном форуме, состоявшемся в ходе 58-й сессии Генеральной конференции Агентства, была подчеркнута необходимость выработки всеобъемлющего, комплексного и охватывающего весь жизненный цикл подхода к обращению с радиоактивными отходами и особо отмечен тот факт, что практические решения для его реализации существуют (рис. А-9).

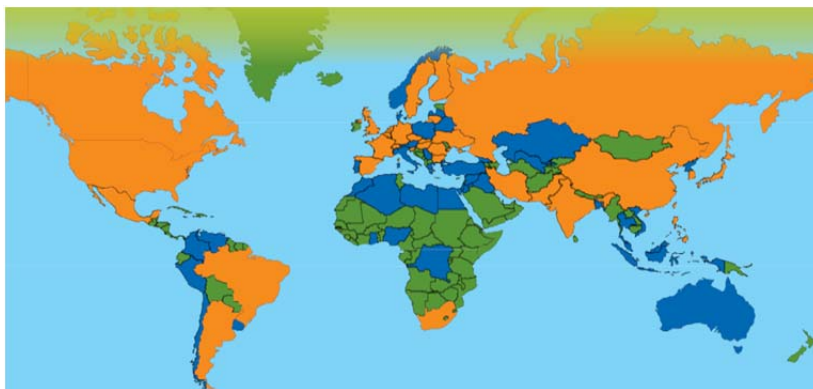


РИС. А-9. Практически всем государствам-членам приходится иметь дело с той или иной формой радиоактивных отходов.

Оранжевым показаны: государства-члены, в которых запасы отходов образуются преимущественно в результате эксплуатации ядерно-энергетических установок.

Синим показаны: государства-члены, в которых запасы отходов образуются преимущественно в результате эксплуатации исследовательских реакторов.

Зеленым показаны: государства-члены, в которых запасы отходов преимущественно состоят из изъятых из употребления закрытых радиоактивных источников.

Оценки мировых запасов радиоактивных отходов

72. Оценки мировых запасов радиоактивных отходов составляются на основе информации, добровольно предоставляемой государствами-членами для включения в Сетевую базу данных по обращению с отходами Агентства (NEWMDB) (таблица А-2). В сотрудничестве с Европейской комиссией и АЯЭ/ОЭСР Агентство приступило к осуществлению проекта "Состояние дел и тенденции" с целью разработки точной, рационализированной национальной процедуры представления информации, которую все государства-члены могли бы использовать для выполнения своих обязательств по передаче информации. В соответствии с этим подходом осуществляется работа по усовершенствованию NEWMDB с целью получения более точных оценок мировых запасов.

73. По состоянию на декабрь 2014 года в мире насчитывалось 467 хранилищ и 154 пункта захоронения отходов для операций по обращению с этими запасами отходов, которые функционировали, приостановили свою работу или были закрыты⁸.

⁸ На основе информации, представленной государствами-членами для включения в базу данных NEWMDB, доступ к которой имеется по адресу <http://newmdb.iaea.org/>.

Таблица А-2. Оценка мировых запасов радиоактивных отходов в 2014 году⁹

Класс отходов	Хранение¹⁰ [кубических метров]	Суммарный объем захоронения [кубических метров]
<i>Очень низкоактивные отходы (ОНАО)</i>	173 000	273 000
<i>Низкоактивные отходы (НАО)</i>	56 703 000	65 192 000
<i>Среднеактивные отходы (САО)</i>	8 745 000	10 589 000
<i>Высокоактивные отходы (ВАО)</i>	2 745 000	72 000

Источник: NEWMDB (2013), официальные национальные доклады и имеющиеся в открытом доступе данные.

Снятие с эксплуатации

74. По состоянию на 31 октября 2014 года в мире эксплуатировалось 438 энергетических реакторов и 149 энергетических реакторов были окончательно остановлены или находились в стадии вывода из эксплуатации, включая 17 полностью выведенных из эксплуатации реакторных установок. Имеется также большое количество установок ядерного топливного цикла: более 300 установок эксплуатируется, около 170 установок окончательно остановлены или находятся в стадии вывода из эксплуатации и 125 установок полностью выведены из эксплуатации. Эксплуатируется 247 исследовательских реакторов, более 180 исследовательских реакторов окончательно остановлены или находятся в стадии вывода из эксплуатации и более 300 исследовательских реакторов и критических сборок полностью выведены из эксплуатации.

75. В нынешнем столетии накоплен значительный опыт проведения работ по выводу из эксплуатации, при этом максимальный прогресс достигнут главным образом в странах, давно осуществляющих ядерно-энергетические программы, в частности в Германии, Испании, Российской Федерации, Соединенном Королевстве, США и Франции. Примерами программ, в рамках которых в 2014 году был достигнут значительный прогресс в деятельности по снятию с эксплуатации, являются: Франция – демонтаж АЭС первого поколения; Испания – сегментация и кондиционирование отходов реактора на АЭС "Хосе Кабрера"; Соединенное Королевство – демонтаж фильтровых галерей вытяжной трубы реактора "Пайл-1" в Уиндскейле, которая подверглась радиоактивному загрязнению во время пожара на реакторе в 1957 году (рис. А-10); США – действующие три программы по выводу из эксплуатации АЭС. Аналогичные проекты также осуществляются в Болгарии, Литве и Словакии, где АЭС были окончательно остановлены еще до окончания их эксплуатационного ресурса.

76. Учитывая, что многие ядерные установки, находящиеся в эксплуатации в настоящее время, были введены в эксплуатацию в 1970-х и 1980-х годах и выработают свой проектный ресурс в течение следующих двух десятилетий, ожидается, что на протяжении последующих нескольких десятилетий необходимо будет выполнять значительный объем работ по выводу объектов из эксплуатации.

⁹ Цифры, указанные в таблице А-2, представляют собой оценки и не являются точными данными о количествах радиоактивных отходов, обращение с которыми в настоящее время осуществляется в мире. Последние корректировки основаны на представленной ранее информации как о запасах, так и об ожидаемых годовых объемах образующихся отходов. Вместе с тем ежегодно возникают неизбежные расхождения в оценке количеств находящихся на хранении отходов вследствие: а) изменений в массе и объеме отходов в процессе обращения с отходами; б) изменений в отчетности и изменений или поправок, вносимых государствами-членами в свои собственные данные; в) включения в базу данных новых государств-членов.

¹⁰ При хранении и до захоронения отходы, как правило, обрабатываются и кондиционируются, а также проходят через различные стадии манипулирования. Поэтому масса и объем радиоактивных отходов подвержены непрерывному изменению в процессе обращения с отходами перед их захоронением. Это может ежегодно приводить к появлению расхождений в оценках количеств находящихся на хранении отходов.

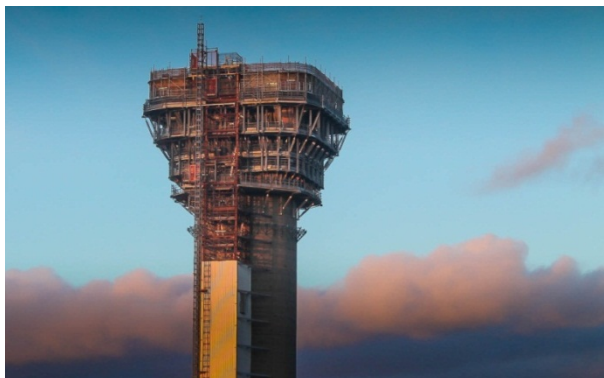


РИС. А-10. Снятие с эксплуатации фильтровых галерей вытяжной трубы реактора "Пайл-1" в Уиндскейле, (фото: "Селлафилд, лтд.")

77. В нескольких странах, в том числе в Украине (Чернобыльская АЭС) и Японии (АЭС "Фукусима-дайити" – см. вставку), сложной задачей является выполнение работ, связанных с выводом из эксплуатации АЭС, которые были остановлены после ядерной аварии. На Чернобыльской АЭС достигнут значительный прогресс в сооружении нового безопасного конфайнмента (НБК). НБК должен быть полностью смонтирован над поврежденным 4-м энергоблоком в 2015 году; основное назначение этой конструкции – предотвратить выход радиоактивных веществ в окружающую среду и обеспечить возможность частичного демонтажа в будущем старых конструкций.

Восстановительные мероприятия

78. Некоторые страны осуществляют работы по рекультивации земель, пострадавших в результате прошлой деятельности и аварий, и накопили в связи с этим соответствующие технические ресурсы и экспертные знания. Многие национальные программы, однако, по-прежнему сталкиваются с серьезными трудностями, мешающими осуществлению восстановительных мероприятий. Завершена работа по составлению базового доклада в рамках Проекта по рассмотрению трудностей при осуществлении программ по снятию с эксплуатации и восстановлению окружающей среды (СИДЕР), начатого в 2013 году с целью оказания помощи в преодолении этих трудностей. В докладе определены препятствия, которые можно подразделить на четыре основные категории: i) национальная политика, правовая и регулирующая база; ii) финансовые трудности, включая материально-техническое обеспечение, ресурсы и рациональное использование имеющихся средств; iii) технологические и инфраструктурные ограничения; iv) проблема участия заинтересованных сторон, которой необходимо уделять большое внимание на протяжении всего цикла планирования и осуществления проектов по выводу из эксплуатации и восстановлению окружающей среды. В целях преодоления некоторых из этих препятствий в базовом докладе также указаны стратегии, которые могут осуществляться с более высокой эффективностью при условии обеспечения тесного взаимодействия между программами. Вместе с тем необходимо также продолжать поиск других инновационных решений.

79. Важным достижением стало создание мобильной группы по определению характеристик объектов. Данная концепция мобильной лаборатории обеспечивает возможность интерактивного взаимодействия при проведении оперативной и эффективной характеристики площадки с моментальной идентификацией в режиме реального времени территорий, представляющих наибольший интерес. Такая группа может быть весьма полезной для государств-членов, не имеющих адекватной инфраструктуры аналитических лабораторий. Кроме того, она может оказывать помощь странам, имеющим аналитические лаборатории, но

сталкивающимся со значительными, непредвиденными проблемами в проведении работы по характеристике объектов. Предоставление услуг группы государствам-членам – это эффективный способ оказания поддержки в характеристике загрязненных объектов, которая является важнейшим этапом в осуществлении проекта восстановительных мероприятий.

**Ликвидация последствий аварии на АЭС "Фукусима-дайти":
Обращение с радиоактивными отходами, вывод из эксплуатации и
восстановительные мероприятия**

Вследствие аварии на АЭС «Фукусима-дайти» возникли серьезные проблемы, связанные с выводом из эксплуатации, осуществлением восстановительных мероприятий и обращением с радиоактивными отходами как на площадке объекта, так и за ее пределами на обширных территориях. Благодаря сотрудничеству с международным сообществом и рекомендациям международных миссий по рассмотрению, проведенных под эгидой Агентства, Японии удалось добиться большого прогресса в этих областях.

Осуществление операций по обращению с оставшимся свежим и отработавшим топливом является одним из наиболее важных мероприятий в рамках подготовки к выводу АЭС из эксплуатации. Извлечение отработавшего и свежего топлива из бассейна выдержки топлива на 4-м блоке и перенос его в общий бассейн на площадке – это важная задача, которая была решена в течение года.

Продвигается работа по применению технологий обработки жидких отходов для удаления радионуклидного загрязнения из почти 400 000 тонн радиоактивно-загрязненной воды, накопившейся на объекте. Цезий удаляется с помощью двух различных ионообменных систем, и недавно Токийская электроэнергетическая компания (ТЕПКО) приступила к использованию передвижной системы по удалению стронция, которая может быть размещена непосредственно в местах образования или хранения отходов. Также была усовершенствована мультисистема удаления радионуклидов, используемая для извлечения стронция и других радионуклидов, оставшихся после удаления цезия. Увеличив производительность с 750 м³/сут до 2000 м³/сут, ТЕПКО планирует ускорить процесс дезактивации постоянно накапливающейся зараженной воды. В отчетном году Научно-исследовательскому институту Мицубиси было поручено провести исследование по новым передовым технологиям дезактивации для удаления цезия и стронция из морской воды в гавани.

В работе по очистке удалось достигнуть хороших результатов. Была обеспечена также хорошая координация восстановительных мероприятий с работой по реконструкции и возрождению территорий. Уроки, извлеченные в результате осуществления восстановительных мероприятий, обобщаются, и важное значение приобретает обмен информацией по ним с международным сообществом. Выводы предусматривают повышение радиационной защиты населения при уделении особого внимания величинам мощности индивидуальной дозы; улучшение информирования о рисках путем опубликования четких сообщений и новых данных о результатах проведенной дезактивации; повышение эффективности и действенности мероприятий по дезактивации; совершенствование комплексной политики защиты населения от нежелательного воздействия ионизирующего излучения, направленной на устранение обеспокоенности общественности и восстановление уверенности в безопасности.

Правительство префектуры Фукусима дало согласие на размещение промежуточного хранилища на площадке вблизи АЭС "Фукусима-дайти". Это позволит перевезти радиоактивные отходы и зараженный грунт из почти 1000 временных мест хранения и сконцентрировать их на одном объекте.

Радиоактивные отходы прежней деятельности

80. Контактная экспертная группа Агентства по международным проектам в области ядерного наследия в Российской Федерации (КЭГ) оказывала содействие эффективному осуществлению международных программ в этой области. К настоящему времени Российская Федерация и ее международные партнеры выполнили работы по выгрузке топлива и демонтажу на 197 выведенных из эксплуатации атомных подводных лодках. Реакторные блоки подводных лодок с выгруженным топливом проходят процесс герметизации, и 76 из них помещены в хранилища для долгосрочного хранения в северо-западном и дальневосточном регионах страны. В декабре 2014 года в северо-западном регионе с помощью Германии завершено строительство регионального центра кондиционирования и хранения всех радиоактивных отходов прежней деятельности (рис. А-11). Разработаны технологии безопасной выгрузки и последующего хранения активных зон реакторов с жидкометаллическим теплоносителем. На предприятии "Маяк" при содействии Франции введена в эксплуатацию горячая камера для работы с неисправными контейнерами, содержащими отработавшее ядерное топливо. Приближаются к успешному завершению совместные международные усилия по выводу из эксплуатации мощных радиоизотопных термоэлектрических генераторов, которые использовались в маяках на морском побережье Российской Федерации. В проведенном в декабре 2014 года МАГАТЭ и председателем КЭГ обзоре завершение деятельности КЭГ предполагается к лету 2015 года.



РИС. А-11. Региональный центр кондиционирования и долгосрочного хранения радиоактивных отходов в северо-западном регионе Российской Федерации (слева) и площадка для хранения реакторных блоков (справа). (Фото: Energiewerke Nord GmbH).

Обработка и кондиционирование радиоактивных отходов

81. Образующиеся радиоактивные отходы должны подвергаться процедурам сокращения объема и преобразовываться в форму, приемлемую для безопасного хранения и захоронения и допускающую их погрузку/разгрузку и транспортировку.

82. Технологии обработки твердых, жидких и газообразных отходов хорошо разработаны и используются во многих государствах-членах. В настоящее время на площадке Национальной лаборатории шт. Айдахо (INL) МЭ США вводится в эксплуатацию новая технология изменения формы отходов в кипящем слое с целью обработки приблизительно 3 300 000 литров жидких высокоактивных отходов, образовавшихся от переработки ВОУ топлива. Все более широкое распространение получает плазменный метод переработки твердых отходов, обеспечивающий высокий коэффициент сокращения объема, и на АЭС "Козлодуй" в Болгарии строится установка для плазменной переработки.

83. Кондиционирование отходов включает иммобилизацию радионуклидов, помещение отходов в контейнеры или использование дополнительных упаковок. Применение геополимерных матриц открывает большие перспективы для иммобилизации потоков

проблемных отходов, таких, как отработавшие органические ионно-обменные смолы, на установке по переработке отходов на АЭС "Богунце", Словакия. Радиоактивные отходы высокого уровня активности необходимо переводить в высокоустойчивую форму, и они, как правило, остекловываются. Вместе с тем для получения формы отходов, необходимой для захоронения 4400 м³ кальцинированных ВАО, находящихся на хранении на территории INL, рекомендован альтернативный метод кондиционирования – горячее изостатическое прессование. В Австралии прорабатываются планы строительства установки по переработке отходов прошлого, нынешнего и будущего производства молибдена-99 и других изотопов, используемых в медицинских целях. Эта установка будет кальцинировать жидкости и иммобилизовать радиоактивные отходы в устойчивый твердый минералоподобный материал (синрок), пригодный для хранения и захоронения.

84. В отношении использовавшихся в прошлом установок заметный прогресс достигнут в Селлафилде, Соединенное Королевство, в связи с началом работ по переупаковке старого очехлованного топлива из бассейна выдержки топлива АЭС "Уиндскейл" (Pile Fuel Storage Pond), а также повторному переводу во взвешенное состояние радиоактивного шлама в бассейне выдержки ОЯТ реакторов "Magnox" первого поколения и открытию нового хранилища капсулированного продукта № 3 для хранения САО.

Захоронение радиоактивных отходов

85. В мире функционируют объекты по захоронению всех категорий радиоактивных отходов, за исключением ВАО и/или отработавшего топлива. В число этих объектов входят пункты траншейного захоронения ОНАО (например, в Испании, США, Франции и Швеции) и НАО в засушливых районах (например, в Аргентине, Индии, США и Южной Африке); приповерхностные инженерные сооружения для НАО (например, в Китае, Индии, Испании, Польше, Словакии, Соединенном Королевстве, Франции, Чешской Республике и Японии); подповерхностные инженерные сооружения для низко- и среднеактивных отходов (НСАО) (например, в Финляндии и Швеции); пункты скважинного захоронения НАО в США; геологические хранилища НСАО (например, в Венгрии и США). Варианты захоронения отходов радиоактивных материалов природного происхождения меняются в зависимости от национальных регулирующих положений и варьируются от пунктов траншейного захоронения до подповерхностных инженерных сооружений (например, в Норвегии).

86. В Финляндии, Франции и Швеции ведется работа по подготовке лицензирования пунктов геологического захоронения ВАО и/или отработавшего топлива.

87. В Канаде продолжается работа по созданию двух глубинных геологических хранилищ. Крупнейшее ядерное энергопредприятие Канады компания "Онтарио пауэр дженерейшн" предлагает построить глубинное геологическое хранилище для своих НАО и САО на ядерной площадке «Брус» в Кинкардине, Онтарио. В настоящее время этот проект находится на рассмотрении федеральных регулирующих органов. Организация по обращению с ядерными отходами (ООЯО), представляющая собой организацию ядерных энергопредприятий Канады, учрежденную в соответствии с Законом об отходах ядерного топлива 2002 года, работает с 11 заинтересованными общинами, с тем чтобы в рамках процесса выбора площадки найти общину, в которой имеется безопасная подходящая площадка и которая хотела бы разместить у себя глубинное геологическое хранилище для долгосрочного обращения в стране с отходами ядерного топлива.

88. Согласно прогнозам Китая, его потребности в геологическом захоронении определяются объемом переработки 140 000 тонн отработанного топлива, источником которого являются 48 реакторов. Захоронение предлагается производить в формации кристаллической или

осадочной вмещающей породы, и в районе Бейшан планируется строительство первой подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ). Результаты, которые ожидается получить в этой ПИЛ, будут способствовать принятию будущих информированных решений по реализации глубинного геологического захоронения.

89. Национальное агентство по обращению с радиоактивными отходами Франции (АНДРА) рассмотрело результаты официального национального процесса общественного участия, организованного в 2013 году, а также информацию, полученную от регулирующего органа. Оно планирует подать заявку на получение лицензии в 2017 году и предусматривает обеспечение более широкого участия заинтересованных сторон в принятии решений и, в частности, в составлении генерального плана работ.

90. В 2014 году Германия учредила новую комиссию с целью исполнения принятого в июне 2013 года закона о выборе площадки для объекта по захоронению тепловыделяющих радиоактивных отходов. Рекомендации этой комиссии, которые, как ожидается, будут представлены к началу 2016 года, должны будут включать критерии выбора площадки и требования, касающиеся участия заинтересованных сторон.

91. В 2014 году правительство Соединенного Королевства опубликовало "Белую книгу" под названием "Implementing Geological Disposal" ("Реализация геологического захоронения"), в которой представлены основы долгосрочного обращения с радиоактивными отходами высокого уровня активности. В этом документе излагается подход к определению потенциальных площадок для геологического захоронения отходов, основанный на взаимодействии с заинтересованными сообществами, включая принятие на начальном двухгодичном этапе мер, направленных на решение вопросов, указанных заинтересованными сторонами в качестве важных.

92. В США в 2014 году произошел ряд важных событий в области геологического захоронения отходов. В своем документе "Safety Evaluation" ("Оценка безопасности")¹¹, КЯР США с разумной степенью уверенности сделала вывод, что МЭ США обеспечивает выполнение регулирующих требований КЯР в отношении безопасности после закрытия объектов.

93. Комиссия независимых экспертов по ядерному будущему Америки признала важную роль, которую концепция глубокого скважинного захоронения может играть в обеспечении безопасного и эффективного захоронения ядерных материалов. Эта концепция предусматривает бурение скважины (или комплекса скважин) в породе кристаллического фундамента на глубину около 5000 м. МЭ США предлагает осуществить демонстрационный проект.

94. Эксплуатация экспериментального комплекса по изоляции отходов МЭ США (WIPP) была внимательно изучена регулирующим органом – Агентством по охране окружающей среды (АООС) в свете двух не связанных между собой событий (рис. А-12). Первый инцидент – пожар грузовика не привел к каким-либо радиологическим последствиям. В ходе расследования были выявлены недостатки в выполнении регулярного технического обслуживания и поддержании надлежащей культуры безопасности при проведении подземных

¹¹ "Safety Evaluation Report Related to Disposal of High-Level Radioactive Wastes in a Geologic Repository at Yucca Mountain, Nevada: Repository Safety after Permanent Closure" ("Доклад по оценке безопасности захоронения радиоактивных отходов высокого уровня активности в геологическом хранилище Юкка-Маунтин, шт. Невада: безопасность хранилища после окончательного закрытия") (NUREG-1949, том 3).

работ, а также указано на необходимость принятия мер по исправлению положения в области обеспечения эксплуатационной безопасности. Причиной второго случая, в ходе которого произошел радиоактивный выброс вследствие экзотермической реакции в контейнере с отходами, как полагают, стала несовместимая смесь отходов. Дозы облучения в результате этого выброса оказались гораздо ниже нормативного предела, установленного в Законе о чистом воздухе АООС. МЭ США опубликовало план аварийного восстановления комплекса WIPP, который предусматривает возобновление ограниченных операций по захоронению в первом квартале 2016 года.

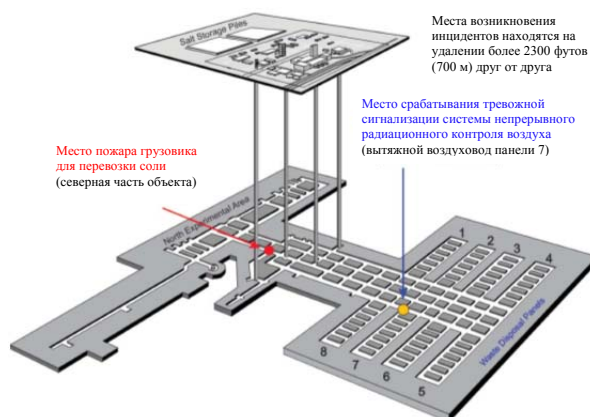


РИС. А-12. Места возникновения двух инцидентов в комплексе WIPP в 2014 году.
(Графика: WIPP, Министерство энергетики США)

Обращение с изъятыми из употребления закрытыми радиоактивными источниками

95. В нескольких странах, в том числе в Гане, Малайзии, на Филиппинах и в Южной Африке, серьезно рассматриваются различные варианты захоронения и удаления изъятых из употребления закрытых радиоактивных источников (ИЗРИ), включая совместное захоронение с другими отходами в приемлемых пунктах, растущие возможности рециклирования и возвращения в страну происхождения и захоронение в специально пробуренных скважинах. Разработан документ по общему обеспечению безопасности скважинного захоронения источников категории 3-5, и аналогичный документ разрабатывается для источников категории 1 и 2.

96. В 2014 году был осуществлен ряд успешных операций по удалению ИЗРИ из помещений пользователей и постановке их под контроль путем перемещения в национальные хранилища радиоактивных отходов или другие учреждения с надлежащими условиями хранения. В Коста-Рике была доставлена передвижная горячая камера для кондиционирования и демонтажа пяти высокоактивных ИЗРИ с целью их утилизации. В Марокко пять высокоактивных ИЗРИ категории 1 и 2 были объединены и возвращены во Францию. В нескольких государствах-членах, в том числе в Камеруне и Ливане, были начаты операции по подготовке к возвращению в страну происхождения вышедших из употребления источников категории 1 и 2 французского производства; само возвращение намечено на первое полугодие 2015 года.

97. Достигнут хороший прогресс в совмещении концепции проектирования скважинного захоронения с использованием мобильных горячих камер с целью минимизации манипуляций с источниками и исключения ненужных транспортных операций.

98. В Фиджи, Малайзии и Черногории были завершены операции по кондиционированию ИЗРИ, и была обеспечена подготовка местного и регионального персонала.

99. Агентство расширило доступ для многих назначенных пользователей из отдельных стран к Международному каталогу закрытых радиоактивных источников и устройств, что облегчает идентификацию обнаруживаемых на местах ИЗРИ. В 2014 году была начата работа по внесению в каталог дополнительных сведений об источниках и устройствах в интересах повышения его полезности.

A.4. Безопасность

100. Во всем мире на АЭС постоянно проводилась работа по повышению безопасности. Она включала в себя выявление и учет уроков аварии на АЭС "Фукусима-дайити"; повышение эффективности глубокоэшелонированной защиты; укрепление потенциала аварийной готовности и реагирования; поддержание и активизацию работы по наращиванию потенциала; защиту населения и окружающей среды от ионизирующих излучений. Меры, осуществленные государствами-членами в свете аварии, были также рассмотрены в ходе шестого Совещания договаривающихся сторон Конвенции о ядерной безопасности по рассмотрению, состоявшегося в Вене 24 марта – 4 апреля 2014 года.

101. Стержневым элементом всей деятельности по укреплению инфраструктуры ядерной безопасности, проводимой государствами-членами, Секретариатом и другими соответствующими заинтересованными сторонами, оставался План действий МАГАТЭ по ядерной безопасности. Агентство продолжало делиться информацией об уроках аварии посредством анализа соответствующих технических аспектов и распространять такую информацию. Оно организовало совещание международных экспертов по вопросам радиационной защиты после аварии на АЭС "Фукусима-дайити" (17-21 февраля) и по управлению тяжелыми авариями (17-20 марта). Кроме того, Агентство провело Международную конференцию по задачам, стоящим перед организациями технической и научной поддержки (ОТП) в области повышения ядерной и физической безопасности (27-31 октября). В 2014 году были опубликованы "IAEA Report on Human and Organizational Factors in Nuclear Safety in the Light of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant" ("Доклад МАГАТЭ по человеческому и организационному факторам в обеспечении ядерной безопасности в свете аварии на АЭС "Фукусима-дайити")¹² и "IAEA Report on Radiation Protection after the Fukushima Daiichi Accident: Promoting Confidence and Understanding" ("Доклад МАГАТЭ по вопросам радиационной защиты после аварии на АЭС "Фукусима-дайити": укрепление доверия и взаимопонимания")¹³.

102. Уровень эксплуатационной безопасности АЭС по-прежнему высок, о чем свидетельствуют индикаторы безопасности, информацию о которых собирают Агентство и Всемирная ассоциация организаций, эксплуатирующих атомные электростанции. На рис. А-13 показано количество внеплановых или аварийных остановок реакторов в автоматическом и ручном режимах на каждые 7000 часов (приблизительно один год) эксплуатации. Внеплановые остановки являются лишь одним из показателей безопасности, и обычно этот показатель

¹² <http://www.iaea.org/sites/default/files/humanfactors0914.pdf>

¹³ <http://www.iaea.org/sites/default/files/radprotection0914.pdf>

используется в качестве индикатора успехов в повышении уровня безопасности станции за счет снижения числа нежелательных и незапланированных теплогидравлических переходных процессов и переходных процессов реактивности, требующих экстренной остановки реактора. Как показано на рисунке, устойчивое улучшение продолжается с незначительной тенденцией в сторону увеличения в 2013 году.

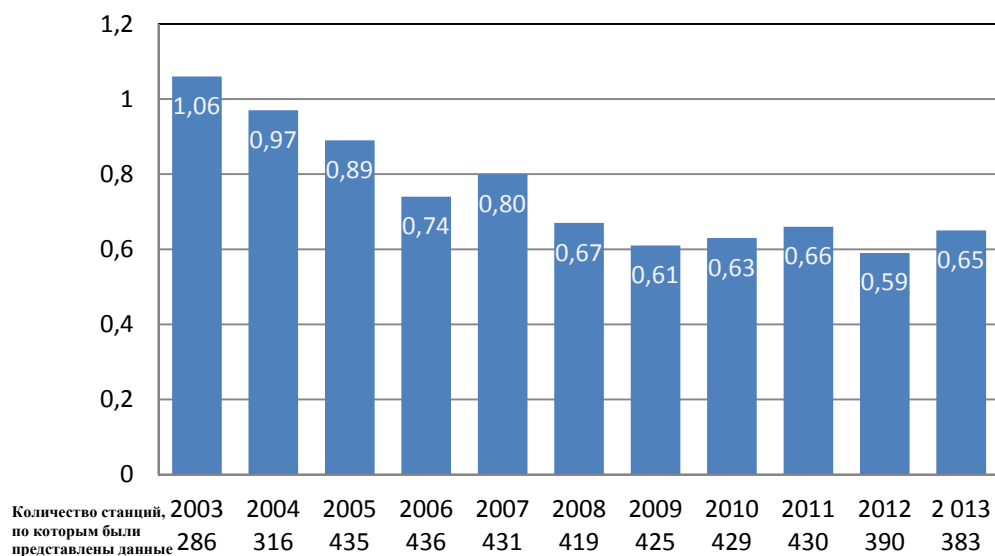


РИС. А-13. Средняя частота внеплановых остановок: количество внеплановых остановок в автоматическом и ручном режимах. (Источник: Информационная система Агентства по энергетическим реакторам <http://www.iaea.org/pris>)

103. Дополнительная информация по вопросу ядерной безопасности содержится в "Обзоре ядерной безопасности – 2015".

В. Атомные и ядерные данные

104. Непрерывно пополняемые массивы данных в четырех главных центрах ядерных данных мира формируют базу всей ядерной науки и технологий для энергетических и неэнергетических применений. Этими центрами являются: Секция ядерных данных (NDS) МАГАТЭ; Национальный центр ядерных данных США в Брукхейвенской национальной лаборатории; Банк данных АЯЭ/ОЭСР; Российский центр ядерных данных в Обнинске. NDS координирует две сети, связывающие друг с другом эти и другие специализированные центры: Международную сеть центров данных по ядерным реакциям, которая главным образом использует Базу экспериментальных данных по ядерным реакциям, и Международную сеть оценщиков данных о структуре и распаде ядра, которая ведет Архив оцененных данных о структуре ядра.

105. Наглядным примером сотрудничества в работе с ядерными данными служит создание АЯЭ/ОЭСР Рабочей группы по международному сотрудничеству в оценке ядерных данных (МГСО). В течение 25 лет различные подгруппы МГСО занимались решением отдельных вопросов, например Совместная международная организация библиотек оцененных данных (CIELO). В рамках проекта CIELO международные эксперты по работе с данными по ядерным

реакциям выявляют и документируют расхождения между существующими библиотеками оцененных данных, результатами измерений и интерпретациями модельных расчетов с целью максимального устранения этих расхождений и получения более точных результатов оценки для всех применений. Первоочередное внимание уделяется работе с данными о ядрах небольшого числа элементов, имеющих приоритетное значение, а именно водорода, кислорода, железа и основных актинидов. Еще одна подгруппа МГСО работает над предложением о внедрении нового современного формата структурированных данных на расширяемом языке разметки (XML).

106. Другое направление международного сотрудничества – это работа на экспериментальных установках. С помощью импульсного источника нейтронов на установке для измерения времени пролета нейтронов (n_TOF) Европейской организации ядерных исследований (ЦЕРН) удалось измерить большое количество сечений в широком энергетическом диапазоне; эти результаты необходимы для изучения звездного нуклеосинтеза и эффектов нарушения симметрии в сложных ядрах, исследования плотности ядерных уровней и таких применений ядерных технологий, как трансмутация ядерных отходов, электроядерные системы и исследования ядерного топливного цикла (рис. В-1). Консорциум европейских стран начал реализацию одного из самых крупных сегодня инфраструктурных проектов Европы – европейского источника нейтронов скалывания (ЕИНС). Сооружение фундамента для ЕИНС было начато в октябре 2014 года в Лунде, Швеция, и пуск этой нейтронной установки ожидается в 2019 году.

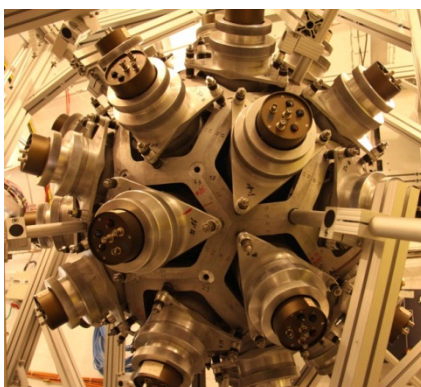


РИС. В-1. Детекторы на установке n_TOF в ЦЕРНе. (Фото: ЦЕРН)

107. Установки для получения пучков радиоактивных ионов (ПРИ) позволяют провести измерения многих нуклидов, которые невозможно исследовать на традиционных установках. С помощью таких пучков можно проводить ряд исследований в ядерной физике, связанных с границами стабильности ядер, в том числе изучение ядер, образующихся в результате α - и β -процессов, заполнения оболочек ядер вблизи магических чисел, а также исследования сверхтяжелых элементов. Установка Spiral-2, которая в настоящее время сооружается в Национальном исследовательском центре большого ускорителя тяжелых ионов во Франции, откроет доступ к ПРИ для большого числа исследователей из разных стран; первые эксперименты планируется провести в 2015 году.

108. В 2014 году в одном из рецензируемых журналов (*Nuclear Data Sheets* 118–120) ("Таблицы ядерных данных") были опубликованы материалы Международной конференции по ядерным данным для науки и техники, состоявшейся в 2013 году в Нью-Йорке, США. Эта конференция, которая проводится раз в три года, продемонстрировала результаты работы нескольких сотен ученых и инженеров, занимающихся получением или использованием ядерных данных для многих применений.

109. Ядерные данные представляют большую важность для применений, в которых свойства спектра нейтронов можно измерить при помощи ряда точно определенных сечений реакций, например, для ядерных реакторов деления, которым посвящен проект CIELO, термоядерных исследований, в особенности на Международном термоядерном экспериментальном реакторе, для медицинских целей, в частности для производства изотопов и дозиметрии.

110. Атомные данные, как правило, считаются отдельным направлением работы, однако они широко применяются вместе с ядерными данными в одной области – исследованиях моментов ядра. Экспериментальная спектроскопия тонкой структуры атомных уровней в сочетании с точными расчетами атомной структуры позволяют изучить параметры строения ядра, в том числе радиус заряда, магнитный дипольный момент и электростатический квадрупольный момент. С помощью подробных расчетов квантовой электродинамики, в основном для гелиевоподобных тяжелых ионов, теперь возможно разделить влияние на сверхтонкую структуру эффектов теории поля и эффекта Бора-Вайскопфа. Несколько применений подобного рода были описаны на девятой Международной конференции по атомным и молекулярным данным и их применению, которая состоялась 21-25 сентября 2014 года в Йене, Германия.

111. В моделировании сложных систем, например, погоды и климата, быстрое распространение получила методология количественной оценки неопределенностей (КОН). В 2013 и 2014 годах состоялось несколько совещаний, на которых обсуждались вопросы разработки нового применения КОН для рассчитанных атомных и молекулярных данных, подобно тому, как эта методология применяется в экспериментах. В этом случае речь идет о простых физических системах, в которых крайне сложно обеспечить необходимую точность расчетов, и в некоторой степени данное применение представляет собой новое направление методологии КОН.



РИС. В-2. Европейская установка XFEL находится в Гамбурге, Германия. (Фото: Европейская установка XFEL)

112. В разных странах вводятся в эксплуатацию новые установки рентгеновских лазеров на свободных электронах (XFEL) с жестким и мягким излучением. В настоящее время эксплуатируются две установки XFEL с жестким излучением: в 2009 году в Стэнфорде, США, был введен в эксплуатацию линейный источник когерентного света, а в 2011 году в Хариме, Япония, – установка "САКЛА". Сооружаются установки с жестким рентгеновским излучением: PAL-XFEL в ускорительной лаборатории в Пхохане, Республика Корея; европейский лазер XFEL в Гамбурге, Германия (рис. В-2); SwissFEL в Филлигене, Швейцария. На первых двух установках получение первого лазерного луча ожидается в 2016 году. Обзор хода работ на этих установках и других лазерах на свободных электронах был проведен на 36-й Международной конференции по лазерам на свободных электронах, состоявшейся в августе 2014 года в Базеле, Швейцария. XFEL применяются для исследования электронных свойств атомов, молекул и материалов, в том числе для изучения быстрых процессов в таких сложных биологических молекулах, как ДНК.

С. Применения ускорителей и исследовательских реакторов

С.1. Ускорители

113. В 2014 году была начата реализация двух перспективных крупномасштабных проектов по сооружению ускорителей, которые планируется ввести в эксплуатацию к 2020-2022 годам. Началась модернизация существующего источника фотонов на базе ускорителя в Европейском центре синхротронного излучения, расположенном в Гренобле, Франция. Новый источник, который относят к четвертому поколению источников подобного типа, будет обладать более высокой яркостью (в миллион раз выше) по сравнению с существующей установкой, но при этом будет потреблять на 20% меньше энергии. Он откроет целый ряд новых возможностей для исследователей широкого спектра научных отраслей – физики, химии, материаловедения и биологии. Кроме того, началось строительство ускорителя частиц ЕИНС, в котором для проведения научных исследований будут генерироваться самые мощные импульсные пучки нейтронов в мире. ЕИНС будет представлять собой установку на базе ускорителя, которая будет использоваться для исследований в области материаловедения с помощью рассеяния нейтронов. ЕИНС будет генерировать пучки нейтронов с яркостью приблизительно в 30 раз выше, чем пучки, получаемые на любом из имеющихся в настоящее время источниках нейтронов. Установка находится в Лунде, Швеция, поблизости от лаборатории MAX IV, которая дополнит исследования ЕИНС по материаловедению.

114. Важными инструментами для научных исследований, вносящими ценный вклад в развитие новых технологий, являются синхротронные установки. Как правило, общее время работы на синхротронных установках, которое запрашивают исследователи, превышает реально возможное время работы в 2-3 раза, т.е. утвердить и реализовать можно лишь треть всех исследовательских предложений. Для самых современных каналов пучка, например, лазеров на свободных электронах, эта разница еще больше, приблизительно в 5 раз. Это затрудняет, а то и делает невозможным, получение доступа к работе на синхротроне для групп исследователей из развивающихся государств-членов, которые начали работать в этой области недавно.

115. Чтобы исправить ситуацию и иметь возможность предоставить доступ к самым современным синхротронным установкам группам исследователей из любого государства-члена, Агентство оборудовало на установке "Элеттра" в Триесте, Италия, (рис. С-1) многоцелевую экспериментальную установку в качестве конечной станции канала пучка для рентгеновской флуоресценции (РФ). Проект был реализован в сотрудничестве с Федеральным физико-техническим институтом Германии и Техническим университетом Берлина.

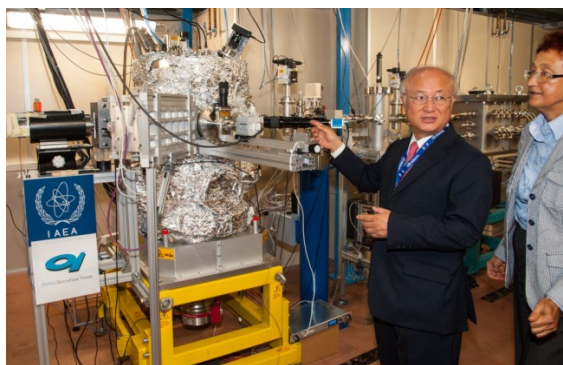


РИС. С-1. Генеральный директор МАГАТЭ Юкия Аmano и координатор исследований "Элеттры" Майя Кискинова рядом со сверхвысоковакуумной камерой (UHVC) на открытии нового канала пучка для рентгеновской флуоресценции, 6 октября 2014 года. (Фото: "Элеттра")

116. Конечная станция канала пучка камеры UHVC Агентства позволяет на синергической основе применять различные РФ- и спектрометрические методы для полной элементарной, химической и структурной характеристики материалов. Камера UHVC оборудована усовершенствованным семикоординатным манипулятором образцов с электроприводом, предназначенным для перемещения/поворота исследуемого образца и детекторов рентгеновского излучения в различные положения относительно синхротронного пучка. Оптимальные параметры канала пучка для РФ включают в себя расширенный регулируемый энергетический диапазон (2-14 кэВ), увеличенный поток излучения (5109 фот./с с энергией 5,5 кэВ при энергетическом режиме установки 2,4 ГэВ), разрешающую способность $1,5 \times 10^{-4}$, малую расходимость пучка (0,15 мрад) и размер пучка на выходе из выходной щели, равный 220 мкм x 90 мкм.

117. В 2014 году Агентство также ввело в действие портал знаний об ускорителях (ПЗУ)¹⁴, новый веб-сайт, объединяющий сообщество специалистов по ускорителям, на котором справочная информация предоставляется таким заинтересованным сторонам, как директивные органы, научно-исследовательские советы и правительственные организации, занимающиеся вопросами кадровой и научно-исследовательской инфраструктуры. На портале размещена база данных о 196 ускорителях частиц на низкие и средние энергии, работающих во всем мире. Портал создавался как перспективная площадка для научного сотрудничества и сетевого взаимодействия: на нем собраны ссылки на различное программное обеспечение и базы данных, научную и образовательную документацию, последние достижения в исследованиях с применением ускорителей, объявления о конференциях, семинарах и учебных курсах, и зарегистрированные пользователи могут загружать на него свои материалы.

118. Управление ускорительной установкой сопряжено с рядом трудностей, которые отличаются от тех, что характерны для других исследовательских установок. Поскольку ускорители зачастую являются как инструментами, так и объектами исследований, эти аспекты легко упустить из виду. Чтобы помочь государствам-членам успешно преодолеть текущие экономические и технические трудности, Агентство совместно с руководством синхротронной установки SOLEIL организовало техническое совещание по стратегиям управления ускорительными установками, которое состоялось 15-19 сентября 2014 года в Сент-Обене, Франция.

119. В последнее время движущей силой для ряда направлений научных исследований и возможной разработки инновационных технологий стали источники одиночных ионов, способные имплантировать ионы с нанометрической точностью. В рамках проекта координированных исследований Агентства по радиационно-индуцированным повреждениям в полупроводниках и диэлектриках для оценки свойств переноса у вызванных зарядом дефектов электронных устройств, поврежденных радиацией, использовалось облучение одиночными ионами. Индуцируемые одиночными ионами переходные токи отражают свойства материала и структуру устройств и при этом различаются в зависимости от типа ионов. Кроме того, одиночные ионы модифицируют электрические, оптические и структурные свойства материала в точке проникновения иона в материал и вдоль его пути в материале. Детерминированное облучение одиночными ионами/имплантация одиночных ионов представляет собой непростую, но важную технологию, которая может открыть возможности для высокоточной модификации материалов с позиционным управлением.

¹⁴ ПЗУ доступен по адресу: <http://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/default.aspx>.

120. На рис. С.2 показаны два примера подобных модифицированных материалов. Левое изображение демонстрирует процесс, который может использоваться для микрообработки изделий из кремния с топологическими размерами до одной десятой нанометра, что позволит получить целый ряд новых наноструктур для использования в таких областях, как микро/нанофлюидика и наноимпринтная литография¹⁵. На правом изображении показано, как можно использовать имплантацию одиночных ионов для создания дефектов в алмазах с целью получения азото-замещенных вакансий, которые, как ожидается, найдут успешное применение в квантовых вычислениях, магнитных сенсорах с крайне высокой разрешающей способностью или нанофотонике¹⁶. Поскольку свойства материала можно модифицировать вдоль пути прохождения иона, метод облучения одиночными ионами с нанометровым позиционным управлением является ключевой технологией модификации электрических, оптических и структурных свойств материалов.

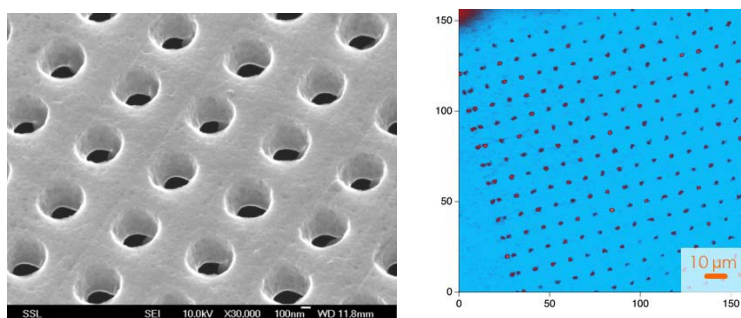


РИС. С-2. Слева: полученное с помощью растрового электронного микроскопа изображение решетки единообразных отверстий в кремнии диаметром в несколько сотен нанометров. (Фото: М.Б.Г. Бриз/Национальный университет Сингапура) Справа: полученное с помощью конфокального микроскопа изображение решетки азото-замещенных вакансий, образовавшейся в алмазе в результате ионной имплантации. Каждый участок облучался несколькими ионами азота-15. (Фото: Т. Осима/Комиссия по атомной энергии Японии)

121. Помимо фундаментальных и прикладных исследований ускорители частиц играют важную роль в промышленных применениях. Развитие ускорительных технологий, которые позволяют генерировать высокостабильные и коллимированные ионные пучки с силой тока от нескольких мкА до 100 мА и энергией налетающих ионов от 100 эВ до ~10 МэВ, открывает широкие возможности изготовления интегральных схем для логических и аналоговых операций и операций в памяти, а также производства все более широкого спектра оптических сенсоров и устройств для получения изображений. Сегодня ионная имплантация широко используется в полупроводниковой промышленности для создания и модификации электронных и фотонных материалов¹⁷. По оценкам ученых, в настоящее время в научно-исследовательских учреждениях, больницах и промышленных предприятиях всего мира эксплуатируется свыше 17 000 ускорителей¹⁸.

¹⁵ AZIMI, S., et al., Nanoscale lithography of LaAlO₃/SrTiO₃ wires using silicon stencil masks, Nanotechnology 25 (2014) 445301.

¹⁶ Takashi Yamamoto et al. Strongly coupled diamond spin qubits by molecular nitrogen implantation, PHYSICAL REVIEW B 88, 201201(R) (2013).

¹⁷ FELCH, S.B et al.: Ion Implantation for Semiconductor devices: the largest use of industrial accelerators, Proceedings of PAC2013, Pasadena, CA USA, Page 740, <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/pac2013/papers/weyb2.pdf>

¹⁸ Industrial Accelerators and their applications, Eds: Robert W Hamm and Marianne E. Hamm; World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2012

С.2. Исследовательские реакторы

122. Исследовательские реакторы используются в первую очередь как источники нейтронов для исследований и различных применений, наиболее распространенные из которых перечислены в таблице С-1. Их мощность может варьироваться от нуля (например, в случае критической или подкритической сборки) до приблизительно 200 МВт (тепл.), что, однако, совсем немного в сравнении с мощностью обычной АЭС – 3000 МВт (тепл.). В отличие от энергетических реакторов, исследовательские реакторы обладают гораздо большим разнообразием конструкций и могут работать в различных режимах – стационарных или импульсных.

Таблица С-1. Применение исследовательских реакторов во всем мире¹⁹.

Тип применения ^a	Число соответствующих исследовательских реакторов ^b	Число государств-членов, в которых находятся используемые установки
Обучение/подготовка кадров	178	55
Нейтронно-активационный анализ	129	53
Производство радиоизотопов	100	44
Облучение материалов/топлива	85	30
Нейтронная радиография	74	41
Нейтронное рассеивание	53	35
Трансмутация (легирование кремния)	31	20
Геохронология	26	22
Трансмутация (драгоценные камни)	22	13
Нейтронная терапия, в основном НИОКР	19	13
Прочие применения ^c	141	38

^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, 2014).

^b Из 284 рассмотренных исследовательских реакторов (на 31 декабря 2014 года: 247 в эксплуатации, 19 временно остановлены, 6 в стадии строительства и 12 запланированы).

^c К другим применениям относятся калибровка и тестирование контрольно-измерительных приборов и дозиметрия, эксперименты с биологической защитой, эксперименты по реакторной физике, измерения ядерных данных и поездки и семинары по программам связей с общественностью.

123. Согласно базе данных Агентства по исследовательским реакторам, по состоянию на 31 декабря 2014 года построено 747 исследовательских реакторов, из которых 247 находятся в эксплуатации. Наибольшее количество работающих исследовательских реакторов (включая критические установки) – 49 реакторов находятся в Российской Федерации, затем следуют США (41), Китай (15) и Франция (12). Исследовательские реакторы также имеются во многих развивающихся странах (в Африке, например, работают восемь установок). Среди мирового парка исследовательских реакторов 57 установок работают на мощности свыше 5 МВт, создавая нейтронные потоки большой плотности для высокомоощных применений.

¹⁹ Источник: база данных Агентства по исследовательским реакторам (<http://nucleus.iaea.org/RRDB/>).

124. Большинство действующих исследовательских реакторов используется крайне неэффективно, и их средний возраст превышает 45 лет. Поэтому на многих из них необходимо проводить регулярные мероприятия по управлению старением, модернизации и ремонту. Продолжает расти интерес к стратегическому использованию установок и бизнес-планированию для улучшения показателей их использования и рентабельности. За последние два года были подготовлены и представлены на рассмотрение Агентства стратегические планы для 37 исследовательских реакторных установок. В октябре 2014 года по итогам этого рассмотрения Агентство организовало семинар-практикум для распространения среди государств-членов информации о накопленном опыте и обмена с ними примерами надлежащей практики. Продолжается совместная международная работа по пропаганде и расширению использования исследовательских реакторов в учебно-образовательных целях. Одним из ее примеров служит реализуемый в Латинской Америке и Европе проект по созданию реакторной интернет-лаборатории, призванный объединить университеты, в которых исследовательские реакторы эксплуатируются в учебно-образовательных целях.



РИС. С-3. Управление по ядерному регулированию Аргентины дало разрешение на строительство исследовательского реактора RA-10, который увеличит объемы производимых страной радиоизотопов для испытаний материалов/топлива и легирования кремния, а также будет использоваться для научных исследований и разработок. (Изображение: Национальная комиссия по атомной энергии Аргентины)

125. Несколько стран находится на разных стадиях строительства новых исследовательских реакторов, 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 (рис. С-3), Иордании, Республике Корея, Российской Федерации, Саудовской Аравии и Франции. Официальные планы строительства новых исследовательских реакторов есть еще у нескольких государств-членов, в том числе у Бельгии, Бразилии, Вьетнама, Индии, Нидерландов и США. Вопрос о создании новых исследовательских реакторов рассматривают и другие страны, такие как Азербайджан, Бангладеш, Беларусь, Боливия, Кувейт, Монголия, Нигерия, Объединенная Республика Танзания, Судан, Таиланд, Тунис и Южная Африка²⁰.

126. Ожидается дальнейшее сокращение количества действующих национальных исследовательских реакторов, поскольку более старые реакторы выводятся из эксплуатации и заменяются реакторами, эксплуатируемыми совместно несколькими странами. Для обеспечения широкого доступа к этим установкам и их эффективного использования потребуются более активное международное сотрудничество. В этой связи развитию международного сотрудничества и расширению круга пользователей исследовательских

²⁰ Публикация Агентства "Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project" ("Специфические особенности и основные этапы проектов исследовательских реакторов") (Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии № NP-T-5.1) призвана помочь государствам-членам в этой области.

реакторов и заинтересованных в их эксплуатации сторон способствует создание при содействии Агентства²¹ региональных сетей и объединений по использованию исследовательских реакторов. Кроме того, в 2014 году Агентство ввело в действие новую модель сотрудничества, а именно международный центр МАГАТЭ на базе исследовательского реактора.

127. На протяжении всего 2014 года в рамках Инициативы США по сокращению глобальной угрозы (ИСГУ) продолжалось выполнение задачи по минимизации использования высокообогащенного урана (ВОУ) в гражданском ядерном секторе. К концу 2014 года 92 из 200 исследовательских реакторов, охватываемых ИСГУ, в том числе одна работающая на ВОУ установка для производства молибдена-99, были переведены на низкообогащенное урановое (НОУ) топливо или официально остановлены. Среди крупных достижений можно отметить подготовку и загрузку НОУ топлива в активную зону реактора "Аргус" в Российской Федерации, который в июле впервые достиг критичности, и выгрузку жидкого ВОУ топлива из остановленного реактора "Фотон" в Узбекистане. В 2014 году Китай, Гана и Агентство подписали соглашение о содействии переводу исследовательского реактора GHARR-1 на НОУ топливо. Были уточнены необходимые технические условия и утвержден план действий по осуществлению работ по конверсии реактора и репатриации ВОУ.

128. Деятельность по сведению к минимуму используемого ВОУ включает в себя возврат ВОУ топлива исследовательских реакторов в страну происхождения, где оно проходило обогащение. К концу 2014 года задачи программы возврата ВОУ американского происхождения были выполнены на 76%, что соответствует удалению приблизительно 1300 кг свежего и отработавшего ВОУ топлива исследовательских реакторов. Программа возврата ВОУ российского происхождения выполнена на 85%, что соответствует удалению 2140 кг свежего и отработавшего ВОУ топлива исследовательских реакторов. После перевода польского исследовательского реактора "Мария" на НОУ топливо 53 кг отработавшего ВОУ топлива в сентябре были отправлены обратно в Российскую Федерацию. В процессе перевода установки ВВР-К в Алатау, Казахстан, с ВОУ на НОУ в Российскую Федерацию были возвращены 10,2 кг свежего и 17,3 кг отработавшего ВОУ (рис. С-4).

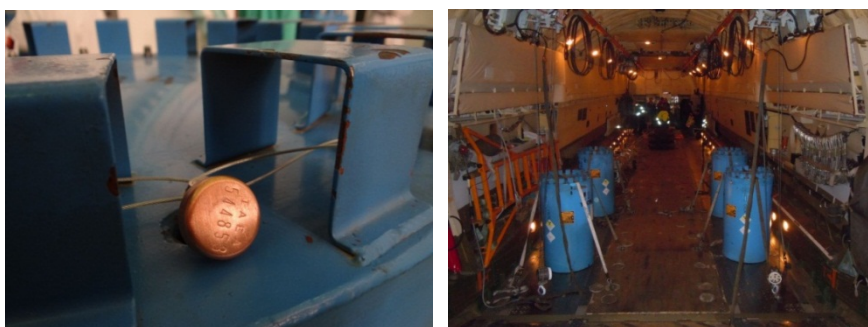


РИС. С-4. Гарантийная пломба Агентства на транспортном контейнере ТК-S16 (слева). Транспортные контейнеры подготовлены к воздушной перевозке из Алматы, Казахстан, в Российскую Федерацию (справа).

129. Переход на НОУ и возврат ВОУ топлива нередко сопровождаются серьезными мерами по модернизации инфраструктуры. Например, по линии Инициативы Агентства в отношении мирного использования ядерной энергии финансируется программа комплексной модернизации исследовательского реактора TRIGA Mark III в Мексике.

²¹ Агентством было образовано несколько объединений по использованию исследовательских реакторов в странах Балтии, Карибского бассейна, Центральной Африки, Центральной Азии, Восточной Европы, Средиземноморья и Содружества Независимых Государств.

130. Для конверсии высокопоточных и высокоэффективных исследовательских реакторов требуется усовершенствованное уран-молибденовое топливо весьма высокой плотности, которое разрабатывается в настоящее время. Несмотря на достигнутый в этой области значительный прогресс, для обеспечения коммерческой доступности сертифицированного НОУ топлива необходимы дальнейшие усилия и испытания, особенно применительно к реализации программ по облучению и послереакторному исследованию топлива, а также в области методов его изготовления. В ноябре топливная компания "ТВЭЛ" из Российской Федерации подписала договор о начале поставок НОУ топлива для высокопоточного реактора в Нидерландах.

131. Хотя в 2014 году серьезного дефицита поставок молибдена-99 не было, эксплуатационные проблемы на перерабатывающих установках и старых исследовательских реакторах сохраняются. Благодаря изменениям в структуре спроса, успехам в повышении КПД и некоторой диверсификации поставок небольшой дефицит не привел к кризису такого же масштаба, который возник в 2007-2010 годах. Продолжается перевод производств медицинских изотопов с ВОУ на НОУ, при этом основными поставщиками молибдена-99, произведенного не на основе ВОУ, остаются Австралийская организация по ядерной науке и технике (АНСТО) и компания "NTP Radioisotopes" в Южной Африке. В 2014 году АНСТО начала строительные работы на новой установке для производства молибдена-99, благодаря которой, как ожидается, объемы производства молибдена-99 на НОУ топливе увеличатся с 1000 до 3000 кюри шестидневного молибдена в неделю. "NTP Radioisotopes" продолжает перевод своих технологических процессов на исключительное использование НОУ. Два других крупных производителя медицинских изотопов – Институт радиоэлементов в Бельгии и компания "Маллинкродт" в Нидерландах начали работу по переводу своих промышленных производственных процессов с ВОУ на НОУ.

Д. Использование ядерных методов для повышения эффективности ветеринарии

132. Ядерные и смежные технологии играют важную роль в охране здоровья животных, особенно в контексте диагностики заболеваний и определения характеристик патогенных организмов. Ниже показано, каким образом и в каких областях ядерные технологии, как изотопные, так и неизотопные, приносили пользу в прошлом и в каких областях можно ожидать их перспективное применение в будущем.

Д.1. Использование облученных вакцин для защиты скота от трансграничных болезней животных

133. Самым важным средством защиты животных и людей от опасных для жизни заболеваний является вакцинация. В большинстве вакцин используется та или иная форма ослабления или инактивации патогенов химическими или физическими методами, при этом в обоих случаях вакцина сохраняет иммуногенность и поэтому индуцирует защитный иммунный ответ. Как правило, ослабленные живые вакцины дают более эффективную и мощную защиту, чем вакцины инактивированные, поскольку в процессе уничтожения микроорганизмов разрушается часть белков, необходимых для индуцирования сильного иммунитета.

134. Альтернативой химической и физической обработке при разработке вакцин является облучение. Оно может применяться для постепенного разрушения или снижения активности входящей в геном патогена нуклеиновой кислоты, при этом сохраняются антигенные свойства

патогена, что вызывает более эффективный иммунный ответ в организме-хозяине. Недавние успехи в разработке облученных вакцин свидетельствуют о возможности получения метаболически активных, но не реплицирующихся микроорганизмов, которые могут стимулировать иммунный ответ подобно воздействию живого патогена. Охлажденную или замороженную очищенную культуру живого патогена помещают в облучатель и облучают по определенной программе, с установленным периодом времени и уровнем энергии. Для возбудителей трипаносомоза, например, используется уровень облучения порядка 100 Гр. Затем в облученный раствор с патогеном добавляются криозащитные вещества для стабилизации раствора во время процесса лиофилизации перед его использованием в качестве потенциальной вакцины²².

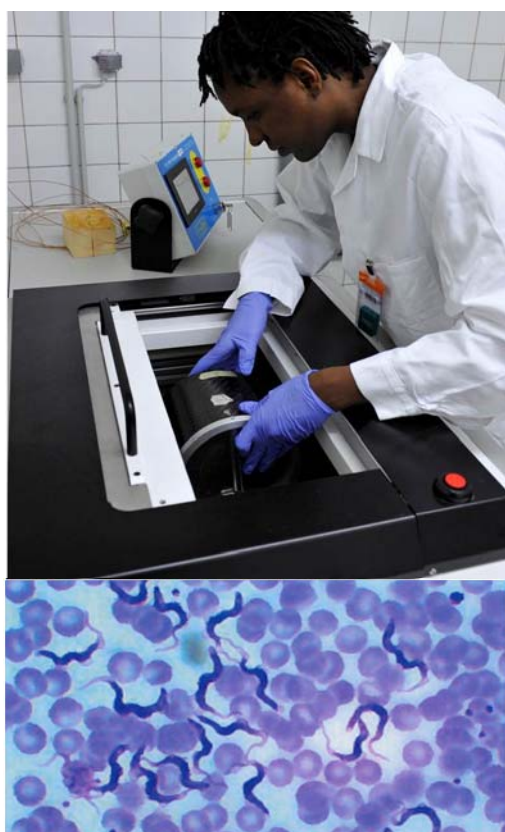


РИС. D-1. Облучение культур трипаносом (*T. evansi*) *in vitro* с помощью источника рентгеновского излучения.

135. Как правило, для облучения патогенов используются источники с кобальтом-60, однако могут также применяться рентгеновское излучение и электронные пучки. Размеры доз различаются в зависимости от патогенов. Исследования показали, что аттенуация находящихся на третьей стадии развития личинок паразитов *Haemonchus contortus* и *Strongylus colubrifomis* облучением 600 и 700 Гр соответственно позволяет защитить овец от заражения этими паразитами²³. Для легочной нематоды *Dictyocaulus viviparus* требуется более низкая доза

²² Duxbury RE, Anderson JS, Welde BT, Sadun EH, Muriithi IE (1972a). *Trypanosoma congolense*: Immunization of mice, dogs, and cattle with gamma-irradiated parasites. *Experimental Parasitology*, 32:527-533.

²³ Sivanathan S, Duncan JL, Urquhart GM (1984). Some factors influencing the immunisation of sheep with irradiated *Haemonchus contortus* larvae. *Veterinary Parasitology*, 16:313-23.

(400 Гр), иначе она не сможет проникнуть в легкие и индуцировать защитный иммунитет²⁴. Такие бактерии, как бруцелла, могут быть ослаблены дозой 3000 Гр²⁵, пастерелла – дозой 6000 Гр²⁶, а *Bacillus anthracis* – 20 000 Гр²⁷. Для вирусов необходимы более высокие дозы, позволяющие воздействовать на их белки и структуру. Вирус ящура инактивируется облучением 40 000 Гр²⁸, а для вируса катаральной лихорадки овец требуется доза от 60 000 до 100 000 Гр²⁹.

D.2. Ядерные методы для ранней экспресс-диагностики трансграничных болезней животных и зоонозных заболеваний

136. Для борьбы с трансграничными заболеваниями важнейшее значение имеет их ранняя экспресс-диагностика. Для обнаружения патогенов или антител проводятся диагностические тесты на взятых у организма-хозяина образцах крови, сыворотки, тканей и выделений. В совершенствовании диагностических тестов, предназначенных для обнаружения патогенов, их антигенов или антител (белков, вырабатываемых в ответ на воздействие антигенов патогенного организма), большую роль играют радиоизотопные метки.

137. Ранее в иммуноанализах для обнаружения заболевания в образце в качестве антигена, способного вызвать иммунный ответ, использовались меченные радиоизотопами ДНК или белок конкретного патогена. Подобные анализы главным образом проводились в специализированных лабораториях, однако по мере того, как изотопное мечение заменили ферменты и флуоресцентные красители, тесты стали широко применяться в полевых условиях. Несмотря на практичность ферментов и флуоресцентных красителей, с их помощью невозможно добиться столь высокого уровня чувствительности и избирательности, как при использовании радиоизотопов. В тех случаях, когда необходим высокий уровень чувствительности и избирательности (например, для диагностики птичьего гриппа H5N1, ящура, лихорадки Рифт-Валли или африканской чумы свиней), используют изотопное мечение – стабильный и надежный метод ранней экспресс-диагностики. Агентство положило начало разработке доступных методов анализа с гарантированным уровнем качества для диагностики ряда инфекционных и паразитарных заболеваний, в том числе ящура, бруцеллеза, чумы крупного рогатого скота и трипаносомоза.

²⁴ Winter MD, Wright C, Lee DL (2000). Vaccination of young lambs against infection with *Nematodirus battus* using gamma irradiated larvae, *International Journal of Parasitology*, 30: 1173–1176.

²⁵ Dabral N, Martha-Moreno-Lafont, Sriranganathan N, Vemulapalli R (2014) Oral Immunization of Mice with Gamma-Irradiated *Brucella neotomae* Induces protection against Intraperitoneal and Intranasal Challenge with Virulent *B. abortus* 2308. *PLoS One* 9(9): e107180. doi:10.1371/journal.pone.0107180.

²⁶ Dauphin LA, Newton BR, Rasmussen MV, Meyer RF, Bowen MD (2008). Gamma Irradiation Can Be Used To Inactivate *Bacillus anthracis* Spores without Compromising the Sensitivity of Diagnostic Assays. *Applied and Environmental Microbiology* 74, 4427-4433.

²⁷ Aloni-Grinstein R, Gat O, Altboum Z, Velan B, Cohen S, Shafferman A (2005). Oral Spore Vaccine Based on Live Attenuated Nontoxinogenic *Bacillus anthracis* Expressing Recombinant Mutant Protective Antigen. *Infection and Immunity* 4043-4053.

²⁸ Motamedi Sedeh F, Khorasani A, Shafae K, Fatolahi H, Arbabi K (2008). Preparation of FMD type A87/IRN inactivated vaccine by gamma irradiation and the immune response on guinea pig. *Indian J. Microbiol.*, 48:326–330.

²⁹ Campbell CH (1985). Immunogenicity of bluetongue virus inactivated by gamma irradiation. *Vaccine*, 3: p401.



РИС. D-2. Прошедший обучение персонал многих национальных лабораторий по диагностике заболеваний применяет в своих странах ядерные и молекулярные методы для борьбы с болезнями животных и зоонозными заболеваниями.

138. С появлением технологий, основанных на амплификации нуклеиновых кислот (например, полимеразной цепной реакции), значительно улучшилась диагностика инфекционных болезней. Благодаря этим технологиям стала возможной ранняя экспресс- и подтверждающая диагностика самых высокоинфекционных патогенов или тех из них, которые трудно изолировать и культивировать *in vitro*. Вначале нуклеиновые кислоты выявляли путем мечения ДНК/РНК такими препаратами, как сера-35, метионин с серой-35, фосфор-35 и фосфор-32. Главное преимущество данного метода состоит в том, что в организме животного можно обнаружить крайне низкие уровни инфекции (например, ДНК-зонды, приготовленные из *Haemonchus placei*, *Ostertagia ostertagi*, *Cooperia oncophora* и *Oesophagostomum radiatum*, позволяли обнаружить в пробах фекалий инфицированных коз, овец и крупного рогатого скота очень малые количества яиц паразитов – до 25 штук)³⁰. Это помогало выявить патоген прежде, чем начнется сама болезнь.

139. Методы, основанные на использовании ядерных технологий, играют важную роль в борьбе со вспышками геморрагической лихорадки Эбола (ГЛЭ) в Западной Африке. Агентство выступило инициатором проекта с тремя составляющими, цель которого – содействие созданию потенциала, профилактике и раннему обнаружению, а также совершенствованию имеющихся средств диагностики. В рамках первой составляющей проекта оказывается техническая помощь и предоставляется оборудование и реагенты/расходные материалы уже созданным на местах группам специалистов по диагностике. Задачи второй составляющей – сосредоточить внимание на зоонозном характере ГЛЭ и контролировать взаимодействие населения с дикими животными, с тем чтобы предотвратить передачу вируса человеку от его естественных носителей-животных или обеспечить его раннее обнаружение. Третья составляющая проекта предусматривает создание официальных сетей диагностических лабораторий, работающих при государственных ветеринарных учреждениях и/или учреждениях здравоохранения. Проект подразумевает регулируемое внедрение новых средств диагностики или совершенствование уже имеющихся средств с целью обеспечить высококачественное раннее, оперативное, точное и избирательное обнаружение ГЛЭ и контроль за распространением этого вируса. Данный комплекс мер поможет находящимся в зоне риска странам справиться с нынешними вспышками ГЛЭ и оперативно реагировать на возможные угрозы в связи с этим заболеванием в будущем.

³⁰ Höglund J, Engström A, von Samson-Himmelstjerna G, Demeler J, Tydén E (2013). Real-time PCR detection for quantification of infection levels with *Ostertagia ostertagi* and *Cooperia oncophora* in cattle faeces. *Veterinary Parasitology*, 197: 251– 257.

D.3. Ядерные методы для отслеживания и контроля трансграничных болезней животных и зоонозных заболеваний

140. В условиях свободного перемещения животных или продукции животного происхождения, а также потенциального влияния изменений окружающей среды, вызванных переменами в климате, на распространение инфекционных заболеваний и их переносчиков возникает острая потребность в технологиях, позволяющих определить географическое происхождение таких болезней и при необходимости получить информацию об особенностях питания и связанных с ними перемещениях переносчиков этих болезней. В качестве средства для изучения эпидемиологии болезней может использоваться метод анализа стабильных изотопов (АСИ). Стабильные изотопы – это встречающиеся в природе формы какого-либо элемента, не подверженные радиоактивному распаду. Существует свыше 250 стабильных изотопов, но лишь немногие из них участвуют в важных биологических и экологических процессах. Содержание изотопов измеряется с помощью масс-спектрометрии как разница между фактическим соотношением изотопов одного элемента и международным стандартом, которая выражается в тысячных долях и обозначается "дельтой" (δ). Ценность АСИ обусловлена наличием твердой взаимосвязи между уровнем содержания определенных изотопов в окружающей среде и концентрацией этих же изотопов в тканях животных.

141. Соотношения изотопов водорода ($\delta^2\text{H}$) и кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) в тканях животных используются для изучения перемещений животных, поскольку данные величины с высокой точностью отражают перемещения животных между различными средами питания, например, озерами, реками, океанами и подземными водами. Использование стабильных изотопов для характеристики той или иной популяции предполагает изучение изотопных сигнатур у нескольких особей, репрезентативных для всей популяции. На протяжении нескольких лет ведутся исследования, в которых стабильные изотопы применяются для характеристики и дифференциации различных популяций животных (в особенности птиц) при помощи определения величин $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{15}\text{N}$ в метаболически активных тканях (крови и мышцах), однако в настоящее время наиболее эффективными индикаторами представляются изотопы водорода, встречающиеся в метаболически инертных и сезонно меняющихся тканях перьев, клюва и когтей. Перья сохраняют информацию до смены на новые или линьки, что происходит, как правило, раз в год. Когти, напротив, растут постоянно, и теоретически в зависимости от темпов их роста можно получать различные интегрированные по времени профили. Если известен изотопный профиль той или иной конкретной популяции птиц, то любые особи из ее состава могут служить источником информации о глобальной миграции данного вида.



РИС. D-3. Анализ стабильных изотопов помогает определить роль мигрирующих птиц в распространении вируса птичьего гриппа по разным континентам.



РИС. D-4. Курице закапывают вакцину в глаза.

Е. Успехи в области медицинской радиационной дозиметрии

142. В медицине давно применяется ионизирующее излучение. В лучевой терапии излучение используется для уничтожения опухолевых клеток; для этого определенные дозы излучения подводятся к органам, в которых находятся злокачественные клетки. В медицинской визуализации излучение используется для формирования диагностических изображений; в этом случае облучение, которому подвергаются пациенты, представляет собой лишь неизбежный побочный эффект. Несмотря на серьезные различия базовых принципов и целей лучевой терапии и диагностики, первостепенное значение во всех случаях имеют знания о дозировании излучения. Они нужны и для проверки того, соответствуют ли лечебные процедуры предписаниям, и для оценки риска, связанного с радиационным воздействием на пациентов, облучаемых в ходе сеансов медицинской визуализации.

Е.1. Медицинская визуализация

Е.1.1. Дозиметрический контроль пациентов в диагностической радиологии

143. Научный комитет Организации Объединенных Наций по действию атомной радиации особо отметил, что медицинское облучение, особенно диагностическая радиология, являются на сегодняшний день наиболее мощным искусственным источником воздействия ионизирующего излучения, и масштабы его применения продолжают увеличиваться значительными темпами³¹. Это вызвано в первую очередь большим числом выполняемых рентгеновских обследований и иногда неправильным использованием сложных методов с высокими дозами облучения, таких как компьютерная томография (КТ).

144. Поэтому необходимо отслеживать и контролировать дозы облучения, которому подвергаются пациенты, и оптимизировать конструкцию и эксплуатационные характеристики систем рентгеновской визуализации. Дозиметрический контроль пациентов – это главная обязанность медицинских физиков, специализирующихся на лучевой диагностике, закрепленная в национальных законах и регулирующих положениях многих стран. В лучевой диагностике дозиметрические измерения необходимы для определения и применения указательных уровней, оценки работы оборудования и сравнительной оценки рисков.

³¹ United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2008 Report: Sources and effects of ionizing radiation, UN, New York, http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html.

145. Диагностическая визуализация с использованием рентгеновского излучения применяется в различных видах обследований: от простой проекционной рентгенографии до усовершенствованной динамической томографической визуализации. Поэтому был разработан широкий ряд дозиметрических величин, измерительных инструментов и методов, все из которых связаны с определенным риском для лиц, работающих в клиниках.

146. В целом величины, используемые для дозиметрии в лучевой диагностике, можно разделить на две большие категории:

- i) прикладные величины, т.е. практические дозиметрические величины, которые могут быть непосредственно измерены и могут быть адаптированы к конкретным ситуациям и видам применения. К ним относятся: падающая керма в воздухе, произведение кермы в воздухе на площадь (в основном используется в проекционной рентгенографии) и индексы кермы в воздухе для КТ (используются в томографической визуализации) (рис. E-1);
- ii) связанные с риском величины, которые могут использоваться для оценки радиационного ущерба или риска и, соответственно, являются мерой поглощенной дозы. Эти величины не поддаются прямому измерению и могут быть выведены только путем расчета на основе прикладных величин или с использованием соответствующих моделей.



РИС. E-1. Измерение дозы в КТ на стандартном полиметилметакрилатном макете тела и в воздухе.

147. В зависимости от способа диагностики и требуемого вида измерения дозы можно использовать несколько типов дозиметров при условии, что они обладают достаточной чувствительностью и энергетической характеристикой, но, как правило, используются ионизационные камеры объемом несколько кубических сантиметров или специально сконструированные для таких измерений твердотельные детекторы. К другим часто используемым в лучевой диагностике типам дозиметров относятся пленки (радиографические либо радиохромные), термолюминесцентные дозиметры и оптически стимулируемые люминесцентные дозиметры.

148. Работа Агентства в этой области заключается в гармонизации и стандартизации норм воздействия на пациентов для их введения в медицинских учреждениях.

E.1.2. Дозиметрия внутреннего облучения в ядерной медицине

149. В клинической практике методы ядерной медицины применяются как в диагностической визуализации, так и в лечении. В диагностической ядерной медицине внутренняя дозиметрия предназначена для измерения доз облучения здоровых органов, а в молекулярной радиотерапии она используется как инструмент определения доз, поглощаемых опухолями и находящимися в зоне риска органами.

150. Процедуры ядерно-медицинской диагностики позволяют проводить функциональную визуализацию здоровых и пораженных тканей, причем чаще всего они используются для локализации злокачественной ткани и оценки перфузии миокарда. Как правило, пациенты не подвергаются сильному облучению, и диагностические выгоды от процедуры визуализации значительно перевешивают связанные с ней риски. Тем не менее для каждого пациента необходимо рассчитывать тканевые дозы и стохастические риски, рассматривая их в контексте совокупной дозы облучения, получаемой пациентом на протяжении нескольких сеансов визуализации или в результате других процедур диагностической визуализации (например, КТ и флюорографии). Поэтому необходимо оптимизировать величину облучения в целях максимального увеличения диагностического качества изображений и сведения к минимуму риска для пациента. Это особенно важно при работе с детьми, поскольку их органы обладают повышенной радиочувствительностью, а стохастические эффекты могут проявляться в течение более длительного периода.

151. При использовании ядерной медицины в терапевтических целях для лечения различных форм рака и других заболеваний применяются радиоактивные агенты. Если в дистанционной лучевой терапии доза излучения, подводимая к органу-мишени или ткани-мишени задана изначально, а при ее расчете для каждого пациента применяется система планирования лечения, то в терапевтической ядерной медицине такой персонифицированный процесс не используется. В этом случае величина излучения, воздействию которого подвергается пациент, определяется типом облучаемой опухоли (например, 150 милликюри йода-131 при раке щитовидной железы). Зачастую предварительная оценка не проводится и дозы, получаемые тканями-мишенями и подверженными риску органами, не оптимизированы, в результате чего в большинстве случаев лечение не доводится до конца. Причиной этого являются недостаточная квалификация персонала, отсутствие ресурсов и стандартных методов подведения предписанной дозы к опухоли, а также нехватка данных о реакции опухоли на мощность дозы. Ситуация постепенно меняется, и научное сообщество все лучше понимает, что одним из важнейших факторов обеспечения безопасности пациентов и максимальной эффективности лечения является дозиметрический расчет для каждого конкретного пациента.

152. Во внутренней дозиметрии поглощенные тканями дозы (количество поглощенной энергии ионизирующего излучения на единицу массы ткани) чаще всего оцениваются методом определения дозы внутреннего медицинского облучения. Этот метод предусматривает расчет суммарной радиоактивности (общее число распадов за определенный период времени) для каждого органа-источника, в который введен радиофармацевтический препарат. При этом методе также требуется присвоение "значений S" (поглощенная доза в ткани-мишени на каждый распад в каждой ткани-источнике) на основе признанных на международном уровне условных анатомических фантомов (рис. E-2).

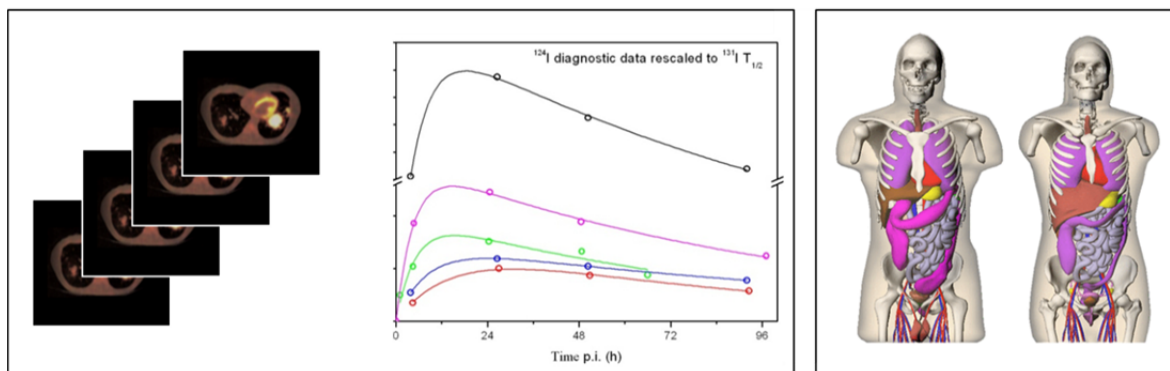


РИС. E-2. Слева: серия изображений и рассчитанные на их основе кривые зависимости активности от времени для различных органов-источников. Справа: пример математических фантомов, используемых для расчета значений S.

Е.2. Лучевая терапия

153. Одним из ключевых условий для проведения лучевой терапии является наличие последовательных референтных дозиметрических эталонов и процедур. В дистанционной лучевой терапии, в частности в рентгеновском дозиметрическом контроле высоковольтных медицинских линейных ускорителей и установок на кобальте-60, практически повсеместно используются эталоны поглощенной дозы в воде, закрепленные в кодексах практики, таких как "Определение поглощенной дозы при дистанционной лучевой терапии: международные практические рекомендации по дозиметрии, основанные на эталонах единицы поглощенной дозы в воде" (Серия технических докладов, № 398, МАГАТЭ, 2004 год). Тем не менее с недавнего времени начало увеличиваться число радиотерапевтических методов, в которых используются малые поля облучения. Это, например, различные формы стереотаксической лучевой терапии, стереотаксической радиотерапии всего тела, стереотаксической радиохирургии и лучевой терапии с модуляцией интенсивности дозы. Это увеличивает неопределенность в сфере клинической дозиметрии и ставит под сомнение уместность применения в этой области существующих референтных дозиметрических протоколов, используемых в традиционной лучевой терапии, таких как публикация № 398 Серии технических докладов. Иногда происходили несчастные случаи, поскольку использовались методы и процедуры, подходящие для больших полей, но не совместимые с малыми полями облучения. Поэтому разрабатывается свод положений по дозиметрии статических малых фотонных полей, который позволит стандартизировать дозиметрию малых полей.

154. После выпуска публикации № 398 Серии технических докладов было разработано множество различных систем подведения пучков частиц для лучевой терапии, таких как пучки протонов и пучки тяжелых ионов. Эти системы дают возможность усовершенствовать лечение опухолей, не увеличивая поражение нормальной ткани. Разрабатываются своды правил для обеспечения точной дозиметрии этих пучков.

155. Предпочтительным видом дозиметра для калибровки радиоактивных источников, которые используются в брахитерапии, являются калиброванные камеры колодезного типа. При этом не имеется согласованных на международном уровне руководящих принципов гарантии/контроля качества всех источников, используемых в брахитерапии, а также в соответствующих рекомендованных дозиметрических приборах. Во многих клиниках отсутствует калиброванное оборудование, нет внутренних резервных процедур и возможности легко обратиться к независимому сличению измерений. В итоге для определения мощности источника используется целый ряд методологий. Прилагаются усилия к созданию стандартов измерения поглощенной дозы в воде, гармонизированных со сводами положений о дозиметрии в дистанционной лучевой терапии, включая публикацию № 398 Серии технических докладов.

Г. Достижения в области радиофармацевтических препаратов

156. Прогресс в области ядерной медицины зависит от разработки эффективных методов производства новых радионуклидов. Были достигнуты впечатляющие успехи в разработке технологий производства радиоизотопов: например, недавно были введены в эксплуатацию высокоэнергетические и сильноточные циклотроны. Это позволило сделать более доступными ряд новых радионуклидов, включая галлий-68, медь-64, цирконий-89 и цинк-63, а также способствовало созданию основанных на использовании ускорителей технологий для коммерческого производства технеция-99m, который остается наиболее популярным

диагностическим радионуклидом. Наличие новых радиоизотопов для использования в медицине может открыть путь к решению еще не изученных клинических проблем. Эти разработки радикально меняют положение в области ядерной медицины.

F.1. Совершенствование производственных технологий

157. Недавние усовершенствования циклотронной технологии позволяют увеличить продуктивность производства основных медицинских радионуклидов и, следовательно, обеспечить их широкое использование в клинических условиях. Одна из основных проблем применения радиофармпрепаратов в медицине – обеспечение постоянного снабжения важнейшими радиоизотопами – необходимыми компонентами диагностических и лечебных препаратов. Как описано ниже, новые радиофармпрепараты, производимые из ряда различных радионуклидов, обладают весьма перспективными свойствами для диагностики и лечения раковых заболеваний. Тем не менее доступность этих важных радиоизотопов в настоящее время ограничена из-за малых объемов их производства, поскольку они изготавливаются на низкоэнергетических и низкоточных медицинских циклотронах. Еще одной проблемой является ожидаемый останов ядерных реакторов, которые снабжают весь мир техницием-99m, по-прежнему играющим важнейшую роль в диагностической ядерной визуализации.

158. К настоящему времени циклотронная технология производства медицинских радионуклидов хорошо себя зарекомендовала. На существующих коммерческих циклотронных установках энергия протонов варьирует от 6 до 70 МэВ. Были достигнуты серьезные успехи в постоянном повышении протонного тока, который сейчас может достигать 750–800 мкА. При использовании высокоэнергетических потоков можно преодолеть связанные с производством радионуклидов ограничения, обусловленные малым сечением взаимодействия протонов. Наличие высокоэнергетических потоков дает толчок важным усовершенствованиям технологий по сборке твердотельных мишеней, которые способны эффективно рассеивать большое количество тепла, генерируемое этими высокими токами. Эти новые технологические достижения сделают возможным более масштабное производство некоторых важнейших радионуклидов, таких как галлий-68, стронций-82, технеций-99m и т.п., и расширят их доступность на рынке.

159. Вследствие глобальных перебоев с поставками молибдена-99, исходного радионуклида, из которого производят самый популярный диагностический радионуклид технеций-99m, были активизированы усилия по поиску альтернативных источников технеция-99m. Альтернативные варианты включают использование линейных ускорителей и циклотронов. В отличие от обычного процесса деления для производства Мо-99 в реакторе с использованием урановых мишеней в этих технологиях используются мишени из молибдена-100 (Мо-100). Для производства Мо-99 на основе трансмутации обогащенного Мо-100 может использоваться линейный ускоритель, вместе с тем для производства непосредственно Тс-99m облучением Мо-100 могут использоваться циклотроны. Существенное экологическое и экономическое преимущество этих двух технологий состоит в том, что отходы образуются в небольших объемах, и в том, что касается рециклирования Мо-100, проекты демонстрируют эффективность порядка 90%.

F.2. Новые радионуклиды и радиофармацевтические препараты

160. В настоящем разделе описаны перспективные виды применения недавно открытых радиофармацевтических препаратов для диагностики и лечения рака.

Г.2.1. Галлий-68

161. В области позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) постоянно растет значение радионуклида галлий-68, в частности в связи с легкостью его получения в генераторе германия-68/галлия-68. Галлий-68 – это чистый излучатель позитронов с периодом полураспада 73 минуты. В последние несколько лет в различных монографиях было описано несколько радиофармпрепаратов галлия-68 на основе соматостатина; сейчас они получили широкое признание как средства для диагностики нейроэндокринных опухолей (НЭО). Хотя эта категория индикаторов НЭО по-прежнему остается единственным примером одобренного для клинической практики радиофармпрепарата галлия-68, имеется целый ряд исследований, касающихся разработки новых агентов для диагностики других типов рака. Например, недавно было описано индикаторное вещество для визуализации опухолей предстательной железы. Структура этого радиофармацевтического препарата довольно проста. Он состоит из иона галлия-68, связанного с лигандом, который несет на себе ингибитор простатического специфического мембранного антигена (ПСМА). Этот новый лиганд, адресно подавляющий ПСМА, сначала изучался в сочетании с радионуклидом технеций-99m, а затем был видоизменен для получения производного изотопа галлий-68. В ходе ряда проводимых в настоящее время клинических испытаний на больных раком предстательной железы были получены весьма обнадеживающие результаты, которые в полной мере демонстрируют диагностическую эффективность и чувствительность этого нового радиофармпрепарата. Имеющиеся данные позволяют уверенно предположить, что новый агент способен обнаруживать рецидивы и метастазы рака предстательной железы и обеспечивает существенно большую контрастность по сравнению с холином, меченным фтором-18, – традиционным изотопным индикатором, который обычно применяется для визуализации опухолей простаты.

Г.2.2. Медь-64

162. Сложность биологического строения человека затрудняет поиск новых эффективных диагностических и лечебных радиофармацевтических препаратов. Однако иногда происходят неожиданные открытия; так, выяснилось, что медь-64 в своей простейшей химической форме ионов двухвалентной меди накапливается в различных опухолях, в том числе при раке предстательной железы, меланоме, раке молочной железы и мозга. Простые ионы меди-64 могут без привязки к какому-либо биологическому носителю избирательно воздействовать на раковые клетки.

163. Медь – это базовый микроэлемент, необходимый для обеспечения активности ряда металлоферментов. С недостатком или избытком меди связывают некоторые болезни человека и аномалии развития тканей. У больных раком наблюдаются повышенные уровни меди в сыворотке крови, коррелирующие с остротой заболевания и реакцией на лечение. Полученные экспериментальным путем сведения показывают, что уровни биодоступности меди модулируют рост опухоли, но молекулярные и клеточные механизмы, с помощью которых ионы меди модулируют формирование различных видов раковых опухолей, по-прежнему неясны³². Ввиду этой важной роли ионов меди в репликации раковых клеток ионы меди накапливаются внутри ядер клеток в тесном контакте с генетическим материалом, тогда как в здоровых клетках они остаются в цитоплазме. Поскольку медь-64 распадается с одновременным испусканием частиц β^+ и β^- с периодом полураспада 12,7 часа и усиленно поглощается опухолевой тканью, она может использоваться в качестве диагностического и лечебного радионуклида. Такое двойное использование одного радионуклида – прекрасный

³² Ishida S., Andreux P., Poitry-Yamate C., Auwerx J., Hanahana D. (2013) Bioavailable copper modulates oxidative phosphorylation and growth of tumors, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. vol 110 no. 48. www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1318431110

пример концепции "тераностики"³³, в соответствии с которой одно вещество совмещает в себе терапевтические и диагностические свойства. Существует простой способ производства меди-64 на обычных низкоэнергетических медицинских циклотронах путем облучения протонами твердотельной мишени из никеля-64. Недавно стерильные водные растворы соли хлорида меди-64 были одобрены для применения в качестве фармацевтических прекурсоров для приготовления радиофармпрепаратов меди-64. В настоящее время в результате неожиданного открытия избирательного воздействия ионов меди-64 на раковые клетки эти растворы используются в различных клинических испытаниях, направленных на оценку как диагностической, так и терапевтической эффективности хлорида меди-64 для лечения различных видов опухолей, в частности меланомы, рака молочной железы и карциномы предстательной железы.

F.2.3. Цирконий-89

164. Использование меченных радиоактивными изотопами антител в качестве зондов для визуализации опухолей всегда было перспективным направлением в молекулярной визуализации. В частности, ПЭТ с использованием меченных радиоизотопами моноклональных антител (МАт) – это весьма привлекательный метод неинвазивного обнаружения опухолей и планирования их лечения. Лишь несколько из широко распространенных радионуклидов для ПЭТ пригодны для мечения антител, поскольку визуализация с использованием антител требует прикрепления радиоизотопа к МАт, обладающим высокой стабильностью *in vivo*, при этом период полураспада таких радиоизотопов должен соответствовать фармакокинетическим свойствам МАт. В настоящее время большой интерес в плане мечения антител вызывает радиоизотоп цирконий-89, поскольку период его физического полураспада (3,3 суток) соответствует времени, необходимому для достижения оптимального соотношения опухоль/фон у немодифицированных МАт (как правило, несколько суток).

165. Цирконий-89 распадается с испусканием позитронов и захватом электронов, при этом максимальное выделение энергии при испускании позитронов позволяет получить изображения ПЭТ с высоким пространственным разрешением. Цирконий-89 может производиться на медицинских циклотронах путем бомбардировки недорогой фольги из природного иттрия, закрепленной на алюминиевом/медном диске, протонным пучком мощностью 14-14,5 МэВ.

166. В настоящее время цирконием-89 был помечен широкий спектр МАт, причем несколько из них уже дают обнадеживающие результаты в ходе клинических исследований. К их числу относятся трастузумаб (герцептин) для визуализации рецепторов эпидермального фактора

³³ В тераностическом подходе диагностические тесты используются для определения того, будет ли полезно для пациента применение того или иного специфического терапевтического препарата. Нынешнее позитивное отношение к тераностике обусловлено революционным подходом, который может позволить улучшить выбор лечения на основе конкретных молекулярных характеристик заболевания, что открывает новые горизонты для объективного наблюдения за реакцией на лечение. В основе работы устройств для визуализации лежат методы неинвазивной визуализации физиологических процессов с использованием различных механизмов для характеристики анатомических, биохимических и функциональных патологий. В ядерной медицине эта форма комбинированных лечебно-диагностических процедур использовалась десятилетиями: предполагается, что первым молекулярным тераностическим агентом, применявшимся в визуализации, был радиоизотоп йода. Визуализация с использованием гамма-излучателя йода-123 и комбинированная терапия с использованием бета-излучателя йода-131 является краеугольным камнем адъювантной терапии дифференцированного рака щитовидной железы. Имеется множество примеров парных методов молекулярной визуализации и терапии с использованием радиофармпрепаратов, оказывающих избирательное действие на биохимические процессы, такие как пролиферация клеток, синтез стероидов, экспрессия рецепторов факторов роста, синтез катехоламинов, индуцированная гипоксией экспрессия генов или апоптоз. В целом тераностический подход может обеспечить перспективную основу для будущего развития медицинских применений радионуклидов, поскольку его неотъемлемой особенностью является способность задействовать визуализацию *in vivo*, которая позволяет получить ценную информацию о фармакокинетике и биораспределении в отношении подходящих молекулярных мишеней в целях проведения более комплексного и эффективного лечения.

роста человека типа 2, цетуксимаб для визуализации рецепторов эпидермального фактора роста, бевацизумаб для таргетирования рецепторов фактора роста эндотелия сосудов и Мат J591 для отслеживания рецепторов ПСМА³⁴.

Г.2.4. Альфа-излучатели

167. Недавно фармацевтический раствор дихлорида радия-223 (препарат Xofigo компании "Байер") стал первым излучающим альфа-частицы радиофармпрепаратом, который был одобрен для клинического применения в лечении костных метастазов. Другие альфа-излучающие радионуклиды, имеющие медицинское значение и доступные в настоящее время для потенциального применения в лечении, – это астат-211, висмут-212, висмут-213, актиний-225, радий-223, свинец-212, торий-227 и тербий-149. Технологии производства этих радионуклидов варьируют от ядерных реакторов до циклотронов и генераторов. Не прекращаются усилия по разработке более простых и эффективных методов производства альфа-излучающих радионуклидов, чтобы сделать их широко доступными для исследовательских целей. Еще одним важным аспектом исследований терапии альфа-частицами является необходимость создать эффективные химические методы фиксации альфа-радионуклида на соответствующих транспортных молекулах. Известно, что, в отличие от легких бета-частиц, тяжелые альфа-частицы могут сильнее влиять на стабильность получаемого радиоконъюгата в растворе, поэтому для достижения удовлетворительного уровня стабилизации необходимо применять надежные химические процессы.

Г. Применение изотопов в климатических и гидрологических исследованиях: последние события и тенденции

168. Вода – это жизненно важный ресурс для устойчивого развития; ее наличие влияет почти на все сферы общественной и хозяйственной деятельности. Задача обеспечения доступа к безопасной питьевой воде, а также достаточного снабжения пресной водой для санитарных нужд, производства продуктов питания и электроэнергии сохраняет свою актуальность для многих стран и важна для жизни миллиардов людей. Однако различия в плане доступности пресной воды изучены плохо, а расчеты общего количества воды в реках, озерах и водоносных горизонтах, а также оценки ее запасов и движения дают разные результаты. Предполагается, что изменение климата повлияет на местные и региональные гидрологические циклы, поэтому требуется более точная оценка имеющихся ресурсов в пространственном и временном отношении. Достоверная гидрологическая информация необходима для формирования обоснованных стратегий надлежащего управления водоснабжением с учетом изменения климата и сокращения подушевого объема водных ресурсов.

169. Для оценки водных ресурсов и управления ими требуются междисциплинарные, научно обоснованные подходы, базирующиеся на физических и социальных науках, с прочной опорой на научные данные о наличии, распределении и движении ресурсов поверхностных и подземных вод. Встречающиеся в природе стабильные и радиоактивные изотопы воды и их растворенные компоненты – это мощное средство для отслеживания процессов гидрологического цикла, включая происхождение и пути движения дождевых осадков и талого

³⁴Zhang Y1, Hong H, Cai W. (2011) PET tracers based on Zirconium-89. Current Radiopharmaceuticals Apr 4(2):131-9.

снега, попадающих в водоносные горизонты, озера и реки, а также изучения гидравлического взаимодействия между этими водоемами. Изотопные следы в воде помогают быстро и экономично оценивать водные ресурсы, управлять ими и демонстрировать, какую роль они играют в изменении климата и какое воздействие испытывают в связи с ним.

G.1. Гидрологический цикл и изменение климата

170. Тщательное изучение и определение характеристик атмосферных процессов, приводящих к изменению климата, а также более точный расчет объемов водных потоков в рамках гидрологического цикла имеют большое значение для оценки обеспеченности водными ресурсами. Стабильные изотопы, содержащиеся в осадках и поверхностных водах, десятилетиями используются для расшифровки и расчета гидрологических процессов, исследования атмосферной циркуляции, проверки точности климатических моделей и моделирования климатических условий нынешнего и прошлых периодов. Первоначально (в 50-е и 60-е годы прошлого века) необходимость анализа перемещения радиоактивных веществ, образующихся вследствие ядерных испытаний и содержащихся в осадках, позволила получить совершенно новые знания о гидрологических процессах в атмосфере. В 1961 году была создана Глобальная сеть "Изотопы в осадках" (ГСИО), которой Агентство управляет в сотрудничестве со Всемирной метеорологической организацией; сеть предоставляет важные изотопные данные для исследований в области наук об атмосфере, гидрологии и других сферах.

171. Для того чтобы понять, как изменение климата повлияет на осадки в будущем, необходимо проанализировать, что происходило в прошлые геологические эпохи. Изотопные соотношения в нынешних осадках, рассчитанные на основе данных ГСИО – это самый важный инструмент определения параметров изменения гидрологического цикла в различных палеоклиматических условиях при помощи таких природных хранилищ информации, как ледовый покров на полюсах и континентах, годовые кольца на деревьях, озерные и морские отложения и подземные воды. Недавние аналитические исследования позволили облегчить доступ к данным о стабильных изотопах в осадках и речной воде, что дало возможность создать ряд новых мест наблюдения и детализировать изотопный мониторинг в пространственном и временном плане. Появление более простых, дешевых и не требующих частого технического обслуживания лазерных инструментов во многом способствует расширению применения стабильных изотопов и дает многим гидрологам возможность обходиться при изотопных измерениях собственными силами.

172. Во многих научных дисциплинах, относящихся к вопросам окружающей среды, стабильные изотопы играют роль индикаторов источников, процессов и взаимодействий в природе. Для дальнейшего расширения возможностей обнаружения и отслеживания воздействия климата на гидрологический цикл Агентство создает глобальную сеть по мониторингу изотопов в речной воде. Сводные изотопные данные по осадкам нынешнего и прошлых периодов дают возможность усовершенствовать глобальные климатические модели, которые используются для прогнозирования последствий будущего изменения климата.

G.2. Оценка и рациональное использование водных ресурсов

173. Для комплексного управления водными ресурсами необходимы более точные оценки водных ресурсов, имеющихся в реках и озерах, и степени их взаимосвязи с подземными водами в пределах водосбора. Хотя во всем мире подземные воды в настоящее время составляют более половины всей используемой пресной воды, имеется лишь ограниченный объем достоверной информации о подземных водах, которые содержатся в мелких и глубоких водоносных горизонтах мира. Использование изотопов для оценки источника и возраста подземных вод

имеет решающее значение, а в некоторых случаях является единственным средством оценки ресурсов подземных вод и их способности к возобновлению. Тритий, содержащийся в подземных водах, в течение многих лет выступал в качестве основного гидрологического маркера в случае их недавнего пополнения, однако современный уровень содержания трития в этих водах зачастую очень мал, что затрудняет количественную интерпретацию получаемых данных. Тем не менее, когда уровень трития измеряется одновременно с содержанием продукта его радиоактивного распада (инертного газа гелия-3), полученный набор изотопов помогает количественно оценить современный уровень пополнения. Эти сведения необходимы также для защиты ресурсов подземных вод от загрязнения.

174. В связи с нехваткой воды, которая характерна не только для засушливых и полусушливых районов, приходится искать новые источники пресной воды в более глубоких водоносных горизонтах. Во многих случаях объектом добычи становятся подземные воды, пополнявшиеся ранее при других климатических условиях, но о количестве и движении этих глубоких и, возможно, реликтовых подземных вод возрастом от десятков тысяч до более чем миллиона лет почти ничего не известно. Единственным средством оценки ресурсов подземных вод в таких водоносных горизонтах является изотопное датирование с использованием нескольких индикаторов возраста, в основном долгоживущих радионуклидов и изотопов инертных газов, таких как углерод-14, гелий-4 и криптон-81. Углерод-14 уже много десятков лет используется в качестве индикатора возраста подземных вод, однако его применение ограничено периодом его полураспада (примерно 5700 лет) и сложными геохимическими свойствами углерода во многих водоносных слоях. Инертные газы, такие как криптон-81, в силу своей низкой химической реактивности более пригодны к использованию в качестве индикаторов возраста, поскольку их изотопы не взаимодействуют с геологической средой водоносного горизонта. Последние аналитические разработки позволяют точно определять несколько атомов этих редких изотопов в старых подземных водах, что дает возможность оценивать возраст подземных вод, сформировавшихся до одного миллиона лет назад.

G.3. Будущие направления исследований

175. В последние годы новые изотопные инструменты и подходы в сочетании с инновационными аналитическими разработками способствовали существенному расширению применения природных изотопов во многих естественных науках: от гидрологических и атмосферных наук до экологии и палеоклиматологии. Эти недавние наработки имеют решающее значение для понимания, мониторинга и оценки воздействия изменения климата на водные и другие природные ресурсы. Кроме того, комплексные, научно обоснованные оценки водных ресурсов крайне важны для устойчивого развития. Появление более простых, дешевых и не требующих частого технического обслуживания лазерных инструментов во многом способствует расширению применения стабильных изотопов и дает многим гидрологам возможность обходиться при изотопных измерениях собственными силами. Наконец, в ближайшем будущем ожидается дальнейший рост спроса на новые изотопные инструменты для датировки подземных вод, требующей более сложных аналитических методов для измерения изотопов инертных газов и долгоживущих радионуклидов.

Н. Изучение изменений в морской среде при помощи ядерных методов

Н.1. Ядерные методы для изучения глобальных изменений

176. Ядерные методы используются для изучения содержания CO_2 в морской среде. Увеличение концентрации CO_2 в атмосфере все больше влияет на морскую среду, в частности повышая кислотность морской воды. Радионуклиды – это мощные инструменты для изучения изменений круговорота углерода и воздействия этих изменений на морскую флору и фауну. Они также могут применяться для реконструкции изменений химического состава морской воды в прошлые геологические эпохи, которая позволяет проанализировать нынешние изменения и их потенциальное влияние на состояние океанов в будущем.

177. Мировой океан поглощает около 25% всех антропогенных выбросов CO_2 и, следовательно, играет важную роль в сдерживании роста концентрации CO_2 в атмосфере. Затем вследствие активности живых организмов часть этого CO_2 преобразуется в органический углерод и частицы карбоната кальция, которые в конечном итоге поглощаются процессом, известным как "биологический насос". Для количественной оценки скорости биологического удаления CO_2 из верхних слоев океана может использоваться природный радионуклид торий-234. Изучение масштабов и темпов этого процесса имеет большое значение для формирования полной картины углеродного цикла, которая поможет нам найти способы снижения кислотности океана.

178. Когда океанская вода поглощает CO_2 , она подкисляется, что, в свою очередь, влияет на морские организмы. Радиоактивные изотопы используются для изучения изменений в биологических процессах, происходящих в морских организмах, таких как кальцификация (кальций-45), биоминерализация (стронций-85), метаболизм (цинк-65) или биоаккумуляция микроэлементов (например, кобальт-57, кобальт-60, марганец-54 или селен-75), в связи с таким повышением кислотности. Также проводится палеореконструкция pH морской воды; для этого изучается содержание в составе долгоживущих массивных кораллов изотопов бор-10 и бор-11. Полученные данные могут, в свою очередь, применяться в перспективных моделях климата, чтобы оценить будущее воздействие на кораллы.



РИС. Н-1. Эксперименты с использованием радиоиндикаторов (кальция-45) для изучения воздействия подкисления океана на морские организмы.

179. Диоксид углерода и метан (CH_4) – это газы с мощным парниковым эффектом, которые циркулируют в атмосфере, поступают из различных источников и аккумулируются в различных резервуарах. Эти источники и резервуары можно отследить при помощи маркеров, которыми служат стабильные изотопы, или изотопных следов, содержащихся в сигнатурах стабильных изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) и кислорода ($\delta^{18}\text{O}$), которые входят в состав молекул CO_2 и CH_4 . В последние годы получили развитие оптические анализаторы изотопов, которые способны производить высокоточные, прецизионные измерения, необходимые для изучения небольших, но динамичных изменений в атмосферных CO_2 и CH_4 . Этого можно добиться только с использованием специальных эталонных газовых смесей CO_2 или CH_4 в воздухе, которые калибруются при помощи международных эталонных материалов для стабильных изотопов, предоставляемых Агентством.

Н.2. Ядерные методы для изучения локальных изменений окружающей среды

180. Существует широкий спектр ядерных методов и методов стабильных изотопов, пригодных для изучения процессов изменения и загрязнения окружающей среды. Это ключевые инструменты, позволяющие реконструировать прошлые события, связанные с загрязнением, а также отслеживать тенденции в загрязнении и оценивать эффективность мер по борьбе с ним. Они также используются для изучения наземных источников загрязнения питательных веществ, которые вызывают эвтрофикацию прибрежных зон, проведения различия между антропогенными и природными концентрациями загрязнителей, выявления источников загрязнения для криминалистических исследований загрязнения, а также для выявления биотоксинов, связанных с вредоносным цветением водорослей (ВЦВ), в морепродуктах в целях охраны здоровья человека.

181. Стойкие загрязнители (например, тяжелые металлы и органические загрязнители) часто накапливаются в морских отложениях в эстуариях, прибрежных районах и лагунах, которые зачастую расположены близко к городским районам, местам рыбного промысла и отдыха. Для измерения скорости осаждения и, следовательно, скорости накопления загрязнителей может использоваться свинец-210. Период его полураспада составляет 22,3 года, что позволяет реконструировать геохронологию за период в 100-150 лет и увязать ее с вызвавшими загрязнение событиями, такими как ядерные аварии и испытания, либо природными событиями, такими как эвтрофикация или ВЦВ.

182. Антропогенная эвтрофикация в прибрежных зонах, которая происходит главным образом в результате сброса городских сточных вод и стока с земель сельскохозяйственного назначения, – широко распространенная проблема для многих эстуариев и прибрежных районов. К признакам деградации морской среды относятся повышение концентрации фитопланктона, снижение прозрачности воды, уменьшение количества растворенного кислорода и, в некоторых случаях, возникновение ВЦВ. В качестве индикатора антропогенной эвтрофикации водных экосистем используются коэффициенты содержания стабильного изотопа азота ($\delta^{15}\text{N}$), поскольку повышенные значения $\delta^{15}\text{N}$ в осадках органического происхождения и биоте указывают на антропогенные выбросы азота в прибрежные воды. Кроме того, поскольку эвтрофикация вызывает повышение значений $\delta^{13}\text{C}$ в связи с ростом массы морского фитопланктона, анализ липидных биомаркеров в конкретных соединениях на содержание изотопа углерода дает представление об интенсивности событий, приведших к эвтрофикации в прибрежных водах.



РИС. Н-2. Изотопный масс-спектрометр для измерения содержания стабильных изотопов азота и углерода в целях изучения процессов прибрежной эвтрофикации

183. Выявление источников загрязнения в прибрежной морской среде имеет большое значение не только для понимания процессов изменения окружающей среды, но и для планирования мер по борьбе с загрязнением. Поэтому ядерные методы отслеживания источников загрязнения приносят большую пользу с точки зрения охраны окружающей среды и обеспечения устойчивости экосистемных услуг.

184. Загрязнение прибрежных вод нефтепродуктами – это глобальная экологическая проблема, обусловленная эксплуатационными, аварийными или незаконными выбросами нефтяных углеводородов. Возрастает потребность в чувствительных и надежных методах мониторинга нефтяного загрязнения и его воздействия, а также в разработке методов, которые позволяют регулирующим органам выяснить происхождение нефтяного загрязнения. Наиболее отработанная методология определения характеристик утечки нефтепродуктов основана на изучении химических следов и позволяет определить характеристики ряда компонентов нефти с помощью газовой хроматографии в сочетании с масс-спектрометрией. При этом в качестве дополнительного криминалистического инструмента для уточнения локализации следов нефтяных пятен в целях отслеживания источников нефти в морской среде может также применяться анализ содержания стабильного изотопа углерода ($\delta^{13}\text{C}$) в нефтяных углеводородах.

185. Свинец является побочным токсичным элементом, который также можно отследить при помощи изотопных соотношений в целях выявления различных источников загрязнения морской среды. Свинцовая руда из разных месторождений, как правило, различается по изотопному составу, который отражает ее возраст, происхождение и процессы формирования. Вариации в соотношении стабильных и радиогенных изотопов свинца, особенно по содержанию единственного природного изотопа (свинец-204), могут использоваться для отслеживания источников и путей загрязнения свинцом.



РИС. Н-3. Масс-спектрометр высокого разрешения с индуктивно связанной плазмой, используемый для анализа стабильных изотопов свинца в пробах окружающей среды