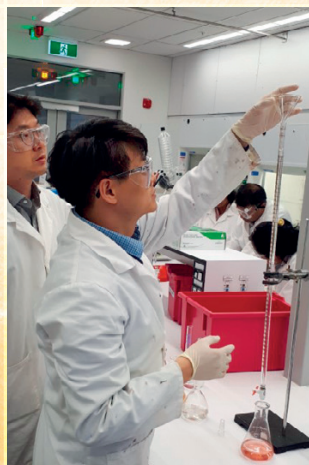
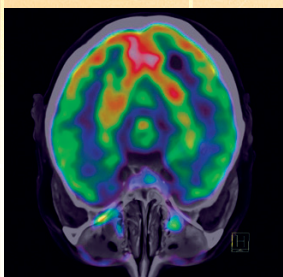


ОБЗОР ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

2018



IAEA

Международное агентство по атомной энергии

Обзор ядерных технологий — 2018

GC(62)/INF/2

Отпечатано МАГАТЭ в Австрии
Август 2018 года

IAEA/NTR/2018

Введение

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

В «Обзоре ядерных технологий — 2018» рассматриваются следующие отдельные области: энергетические применения, усовершенствованные ядерные и термоядерные системы, применения ускорителей и исследовательских реакторов, ядерные методы в сфере продовольствия, управления использованием почв и скотоводства применительно к реагированию в чрезвычайных ситуациях, новые достижения в радиотерапии и нейропсихиатрии, загрязнение пластмассовыми отходами океанов и радиофармацевтические препараты.

Проект «Обзора» был представлен Совету управляющих на его сессии в марте 2018 года в документе GOV/2018/2. Окончательный вариант был подготовлен с учетом обсуждения, состоявшегося в Совете управляющих, а также замечаний, поступивших от государств-членов.

Содержание

| | |
|---|----|
| Резюме..... | 1 |
| Основной доклад..... | 7 |
| А. Энергетические применения..... | 7 |
| А.1. Ядерная энергетика сегодня..... | 7 |
| А.1.1. Страны, приступающие к развитию ядерной энергетики..... | 9 |
| А.1.2. Страны, расширяющие свои ядерно-энергетические программы..... | 10 |
| А.1.3. Страны, эксплуатирующие АЭС..... | 11 |
| А.2. Прогнозы развития ядерной энергетики..... | 12 |
| А.3. Топливный цикл..... | 14 |
| А.3.1. Начальная стадия топливного цикла..... | 14 |
| А.3.2. Обеспечение гарантированных поставок..... | 17 |
| А.3.3. Конечная стадия топливного цикла..... | 17 |
| А.3.4. Вывод из эксплуатации, восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами..... | 18 |
| В. Усовершенствованные ядерные и термоядерные системы..... | 23 |
| В.1. Усовершенствованные ядерные системы..... | 23 |
| В.1.1. Водоохлаждаемые реакторы..... | 23 |
| В.1.2. Системы на быстрых нейтронах..... | 24 |
| В.1.3. Газоохлаждаемые реакторы..... | 26 |
| В.1.4. Реакторы малой и средней мощности или модульные реакторы..... | 27 |
| В.1.5. Международные инициативы в области инновационных ядерно-энергетических систем..... | 29 |
| В.1.6. Неэлектрические применения ядерной энергетики..... | 30 |
| В.2. Термоядерный синтез..... | 31 |
| С. Применения ускорителей и исследовательских реакторов..... | 33 |
| С.1. Ускорители..... | 33 |
| С.2. Исследовательские реакторы..... | 34 |
| Д. Продовольствие и сельское хозяйство..... | 38 |
| Д.1. Готовность к ядерным аварийным ситуациям в продовольственной и сельскохозяйственной областях..... | 38 |
| Д.1.1. Проблемы реагирования на ядерные аварийные ситуации..... | 38 |
| Д.1.2. Новые разработки в области систем поддержки принятия решений для реагирования на аварийные ситуации..... | 38 |
| Д.1.3. DSS4NAFA..... | 39 |

| | |
|--|----|
| D.2. Использование облучения для разработки новых и эффективных вакцин против болезней животных и зоонозных заболеваний..... | 40 |
| D.3. Мультиизотопные «отпечатки пальцев» для идентификации источников агрозагрязнителей, поступающих из почвы в водоемы..... | 44 |
| E. Здоровье человека..... | 46 |
| E.1. Стереотаксическая лучевая терапия: высокоточный метод лучевой терапии..... | 46 |
| E.1.1. Технические требования..... | 47 |
| E.1.2. Требуемые специалисты..... | 48 |
| E.1.3. Показания..... | 48 |
| E.1.4. Вклады Агентства..... | 49 |
| E.2. Нейропсихиатрия: революция, произведенная молекулярной визуализацией в борьбе с болезнью Альцгеймера..... | 49 |
| E.2.1. Общие сведения..... | 49 |
| E.2.2. Диагностика..... | 50 |
| E.2.3. Глобальные инициативы и информированность..... | 51 |
| F. Окружающая среда..... | 53 |
| F.1. Ядерные методы в исследованиях пластикового загрязнения морской среды..... | 53 |
| G. Производство радиоизотопов и радиационные технологии..... | 56 |
| G.1 Альфа-терапия: новые терапевтические применения радиофармацевтических препаратов, содержащих альфа-излучатели..... | 56 |
| G.1.1. Радий-223..... | 57 |
| G.1.2. Генератор актиния-225/висмута-213..... | 57 |
| G.1.3. Актиний-225..... | 57 |
| G.1.4. Астатин-211..... | 58 |

Резюме

1. На конец 2017 года во всем мире насчитывалось 448 действующих ядерных энергетических реакторов и общемировая генерирующая мощность АЭС достигла 392 ГВт (эл.) — рост составил примерно 1,2 ГВт (эл.) по сравнению с 2016 годом. В 2017 году пять реакторов были окончательно остановлены, четыре реактора были подключены к энергосети и началось строительство четырех реакторов. Согласно ближайшим и долгосрочным прогнозам, средоточием роста будет Азия, где находится 40 из 59 строящихся реакторов и 51 из 59 реакторов, подключенных к энергосетям с 2005 года.

2. Сегодня ядерно-энергетическими мощностями располагают 30 стран, и 28 стран изучают возможность включения ядерной энергетики в национальную структуру энергопроизводства, строят соответствующие планы или уже активно работают над этим. Три страны, приступающих к развитию ядерной энергетики, начали строительство своих первых атомных электростанций (АЭС), и несколько других стран, которые приняли решение о внедрении ядерной энергетики, находятся на продвинутых этапах подготовки инфраструктуры. Согласно выполненным в 2017 году Агентством высоким прогнозам роста глобальной мощности ядерной энергетики, к 2030 году будет достигнуто увеличение на 42% по сравнению с текущими уровнями и к 2050 году произойдет удвоение мощности, а в случае низких прогнозов ядерная мощность будет постепенно сокращаться вплоть до 2040 года и восстановится до сегодняшнего уровня к 2050 году.

3. Преимущества ядерной энергетики с точки зрения смягчения последствий изменения климата, обеспечения энергетической безопасности и экологической и социально-экономической политики являются основными факторами, которые обуславливают намерения многих стран внедрить ядерную энергетику или расширить уже действующие программы. На Международной конференции на уровне министров «Атомная энергетика в XXI веке», проведенной Агентством в Абу-Даби, была подчеркнута необходимость обеспечения существенного роста ядерной энергетики в мире в интересах достижения целей в области борьбы с изменением климата и устойчивого развития.

4. Уровень мирового производства урана в 2017 году был аналогичен уровню 2016 года и составил около 63 000 тонн. Низкие цены значительно ограничивали возможности компаний по изысканию финансовых средств для проведения разведки, технико-экономических исследований и осуществления новых проектов по расширению имеющихся мощностей. Общемировые урановые ресурсы, мощности по конверсии, обогащению и изготовлению топлива более чем достаточны для удовлетворения спроса.

5. В августе 2017 года состоялось открытие склада Банка низкообогащенного урана (НОУ) МАГАТЭ в Казахстане. В ноябре 2017 года был подготовлен запрос предложений для приобретения НОУ.

6. На атомных электростанциях (АЭС) во всем мире продолжалась работа по укреплению и повышению безопасности. В число наиболее часто решаемых задач входят осуществление организационных изменений, устранение задержек со сроками ввода в эксплуатацию, развитие человеческого потенциала, оптимизация работ по проведению технического обслуживания, оценка крупных модификаций станций, связанных с обеспечением безопасности, укрепление управления авариями и обеспечение аварийной готовности и реагирования на площадке, а также лидерство и менеджмент в интересах обеспечения безопасности. Агентство с его нормами безопасности и усовершенствованными инструментами и материалами продолжало оказывать помощь и предоставлять руководство государствам-членам в этих областях.

7. На сегодняшний день из АЭС было выгружено около 400 000 тонн тяжелого металла в виде отработавшего ядерного топлива, около 25% этого объема подвергается переработке. В 27 странах насчитывается 151 вне реакторное сухое хранилище отработавшего топлива.

8. Ожидается, что в будущие годы в мире будет осуществлен значительный объем работы по выводу из эксплуатации энергетических реакторов, исследовательских реакторов, критических сборок и других установок топливного цикла.

9. Несколько стран добились определенного прогресса в осуществлении своих проектов по глубокому геологическому захоронению высокоактивных радиоактивных отходов и/или отработавшего топлива, считающегося отходами, а также проектов по скважинному захоронению изъятых из употребления закрытых радиоактивных источников. В мире функционируют пункты захоронения для всех других категорий радиоактивных отходов.

10. В ряде государств-членов продолжались научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) по разработке и внедрению усовершенствованных атомных реакторов. Большинство стран, приступающих к развитию ядерной энергетики, рассматривают строительство усовершенствованных водоохлаждаемых реакторов повышенной мощности в качестве своих первых реакторов. В настоящее время на основе многолетнего опыта проектирования, строительства и эксплуатации внедряется или разрабатывается целый ряд технологий быстрых реакторов. Многие государства-члены, в том числе страны, приступающие к развитию ядерной энергетики, работают над созданием газоохлаждаемых реакторов с характеристиками повышенной безопасности и эффективности. Разрабатывается более 50 реакторов малой и средней мощности или модульной конструкции, относящихся ко всем основным типам реакторов, при этом три из них находятся на продвинутых стадиях строительства. Эта деятельность получает поддержку в рамках ряда международных инициатив в области создания инновационных ядерно-энергетических систем.

11. Все более широкий интерес вызывает использование ядерной энергии в неэлектрических применениях, таких как опреснение морской воды, производство водорода, централизованное теплоснабжение, добыча нефти третичными методами и другие промышленные применения. Комбинированное производство может компенсировать значительную часть затрат на выработку электроэнергии на АЭС.

12. Значительный прогресс достигнут на площадке сооружения Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР), и в нескольких государствах-членах осуществляются широкомасштабные программы НИОКР по термоядерный синтезу. Еще одной ключевой вехой в освоении термоядерного синтеза было производство первой плазмы на оптимизированном стеллараторе «Вендельштайн 7-X».

13. Продолжалось использование ускорителей для экологических исследований, биомедицинских применений, в работе по материаловедению, определению характеристик, происхождения и углеродному датированию объектов культурного наследия. В начале 2017 года на Ближнем Востоке после получения первого пучка излучения был введен в эксплуатацию первый в регионе источник синхротронного излучения «SESAME».

14. В 56 странах находящиеся в эксплуатации 238 исследовательских реакторов продолжают играть стратегическую роль в поддержке работ, осуществляемых в медицинском, промышленном, образовательном и ядерно-энергетическом секторах. В семи странах строятся новые исследовательские реакторы, а в ряде других стран разрабатываются планы или изучается вопрос о строительстве новых объектов, которые станут основными национальными установками, способствующими развитию инфраструктуры и программ в области ядерной науки и технологий, включая ядерную энергетику. В 2017 году две новых научно-исследовательских организации стали международными центрами МАГАТЭ на базе исследовательских реакторов (ИСЕРР).

15. На сегодняшний день 97 исследовательских реакторов и 2 установки по производству медицинских изотопов были переведены с использования высокообогащенного урана (ВОУ) на НОУ, или же было подтверждено их закрытие. Необходима дополнительная работа для обеспечения коммерческой доступности низкообогащенного уранового топлива высокой плотности для конверсии высокопоточных, высокоэффективных исследовательских реакторов. В 2017 году продолжалась деятельность по сведению к минимуму используемого ВОУ, включая возврат ВОУ топлива исследовательских реакторов в страну происхождения. В 2017 году было завершено осуществление трехлетнего проекта по переводу единственного исследовательского реактора в Гане с ВОУ топлива на НОУ топливо после того, как ВОУ топливо было возвращено в страну происхождения — Китай.

16. Несмотря на проблемы, возникающие вследствие случайных отключений реакторов, поставки в мире молибдена-99, наиболее широко используемого медицинского изотопа, удавалось поддерживать благодаря эффективному сотрудничеству и упреждающим мерам, коллективно предпринимаемым основными международными производителями, органами, координирующими работу системы поставок, государственными заинтересованными организациями и соответствующими исследовательскими реакторами.

17. Применительно к готовности и реагированию в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации чрезвычайно важным является развитие возможностей по оперативному выявлению точек загрязнения в целях недопущения попадания потенциально загрязненной сельскохозяйственной продукции к потребителям. В аварийное реагирование могут быть вовлечены многие учреждения, и эффективная обработка и интерпретация больших массивов данных будет иметь решающее значение для принятия соответствующего решения. Имеются новые разработки в области ИТ-инструментов систем поддержки принятия решений (СППР), которые позволяют усовершенствовать обработку в режиме реального времени больших объемов данных и обеспечивают интегрированную поддержку принятия решений в пространственных и временных рамках. Вместе с тем имеется не так много инструментов, ориентированных на принятие решений в области производства продовольствия и сельского хозяйства. В целях решения этой проблемы Агентство разработало DSS4NAFA — комплексный облачный инструмент, позволяющий оптимизировать сбор, обработку и визуализацию данных, относящихся к сельскому хозяйству. После получения данных о концентрации радионуклидов данный инструмент способен предлагать ограничения в отношении продовольствия и возделывания культур с учетом уровня риска и конкретных допустимых пределов. В 2018 году выйдет бета-версия инструментария.

18. Начиная с 1950-х годов проводились исследования по облучению патогенов с целью создания вакцин, однако чрезмерное облучение часто приводит к разрушению нуклеиновых и протеиновых структур вакцин. Современные облучательные установки способны эффективным образом генерировать более высокие и более специфичные дозы, что, наряду с достижениями в геномных исследованиях и углублением знаний об иммунных системах, открывает возможности для разработки вакцин нового поколения. Нынешние достижения в разработке технологий облученных вакцин свидетельствуют о возможности производства новых вакцин против многих болезней, вызываемых вирусами, паразитами и бактериями; эти вакцины могут обеспечить достижение значительных позитивных результатов в охране здоровья человека и животных и экономике развивающихся стран.

19. Загрязнение рек и ручьев в результате сельскохозяйственной деятельности оказывает негативное воздействие на здоровье человека, биоразнообразие и рыбный промысел. Поскольку загрязнители могут поступать из многочисленных источников, необходимы множественные подходы для формулирования четкой методики определения характеристик происхождения и переноса растворенных веществ через почву. Стабильные изотопы азота, углерода, кислорода,

серы и водорода могут использоваться в качестве индикаторов или трассеров для получения этой информации в рамках агроэкосистем. Изотопы каждого элемента являются уникальными и, таким образом, могут использоваться для идентификации часто перекрещивающихся источников. Исследования с использованием нескольких индикаторов на основе стабильных изотопов при их интеграции с обычными методами позволяют получить ясную картину множественных путей загрязнения, и полученная информация будет способствовать повышению устойчивости практики землепользования.

20. Стереотаксическая лучевая терапия — это нехирургический усовершенствованный метод лучевой терапии рака, обеспечивающий высокоточную таргетированную доставку излучения к опухолям и позволяющий при этом избегать значительные риски, связанные с инвазивной хирургией, особенно в труднодоступных точках или в местах, расположенных рядом с жизненно важными органами. Система обеспечивает трехмерную визуализацию и четырехмерную локализацию опухоли, и в ней используются узкофокусированные гамма- или рентгеновские лучи. При использовании линейного ускорителя терапия больших опухолей может проводиться в течение одного сеанса. Этот метод может использоваться для лечения многих функциональных расстройств мозга, рака легкого на ранней стадии, раков простаты, поджелудочной железы, печени и почки, а также головы, шеи и позвоночника у медицински неоперабельных больных. Клинические испытания показывают, что стереотаксическая лучевая терапия может стать экономически эффективным методом лечения по сравнению с традиционной лучевой терапией во многих клинических ситуациях.

21. Деменция проявляется во многих формах, при этом чаще всего при развитии болезни Альцгеймера. На ранних стадиях диагностика отличительных клинических симптомов может быть затруднена. Вместе с тем ядерные методы в настоящее время начинают играть важную роль в выявлении лежащих в основе болезни процессов, которые начинают развиваться иногда задолго до того, как становятся заметными ее симптомы, что обеспечивает проведение надлежащей и дифференциальной диагностики. Метод ядерной медицины, известный также как молекулярная визуализация, позволяет диагностировать различные мозговые расстройства и дифференцировать симптомы, вызванные нейродегенеративной деменцией и другими состояниями с похожими симптомами, такими как мозговой инсульт. Кроме того, радиоиндикаторы могут служить в качестве надежных биомаркеров деменции, помогающих врачам диагностировать различные дементные нарушения. Успехи, достигнутые в нейровизуализации, обеспечивают получение критически важных знаний о протекании заболевания, тем самым повышая качество терапии.

22. Океаны превратились в мусорную свалку огромного количества загрязняющих материалов, поступающих из наземных источников, включая пластмассы. Благодаря исследованиям с использованием ядерных и изотопных методов теперь можно лучше понимать особое воздействие микропластиков на морские организмы. Микропластики пластмасс приводят к возникновению неблагоприятных последствий в результате простого поглощения и могут также оседать во внутренних органах и быть эффективной средой для дальнейшего переноса загрязнителей, в том числе к человеку. Проводимые в настоящее время исследования направлены на изучение судьбы и токсичности микропластиков и связанных с ними загрязнителей применительно к социально и экономически важным морским видам.

23. На протяжении десятилетий терапевтические радиофармпрепараты использовались для уничтожения раковых клеток. Однако бета-частицы, которые использовались для этой цели, имеют гораздо большую длину пробега, чем альфа-частицы с той же самой энергией. Именно это отличие альфа-частиц позволяет с высокой точностью таргетировать раковые клетки с гораздо меньшим риском повреждения других тканей вне или вокруг целевой зоны. В настоящее время проводится оценка различных радионуклидов, являющихся альфа-излучателями, на

доклиническом и клиническом уровнях с целью определения возможности их использования в качестве радиофармацевтических препаратов, которые позволят еще больше улучшить лечение рака.

24. В 2017 году в реализации проекта реконструкции лабораторий ядерных применений был достигнут ряд важных результатов. Открыта новая Лаборатория борьбы с насекомыми-вредителями и начато строительство модульной лаборатории с изменяемой планировкой в Зайберсдорфе. В течение года были мобилизованы дополнительные внебюджетные средства, и общий объем финансовых взносов, полученных от 31 государства-члена и других доноров на цели модернизации, достиг почти 32,5 млн евро. Благодаря усилиям, направленным на расширение партнерских связей Агентства и мобилизацию ресурсов, в дополнение к традиционным партнерам, было заключено партнерское соглашение с компанией «Вариан медикал системс», предусматривающее аренду на десять лет линейного ускорителя для Дозиметрической лаборатории с дополнительными услугами поддержки, предоставляемыми государством-членом в качестве взноса в натуральной форме. Агентство подписало меморандум о сотрудничестве с «Симадзу корпорэйшн», предусматривавший безвозмездную передачу жидкостного хроматографа в рамках Инициативы в отношении мирного использования ядерной энергии, для осуществления деятельности, направленной на улучшение поддержки, оказываемой государствам-членам в области исследований по безопасности пищевых продуктов и подготовки кадров.

Обзор ядерных технологий — 2018

Основной доклад

А. Энергетические применения

А.1. Ядерная энергетика сегодня

1. По состоянию на 31 декабря 2017 года в мире эксплуатировалось 448 ядерных энергетических реакторов суммарной мощностью 392 ГВт (эл.)¹ (см. таблицу А-1). Это немногим больше — примерно на 1,2 ГВт (эл.) — суммарной мощности 2016 года. Из общего числа находящихся в эксплуатации реакторов 81,9% — это реакторы с легководным замедлителем и теплоносителем, 10,7% — реакторы с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем, 3,3% — легководные реакторы с графитовым замедлителем и 3,1% — газоохлаждаемые реакторы. Три установки представляют собой быстрые реакторы с жидкометаллическим теплоносителем. На 370 легководных реакторах было произведено почти 88% электроэнергии, вырабатываемой на АЭС.

2. В 2017 году к энергосетям были подключены четыре новых легководных реактора с водой под давлением (PWR): три реактора в Китае («Фуцин-4», «Тяньвань-3», «Янцзян-4») и один реактор в Пакистане («Чашма-4»). Окончательно остановлены были пять реакторов: «Кори-1» (Республика Корея), «Оскархамм-1» (Швеция), «Санта-Мария-де-Гаронья» (Испания), «Мондзю» (Япония) и «Гундремминген-В» (Германия). Реакторы «Мондзю» и «Санта-Мария-де-Гаронья» были окончательно остановлены после периода длительного останова.

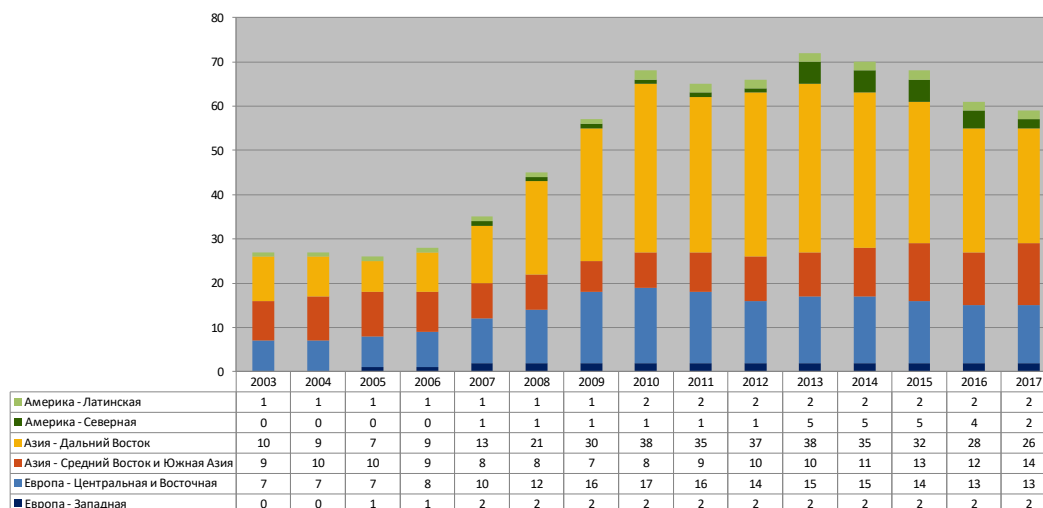


РИС. А-1. Число строящихся реакторов по регионам

(Источник: Информационная система МАГАТЭ по энергетическим реакторам, <http://www.iaea.org/pris>)

3. По состоянию на 31 декабря 2017 года на стадии строительства находились 59 реакторов. Было начато строительство АЭС «Син-Кори-5» (Республика Корея), энергоблоков 3 и 4 АЭС «Куданкулам-3» (Индия) и АЭС «Руппур-1» (Бангладеш). Согласно прогнозам, рост мощностей, а также развитие ядерной энергетики в краткосрочной и долгосрочной перспективе будет происходить преимущественно в Азии (рис. А-1), где строится 40 реакторов. В Азии также находятся 51 из 59 новых реакторов, подключенных к энергосетям в период с 2005 года.

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

Таблица А-1. Действующие и строящиеся ядерные энергетические реакторы в мире (по состоянию на 31 декабря 2017 года)^а

| СТРАНА | Действующие реакторы | | Строящиеся реакторы | | Электроэнергия, произведенная на АЭС в 2017 году | | Общий опыт эксплуатации на конец 2017 года | |
|-------------------------------|----------------------|-----------------|---------------------|-----------------|--|---------------------------------|--|--------|
| | Число энергоблоков | Всего МВт (эл.) | Число энергоблоков | Всего МВт (эл.) | ТВт·ч | % от общего объема производства | Годы | Месяцы |
| АРГЕНТИНА | 3 | 1 633 | 1 | 25 | 5,7 | 4,5 | 82 | 2 |
| АРМЕНИЯ | 1 | 375 | | | 2,4 | 32,5 | 43 | 8 |
| БАНГЛАДЕШ | | | 1 | 1 080 | | | | |
| БЕЛАРУСЬ | | | 2 | 2 220 | | | | |
| БЕЛЬГИЯ | 7 | 5 918 | | | 40,2 | 49,9 | 289 | 7 |
| БОЛГАРИЯ | 2 | 1 926 | | | 14,9 | 34,3 | 163 | 3 |
| БРАЗИЛИЯ | 2 | 1 884 | 1 | 1 340 | 14,9 | 2,7 | 53 | 3 |
| ВЕНГРИЯ | 4 | 1 889 | | | 15,2 | 50,0 | 130 | 2 |
| ГЕРМАНИЯ | 7 | 9 515 | | | 72,2 | 11,6 | 832 | 7 |
| ИНДИЯ | 22 | 6 255 | 7 | 4 824 | 34,9 ^б | 3,2 | 482 | 11 |
| ИРАН, ИСЛАМСКАЯ РЕСПУБЛИКА | 1 | 915 | | | 6,4 | 2,2 | 6 | 4 |
| ИСПАНИЯ | 7 | 7 121 | | | 55,6 | 21,2 | 329 | 1 |
| КАНАДА | 19 | 13 554 | | | 95,1 | 14,6 | 731 | 6 |
| КИТАЙ | 39 | 34 514 | 18 | 19 016 | 232,8 | 3,9 | 280 | 9 |
| КОРЕЯ, РЕСПУБЛИКА | 24 | 22 494 | 4 | 5 360 | 141,3 | 27,1 | 523 | 5 |
| МЕКСИКА | 2 | 1 552 | | | 10,6 | 6,0 | 51 | 11 |
| НИДЕРЛАНДЫ | 1 | 482 | | | 3,3 | 2,9 | 73 | 0 |
| ОБЪЕДИНЕННЫЕ АРАБСКИЕ ЭМИРАТЫ | | | 4 | 5 380 | | | | |
| ПАКИСТАН | 5 | 1 318 | 2 | 2 028 | 8,1 | 6,2 | 72 | 5 |
| РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ | 35 | 26 142 | 7 | 5 520 | 190,1 | 17,8 | 1 261 | 9 |
| РУМЫНИЯ | 2 | 1 300 | | | 10,6 | 17,7 | 31 | 11 |
| СЛОВАКИЯ | 4 | 1 814 | 2 | 880 | 14,0 | 54,0 | 164 | 7 |
| СЛОВЕНИЯ | 1 | 688 | | | 6,0 | 39,1 | 36 | 3 |
| СОЕД. КОРОЛЕВСТВО | 15 | 8 918 | | | 63,9 | 19,3 | 1 589 | 7 |
| СОЕД. ШТАТЫ АМЕРИКИ | 99 | 99 952 | 2 | 2 234 | 805,6 | 20,0 | 4 309 | 9 |
| УКРАИНА | 15 | 13 107 | 2 | 2 070 | 80,4 | 55,1 | 488 | 6 |
| ФИНЛЯНДИЯ | 4 | 2 769 | 1 | 1 600 | 21,6 | 33,2 | 155 | 4 |
| ФРАНЦИЯ | 58 | 63 130 | 1 | 1 630 | 381,8 | 71,6 | 2 164 | 4 |
| ЧЕШСКАЯ РЕСПУБЛИКА | 6 | 3 930 | | | 26,8 | 33,1 | 158 | 10 |
| ШВЕЙЦАРИЯ | 5 | 3 333 | | | 19,6 | 33,4 | 214 | 11 |
| ШВЕЦИЯ | 8 | 8 629 | | | 63,1 | 39,6 | 451 | 0 |
| ЮЖНАЯ АФРИКА | 2 | 1 860 | | | 15,1 | 6,7 | 66 | 3 |
| ЯПОНИЯ | 42 | 39 752 | 2 | 2 653 | 29,3 | 3,6 | 1 823 | 5 |
| Всего ^{с, d} | 448 | 391 721 | 59 | 60 460 | 2 503,1 | | 17 430 | 6 |

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

б. Данные о производстве электроэнергии в Индии основаны на предоставленных сведениях о годовом уровне по стране, поскольку на момент выпуска настоящего доклада данные по некоторым реакторам отсутствовали.

с. Примечание: суммарные показатели включают следующие данные по Тайваню, Китай: 6 энергоблоков мощностью 5052 МВт (эл.) в эксплуатации; 2 энергоблока мощностью 2600 МВт (эл.) в стадии строительства; на АЭС выработано 35,1 ТВт·час электроэнергии, что составляет 16,3% общего производства электроэнергии.

д. 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 (206 лет, 1 месяц).

A.1.1. Страны, приступающие к развитию ядерной энергетики

4. Среди 28 государств-членов, которые выразили заинтересованность в развитии ядерной энергетики, 19 государств приступили к проведению исследований по вопросам создания инфраструктуры ядерной энергетики, 4 государства уже приняли решение и осуществляют работу по подготовке необходимой инфраструктуры и 5 государств подписали контракты и находятся в стадии подготовки или уже приступили к строительству. Еще 21 государство-член, как ожидается, продолжит работу, направленную на принятие решения о создании программы ядерной энергетики в течение следующего десятилетия.

5. В Объединенных Арабских Эмиратах продолжалось строительство всех четырех реакторов первой АЭС страны, расположенной в местности под названием Барака. В 2018 году планируется ввести в эксплуатацию энергоблок №1, при этом три остальных энергоблока будут вводиться в эксплуатацию в последующие годы. В 2017 году Агентство провело ряд миссий по оценке обучения и подготовки кадров и по предварительному рассмотрению вопросов эксплуатационной безопасности. В Беларуси продолжается строительство первой АЭС в Островце, и ввод в эксплуатацию двух энергоблоков намечен на 2019 и 2020 годы. В 2017 году был представлен окончательный отчет по анализу безопасности с целью рассмотрения вопросов регулирования. В 2017 году была проведена миссия Агентства по вопросам проектирования площадки с учетом внешних событий.

6. В Бангладеш 30 ноября были начаты связанные с обеспечением безопасности строительные работы на энергоблоке №1 АЭС «Руппур». Ожидается, что два энергоблока АЭС «Руппур» будут введены в эксплуатацию в 2023 и 2024 годах. В Турции в октябре были начаты не связанные с обеспечением безопасности строительные работы на площадке Аккую на основании ограниченной лицензии на строительство, и ввод в эксплуатацию первого энергоблока планируется на 2023 год. Египет завершил переговоры с Государственной корпорацией по атомной энергии «Росатом» Российской Федерации по четырем ключевым соглашениям о строительстве четырех энергоблоков АЭС «Эд-Дабба», которое планируется завершить в период с 2023 по 2026 год.

7. Продолжаются переговоры между Иорданией и «Росатомом». Ожидается, что в 2018 году по завершении ключевого исследования по развитию энергосети и изысканий по источникам охлаждающей воды будет принято окончательное инвестиционное решение. В октябре 2017 года Нигерия подписала соглашения с Российской Федерацией о сооружении и эксплуатации АЭС и ядерного исследовательского центра, а также «дорожную карту» о сотрудничестве в сфере мирного использования атомных технологий. В Польше и Саудовской Аравии осуществлялась работа по подготовке документации для международных тендеров, выпуск которой планируется в 2018 году. Ожидается, что Кения примет решение по реализации ядерно-энергетической программы.

8. Государства-члены продолжают получать помощь, которую Агентство оказывает в формировании необходимой национальной ядерной инфраструктуры, руководствуясь изложенным в документе «Milestones» («Основные этапы») подходом, поддерживающим создание безопасных, надежных и устойчивых ядерно-энергетических программ. Она включает проведение независимой экспертизы и экспертных миссий, учебных курсов и предоставление инструментов моделирования, которые системно охватывают 19 вопросов, касающихся ядерной инфраструктуры. С учетом миссии по комплексному рассмотрению ядерной инфраструктуры (ИНИР), проведенной в Гане в 2017 году, число миссий ИНИР, состоявшихся после их учреждения в 2009 году, достигло 22 в 16 государствах-членах.

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

9. В настоящее время в Китае насчитывается 38 действующих и 19 строящихся ядерных энергетических реакторов, и он продолжает оставаться страной с программой, предусматривающей наиболее масштабное расширение ядерной энергетики, которая также планирует построить к 2030 году 30 реакторов в других странах.

10. Проект строительства АЭС «Олкилуото-3» с реактором EPR в Финляндии вступил в стадию работ по вводу в эксплуатацию по завершении «холодных» функциональных испытаний. После проведения «горячих» функциональных испытаний в начале 2019 года планируется начать коммерческую эксплуатацию. Проект «Ханхикиви-1» остается на стадии рассмотрения лицензии, при этом начало строительства планируется на 2019 год.

11. В марте 2017 года Европейская комиссия одобрила строительство новых энергоблоков на АЭС «Пакш-II», и в апреле 2017 года Агентство по атомной энергии Венгрии выдало окончательную экологическую лицензию и лицензию на площадку АЭС.

12. В сентябре 2017 года на энергоблоке № 2 АЭС «Карачи» в Пакистане, который является первым из двух китайских реакторов «Хуалун-1», строящихся на данной площадке, был смонтирован первый из трех парогенераторов (рис. А-2).



Рис. А-2. Строительство на энергоблоке № 2 АЭС «Карачи», Пакистан, сентябрь 2017 года (фото: Китайская ядерно-техническая корпорация — КЯТК)

13. В марте в Исламской Республике Иран на АЭС «Бушир-2» были начаты не связанные с обеспечением безопасности строительные работы. Сооружение энергоблока ВВЭР-1000 планируется завершить в 2024 году, и в 2026 году будет построена «Бушир-3».

14. В США продолжалось строительство энергоблоков № 3 и № 4 АЭС «Вогтль» с реакторами AP1000, при этом руководство проектом от корпорации «Вестингауз» перешло к компании «Саузерн ньюклар»; начало эксплуатации планируется на 2021 и 2022 годы соответственно. Строительство энергоблоков № 2 и № 3 АЭС «Саммер», также оснащенных реакторами AP1000, было приостановлено в июле 2017 по экономическим причинам.

15. В мае в Аргентине государственная ядерная компания «Нуклеоэлектрика» подписала контракты с Национальной ядерной корпорацией Китая (НЯКК) на два новых реактора: строительство нового реактора «Candu» мощностью 720 МВт (эл.) планируется начать в 2018 году и реактора «Хуалун-1» мощностью 1000 МВт (эл.) — в 2020 году.

16. В августе Индия подписала контракты с «Росатомом» на строительство блоков № 5 и № 6 АЭС «Куданкулам» — оба с реакторами типа ВВЭР-1000, которые будут строиться в сотрудничестве с Ядерно-энергетической корпорацией Индии.

17. В октябре министерство окружающей среды Южной Африки выдало экологическое разрешение на строительство и эксплуатацию АЭС мощностью 4000 МВт (эл.) с сопутствующей инфраструктурой в Дуйнефонтейне, рядом с действующей АЭС «Куберг».

А.1.3. Страны, эксплуатирующие АЭС

18. По состоянию на конец 2017 года из 448 эксплуатируемых АЭС 50% находились в эксплуатации в течение 30–40 лет и 15% — более 40 лет. В настоящее время на все большем числе АЭС осуществляются программы по обеспечению долгосрочной эксплуатации и управлению старением.

19. В целях реализации своей промышленной стратегии обеспечения безопасной эксплуатации существующего парка АЭС в течение срока, значительно превышающего 40 лет, компания «Электрисите де Франс» (ЭДФ) приступила к осуществлению программы «Grand Carénage» («Большая модернизация»), включающую в себя планы масштабной реконструкции станций в целях повышения эксплуатационных показателей и безопасности. Предполагается, что ее осуществление продлится десять лет. Что касается замены части существующего парка Франции, то по завершении «холодных» функциональных испытаний в стадии ввода в эксплуатацию находится EPR «Фламанвиль-3». После проведения «горячих» функциональных испытаний коммерческую эксплуатацию планируется начать в конце 2018 года.

20. Возобновление лицензий действующих АЭС в США представляет собой отработанный, стабильный процесс, и 86 из 99 реакторов получили возобновленные лицензии, предусматривающие продление общего срока эксплуатации до 60 лет. В рамках того же самого процесса регулирования, который применяется для получения первоначального продления лицензии, Комиссия по ядерному регулированию (КЯР) США выпустила в июле 2017 года руководящие документы по выдаче последующих лицензий на продление эксплуатации на период до 80 лет.

21. Энергоблоки № 5 и № 6 АЭС «Козлодуй» в Болгарии имели лицензии на эксплуатацию со сроками до 2017 и 2019 года. В ноябре 2017 года Агентство по ядерному регулированию Болгарии продлило лицензию энергоблока № 5 до 2027 года, впервые таким образом выдав разрешение на продолжение эксплуатации ядерного реактора сверх срока действия первоначальной лицензии.

22. В Японии для пяти из 42 работоспособных реакторов были одобрены результаты инспекций, подтверждающие, что эти реакторы отвечают новым стандартам регулирования безопасности, и их эксплуатация была возобновлена. Таковыми являются: «Сэндай-1» и «Сэндай-2», Кюсю; «Иката-3», Сикоку; «Такахама-3» и «Такахама-4», Кансай. Еще 20 реакторов подали заявки на возобновление эксплуатации.

23. Уровень эксплуатационной безопасности АЭС по-прежнему высок, о чем свидетельствуют показатели безопасности, информацию о которых собирают Агентство и Всемирная ассоциация организаций, эксплуатирующих атомные электростанции. На рис. А-3 показано количество внеплановых или аварийных остановов реакторов в автоматическом и ручном режимах на каждые 7000 часов (приблизительно один год) эксплуатации каждой установки. Количество аварийных остановов является одним из нескольких возможных и часто используемых показателей безопасности.

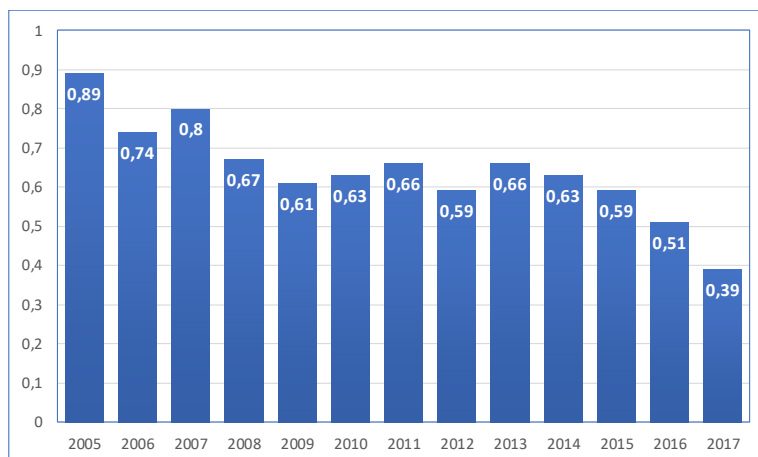


РИС. А-3. Средний показатель аварийных остановов: число остановов в автоматическом и в ручном режиме за 7000 часов работы установки (источник: Информационная система Агентства по энергетическим реакторам: www.iaea.org/pris).

А.2. Прогнозы развития ядерной энергетики

24. Согласно прогнозам Агентства, составленным в 2017 году (рис. А-4), общемировые мощности ядерной энергетики при сценарии высокого роста достигнут уровня 554 ГВт (эл.) к 2030 году и 874 ГВт (эл.) к 2050 году. Это представляет собой увеличение на 42% по сравнению с текущими уровнями к 2030 году и удвоение мощностей к 2050 году. В случае сценария низкого роста мощности производства электроэнергии на АЭС, согласно прогнозу, будут постепенно снижаться до 2040 года, а затем к 2050 году вернуться примерно к сегодняшнему уровню.

25. Широкий диапазон этих прогнозов отчасти обусловлен тем, что примерно в 2030 году и последующий период планируется вывести из эксплуатации значительное количество реакторов, особенно в Северной Америке и Европе, а также неопределенностью в отношении строительства новых ядерных мощностей взамен выведенных из эксплуатации.

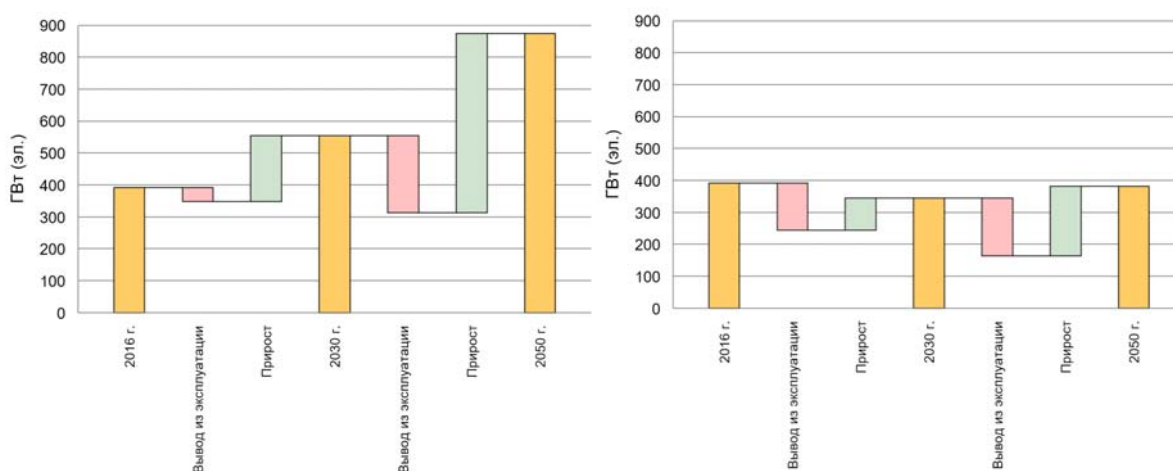


РИС. А-4. Высокий (слева) и низкий прогнозы общемировой мощности ядерной энергетики. (источник: Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, IAEA Reference Data Series No. 1, 2017)

26. Сценарии высоких темпов роста, разработанные МАГАТЭ, Международным энергетическим агентством (МЭА) Организации экономического сотрудничества и развития (ОЭСР) и Всемирной ядерной ассоциацией (ВЯА), последовательно указывают на рост мощностей к 2030 году в диапазоне от 500 до 600 ГВт (эл.), в то время как низкие сценарии отражают более высокий уровень неопределенности в отношении темпов роста (см. рис. А-4).

27. Ядерная энергетика в значительной мере способствует сокращению выбросов парниковых газов во всем мире и в то же время позволяет удовлетворять растущий спрос на электроэнергию в условиях роста численности населения и необходимости обеспечивать устойчивое развитие. При эксплуатации реакторов практически не образуются парниковые газы или загрязняющие атмосферу вещества, и показатели выбросов на протяжении всего их жизненного цикла крайне низки. Таким образом, ядерная энергетика позволяет предотвращать выбросы почти 2 млрд тонн диоксида углерода ежегодно.

28. В Парижском соглашении, ратифицированном 171 страной, предлагается удерживать рост среднемировой температуры на отметке менее 2°C по сравнению с доиндустриальными показателями. В выводах МАГАТЭ, МЭА и ВЯА подчеркивается необходимость расширения масштабов развития ядерной энергетики в долгосрочной перспективе в интересах достижения цели 2°C. Ее преимущества с точки зрения смягчения последствий изменения климата и обеспечения энергетической безопасности, а также не связанная с климатом экологическая и социально-экономическая польза в значительной степени обуславливают намерения многих стран, в особенности развивающихся стран, в ближайшие десятилетия создать у себя ядерную энергетiku или расширить уже имеющиеся программы.

29. С 30 октября по 2 ноября 2017 года в Абу-Даби проходила организованная Агентством Международная конференция на уровне министров «Атомная энергетика в XXI веке». Национальные доклады и панельные дискуссии были сконцентрированы на роли ядерной энергетики в решении трилеммы 3Э (энергия, экономика, экология), проблемах развития инфраструктуры ядерной энергетики, аспектах ядерной энергии, относящихся к безопасности и надежности, а также инновациях и достижениях в сфере ядерных технологий. На Конференции была подчеркнута необходимость обеспечения существенного роста ядерной энергетики в мире в интересах достижения целей в области устойчивого развития и борьбы с изменением климата.

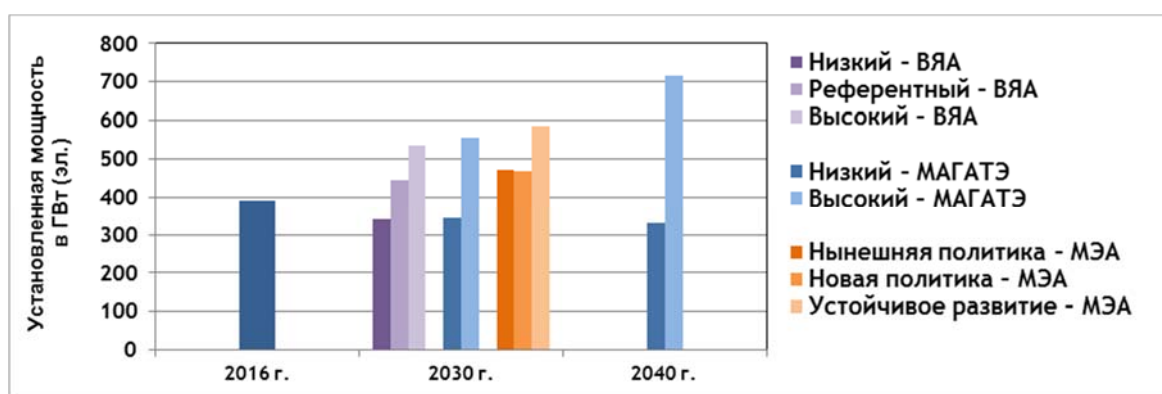


РИС. А-5. Сравнение выполненного МАГАТЭ в 2017 году прогноза роста ядерно-энергетических мощностей со сценариями АЯЭ и прогнозами ВЯА (цифры АЯЭ базируются на брутто-мощности).

А.3. Топливный цикл

А.3.1. Начальная стадия топливного цикла

Ресурсы и производство урана

30. В 2017 году спотовые цены на уран оставались на низком уровне, как правило, в пределах от 42 до 54 долл./кг U. Низкие цены значительно ограничивали возможности компаний по изысканию средств для проведения разведки, технико-экономических исследований и осуществления новых проектов по расширению имеющихся мощностей. Таким образом, общемировой объем добычи в 2017 году скорее всего будет аналогичен показателю 2016 года, который составил 63 366 тонн урана (т U) против 60 496 т U в 2015 году.

31. Лидирующим производителем урана в мире оставался Казахстан, получающий свой уран практически полностью методом выщелачивания. После периода быстрого роста объемов добычи в 2000–2012 годах с выходом на уровень 23 800 т U в 2015 году и 30 062 т U в 2016 году ожидается, что в 2017 году будет достигнут аналогичный показатель.

32. В Канаде, которая является вторым по величине производителем урана, годовой объем добычи 5000 т U/год на руднике «Сигар-Лейк» (урановый рудник с самыми богатыми рудами в мире, промышленная добыча на котором началась в мае 2015 года), как ожидается, возрастет до 6900 т U/год к началу 2018 года.

33. В 2016 году на урановом руднике «Хусаб» в Намибии началась коммерческая добыча, и за год объем производства достиг 192 т U. Предполагается, что объемы добычи будут расти, и полная производительность рудника может достичь уровня 5770 т U/год при прогнозируемом сроке эксплуатации свыше 20 лет. В 2017 году продолжалась эксплуатация урановых рудников «Рёссинг» и «Лангер Хайнрих» в Намибии. На других намибийских урановых месторождениях продолжалась ограниченная работа по технико-экономическому обоснованию.

34. В Австралии объем добычи методом подземного выщелачивания на месторождении «Фор-Майл» составил примерно 1400 т U/год. В проекте «Рейнджер» объем производства в 2016 году составил 1994 т U, и в 2017 году ожидается 1700–2000 т U против 4000–6000 т U/год в период между 1997 и 2009 годами. В нынешних обстоятельствах добыча и переработка должна прекратиться к январю 2020 года и проведение работ по восстановлению должно быть завершено в течение последующих пяти лет. На руднике «Олимпик-Дэм», на котором добывается медь, уран, золото и серебро, продолжались обычные добычные операции, и одновременно проводились дальнейшие пробные работы по кучному выщелачиванию на отдельном участке рудника. В Западной Австралии для нескольких урановых месторождений были проведены изыскания и получены разрешения, но твердые даты в отношении строительства и открытия зафиксированы не были.

35. Применительно к месторождению Кванефьелд в Гренландии, Королевство Дания, продолжался процесс проведения технико-экономических и экологических исследований и получения разрешений в связи с проектом по добыче редкоземельных элементов, благородных металлов и урана.

36. Китай продолжает демонстрировать твердую приверженность расширению ядерной деятельности посредством увеличения расходов на разведку и разработку урановых месторождений как в стране, так и за рубежом. Расходы на разработку за рубежом продолжают оставаться значительными, главным образом вследствие работ, осуществляемых на руднике «Хусаб» в Намибии.

37. В рамках уранового проекта «Саламанка» в Испании осуществляется процесс лицензирования и в соответствии с национальными правилами завершен ряд юридических процедур. Сооружение и ввод в эксплуатацию этой установки потребуют санкции правительства, которая зависит от доклада государственного регулирующего органа по вопросам ядерной безопасности.

38. В начале 2017 года компания «Индустриас нуклеарес ду Бразил» (ИНБ) приступила к эксплуатации своего рудника «Энхеньо» в бразильском штате Баия, и, по ее оценке, ожидается выход на уровень производства 73 т U концентрата в год с возможным повышением годового производства до 280–300 т U концентрата. Осуществляется работа по технико-экономическому обоснованию и процессу регулирования в отношении подземного расширения или, альтернативно, создания второго открытого карьера на существующем руднике «Каэтите».

39. Многие урановые проекты были приостановлены или осуществлялись с низким уровнем финансирования. Некоторые проекты, осуществление которых было начато или которые находились на продвинутых стадиях строительства, сохраняются в законсервированном состоянии. Важным объявлением в ноябре 2017 года стало приостановление производства на рудниках «Макартур Ривер» и «Ки-Лейк» в Канаде на предположительный срок 10 месяцев.

Конверсия и обогащение

40. Нынешние мощности по конверсии и обогащению более чем достаточны для удовлетворения спроса, однако сегментированный характер рынка с производством, сконцентрированным на нескольких предприятиях, создает определенные проблемы.

41. Корпорация «Сентрус энерджи» и Окриджская национальная лаборатория Министерства энергетики США в октябре 2017 года подписали контракт о продолжении совместной работы, направленной на сокращение расходов и повышение эффективности технологии обогащения методом газового центрифугирования AC100.

42. После проведения необходимых испытаний на Уральском электрохимическом комбинате в Российской Федерации, расположенном в Новоуральске Свердловской области, начиная с 2018 года будут внедряться усовершенствованные газовые центрифуги «поколения 9+», которые в перспективе должны обеспечить существенную экономию энергии.

Изготовление топлива

43. В соответствии с контрактом, вступившим в силу в январе 2017 года, компания «ТВЭЛ», входящая в состав госкорпорации «Росатом», будет производить и поставлять топливные сборки в 2017 и 2018 годах для китайского экспериментального быстрого реактора, сооруженного при участии российских партнеров. В сентябре 2017 года компания «ТВЭЛ» подписала контракт с ЗАО «АЕК» на поставку ядерного топлива для реактора второго энергоблока Армянской АЭС мощностью 440 МВт для его следующей перезагрузки, а также в качестве резерва топлива на два года.

44. В январе 2017 года Ядерная топливная компания в Баотоу, входящая в состав НЯКК, получила разрешение на производство ядерных топливных стержней для реактора AP1000 корпорации «Вестингауз электрик». Это позволяет НЯКК завершить сооружение своей линии по производству топливных стержней и начать изготовление топливныхборок для реактора AP1000.

45. Благодаря переходу от испытательной производственной линии к промышленной эксплуатации на предприятии Китайской северной ядерной топливной компании в Баотоу в июле 2017 года было начато массовое производство топливных элементов для высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (HTGR). На этом предприятии уже было изготовлено примерно

200 000 сферических топливных элементов при расчетной мощности 300 000 сферических топливных элементов в год, предназначенных для демонстрационного реактора HTGR, строящегося в Шидаоване, провинция Шаньдун.

46. В апреле 2017 года УЯР Японии санкционировало изменение разрешения на изготовление топлива на заводе по изготовлению топлива в Йокосуке, префектура Канагава, корпорации «Глобал ньюклар фьюэл — Джапан» (GNF-J), что является одним из ключевых шагов по соблюдению новых регулирующих требований, введенных после аварии на АЭС «Фукусима-дайити». GNF-J входит в состав совместного предприятия «Глобал ньюклар фьюэл», руководимого корпорацией «Дженерал электрик», с участием компаний «Хитати» и «Тосиба», и ее предназначение — проектирование и изготовление топлива для кипящих реакторов.

47. В сентябре 2017 года на АЭС «Такахама» в Японии была доставлена из Франции партия из 16 тепловыделяющих сборок на основе смешанного оксидного (МОХ) топлива, для использования в 2018 году на энергоблоке № 4. Холдинг «АРЕВА»² заключил контракт с «Ньюклар фьюэл индастриз» на изготовление 32 тепловыделяющих сборок на основе МОХ-топлива для энергоблоков № 3 и № 4 АЭС «Такахама» компании «Кансай электрик».

48. В мае 2017 года в Канаде корпорация «Камеко» подписала соглашение о продлении на 10 лет поставок ядерного топлива для АЭС «Брюс».

49. В июне 2017 года компания «Вестингауз электрик» приступила к производству устойчивого к авариям топлива «EpiCore™», и ожидается, что уже в 2018 году будут изготовлены опытно-испытательные стержни. Компания предполагает, что топливо «EpiCore» обеспечит достижение безопасности, влекущее за собой изменение проектных основ, и повышение эффективности использования урана, что позволит энергопредприятиям экономить финансовые средства.

50. В августе 2017 года «Вестингауз электрик» продлила свой контракт с энергетической компанией США «PSE&G» в шт. Нью-Джерси на поставку топлива для обоих энергоблоков АЭС «Салем».

51. Компания «АРЕВА» и находящаяся в США корпорация — разработчик ядерного топлива «Лайтбридж» в сентябре 2017 года договорились о создании совместного предприятия на условиях 50:50, которое начнет свою работу в начале 2018 года, для изготовления и промышленного освоения новой линейки усовершенствованного металлического топлива для АЭС. Компания «Лайтбридж» разработала топливо, которое может быть использовано на существующих и новых строящихся АЭС в целях повышения эксплуатационной эффективности и безопасности. В октябре 2017 года «Лайтбридж» подписала заказы с Институтом энергетических технологий (ИФЕ), оператором норвежского исследовательского реактора в Халдене, на разработку и изготовление второго облучательного устройства для тестирования топлива, что представляет собой важный шаг в выводе разрабатываемой компанией топливной технологии на рынок.

52. В февраля 2017 года компания «АРЕВА» перешла ко второму этапу работы в рамках программы Министерства энергетики США по внедрению усовершенствованного устойчивого к авариям топлива, направленной на повышение эффективности и надежности топлива посредством применения легированных хромом топливных таблеток и хромированных оболочек.

² После реструктуризации французской атомной отрасли, в январе 2018 года «АРЕВА» была разделена на компании «Орано» (операции с ядерным топливом) и «Фраматом» (эксплуатация ядерных реакторов).

53. В Российской Федерации продолжаются испытания двух новых видов топлива — регенерированного смешанного (РЕМИКС) топлива для легководных реакторов (LWR) и смешанного уран-плутониевого нитридного топлива для быстрых реакторов.

А.3.2. Обеспечение гарантированных поставок

54. В декабре 2010 года Совет управляющих Агентства утвердил создание Банка низкообогащенного урана (НОУ) МАГАТЭ. Агентство и Казахстан завершили работу по подготовке пакета базовых соглашений в 2015 году о создании Банка НОУ МАГАТЭ на площадке Ульбинского металлургического завода (УМЗ) в Усть-Каменогорске. Были подписаны соглашения о транзите с Российской Федерацией и Китаем, и продвигаются вперед переговоры по заключению договоров о транспортировке с уполномоченными организациями этих двух стран и Казахстаном.

55. Ближается к завершению осуществление Плана конкретных мероприятий, направленного на решение различных вопросов, включая вопросы обеспечения безопасности и физической безопасности на площадке. Летом 2017 года в Казахстане было завершено строительство Склада НОУ МАГАТЭ. В августе 2017 года миссия Агентства подтвердила, что Склад НОУ МАГАТЭ был построен, сдан в эксплуатацию и подготовлен к эксплуатации в соответствии с нормами безопасности и руководящими документами по физической безопасности Агентства и что были приняты адекватные меры для обеспечения защиты работников, населения и окружающей среды на протяжении всего срока эксплуатации склада. Официальное открытие склада состоялось 29 августа 2017 года.

56. Достигнут также прогресс в окончательной доработке программы обращения с цилиндрами, которая обеспечит долгосрочную безопасность и физическую безопасность цилиндров на месте и их последующую транспортировку. При проведении пилотного тестирования в апреле 2017 года было осуществлено моделирование тестов для повторной сертификации цилиндров согласно готовящемуся соответствующему стандарту ИСО, результаты которых будут использованы в окончательно доработанной программе обращения с цилиндрами. В ноябре 2017 года был подготовлен запрос предложений для приобретения НОУ.

57. Другие механизмы гарантированных поставок изложены в «Обзоре ядерных технологий — 2012» (документ GC(56)/INF/3).

А.3.3. Конечная стадия топливного цикла

Обращение с отработавшим топливом

58. На сегодняшний день из АЭС было выгружено около 400 000 тонн тяжелого металла (т ТМ). В настоящее время около 25% выгруженного топлива подвергается переработке, и, как ожидается, объемы переработки возрастут до 30% к 2020 году. В 27 странах насчитывается 151 вне реакторное (ВР) сухое хранилище отработавшего топлива.

59. В 2017 году две страны подписали контракты, предусматривающие поставку новых ВР сухих хранилищ: в Словении на АЭС «Кршко» и в Бразилии для хранения отработавшего топлива на АЭС «Ангра-1» и «Ангра-2». На АЭС «Кршко» осуществляются работы по проектированию с целью обеспечения соответствия повышенным требованиям в отношении сейсмостойкости и сильных наводнений в соответствии с руководящими материалами по безопасности, разработанными с учетом уроков аварии на АЭС «Фукусима».

60. В 2017 году в сухое хранилище на АЭС «Сайзуэлл В» в Соединенном Королевстве были помещены первые загруженные топливные контейнеры, предназначенные для хранения топлива в течение 100 лет.

61. В Венгрии модульно-камерное сухое хранилище на АЭС «Пакш», которое ранее имело емкость 9308 топливных сборок, размещавшихся в 20 камерах, было расширено в 2017 году с добавлением еще четырех камер.

62. Во временном хранилище ХОЯТ-2 на Чернобыльской АЭС на Украине, в состав которого входит установка для резки/упаковки топлива и модули для хранения отработавшего топлива, в настоящее время проводятся приемочные испытания для операций резки топлива РБМК. В 2017 году было получено разрешение регулирующего органа на строительство нового централизованного сухого хранилища топлива энергетических реакторов в Чернобыльской зоне отчуждения, и начало эксплуатации хранилища запланировано на 2019 год.

63. В 2017 году было сообщено о целом ряде инноваций в отрасли. К ним относятся лазерное упрочнение сварных контейнеров для сухого хранения с целью снижения потенциала коррозионного растрескивания под напряжением и разработки компактных модулей для сухого хранения, облегчающих инспекцию контейнеров, находящихся на хранении.

64. Что касается переработки и регенерации отработавшего топлива, то Франция расширила ассортимент видов отработавшего топлива LWR, которые могут перерабатываться на установке на мысе Аг. Российская Федерация также продолжает расширять диапазон видов топлива, перерабатываемого на заводе РТ-1 химического комбината «Маяк» в Озерске. В этой связи в 2017 году завод РТ-1 был модернизирован, и теперь он способен перерабатывать 20 тонн топлива ВВЭР-1000.

65. Управление по выводу из эксплуатации ядерных объектов Соединенного Королевства в марте 2017 года сообщило, что установка термально-оксидной переработки «Thorp» прекратит свою работу приблизительно в ноябре 2018 года. В период с 1994 года на этом заводе было переработано около 9500 т оксидного топлива.

66. В августе 2017 года Центр атомных исследований им. Индиры Ганди в Индии заключил контракт с «Хиндустан констракшн ко.» на строительство комбината топливного цикла реакторов на быстрых нейтронах в Калпаккаме течение следующих 4 лет. В настоящее время ведется строительство полифункционального радиохимического исследовательского комплекса в Научно-исследовательском институте атомных реакторов (НИИАР) в Российской Федерации. Госкорпорация «Росатом» в мае объявила, что этот комплекс будет включен в состав международного центра исследований (МЦИ) для тестирования технологий замыкания топливного цикла быстрых реакторов.

67. В августе 2017 первый груз отработавшего топлива, отправленный с хранилища Северного флота Российской Федерации в губе Андреева, был доставлен поездом для переработки на комбинат «Маяк» (расстояние транспортировки 3000 км). Планируется, что примерно 50 железнодорожных составов будут использованы для транспортировки в общей сложности 22 000 отработавших ядерных топливных элементов подводных лодок до комбината «Маяк», где, по оценкам, в течение 5–10 лет будет осуществлена их переработка.

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

Вывод из эксплуатации ядерных установок

68. В мире было окончательно остановлено либо выводится из эксплуатации 164 ядерных энергетических реактора. Из них 17 реакторов были полностью выведены из эксплуатации, и еще ряд реакторов находятся на конечных стадиях процесса вывода из эксплуатации. Окончательно остановлены или находятся в стадии вывода из эксплуатации свыше 150 установок топливного цикла, и примерно 127 установок выведены из эксплуатации. Более 180 исследовательских

реакторов остановлены или находятся в стадии вывода из эксплуатации; более 300 исследовательских реакторов и критических сборок полностью выведены из эксплуатации.

69. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) осуществляемые главным образом в странах с масштабными ядерно-энергетическими программами, таких как Бельгия, Испания, Республика Корея, Российская Федерация, Соединенное Королевство, США, Франция и Япония, приносят результаты, обеспечивающие непрерывное достижение усовершенствований. В апреле 2017 года Японское агентство по атомной энергии открыло в Томиока, префектура Фукусима, новый научно-исследовательский центр Лабораторий сотрудничества в передовых научных исследованиях в области вывода из эксплуатации (КЛАДС). Международный исследовательский центр сотрудничества в Томиока будет центральным объектом КЛАДС, предназначенным для обеспечения деятельности национальных и международных учреждений по проведению НИОКР. В 2017 году французская компания «АРЕВА» завершила демонтаж испарителя продуктов деления на установке по переработке с использованием лазерной технологии.

70. В 2017 году в Японии были пересмотрены среднесрочная/долгосрочная дорожная карта и технический стратегический план вывода из эксплуатации АЭС «Фукусима-дайти». Загрязненная вода, образовавшаяся в результате просачивания грунтовых вод в реакторные строения и их смешения со стоячей водой жидкостью, использованной для охлаждения обломков топлива, продолжает оставаться серьезной проблемой, которая решается с помощью системы удаления нуклидов. В 2016 году были смонтированы замораживающие трубы для непроницаемых стен со стороны суши с целью блокирования грунтовых вод, и в августе 2017 года было начато замораживание конечной секции стены.

71. В Болгарии, Литве, Словакии и на Украине благодаря поддержке со стороны Европейского банка реконструкции и развития достигнут ощутимый прогресс в осуществлении проектов по выводу АЭС из эксплуатации (рис. А-6).



РИС. А-6. Снос градирен АЭС «Богунце-V1», Словакия, октябрь 2017 года. (Фото: JAVYS)

Восстановительные мероприятия

72. Япония регулярно сообщала о прогрессе, достигнутом в проведении дезактивации за пределами площадки. В конце марта 2017 года были завершены работы по дезактивации всех зон особого района дезактивации в радиусе 20 км от площадки АЭС «Фукусима-дайти», а также в районах, в которых по прогнозам дополнительные годовые эффективные дозы могут в первый год после аварии достичь 20 мЗв. На территории интенсивного контроля загрязнения, где измеренная мощность дозы в воздухе составляла 0,23 мкЗв/ч (эквивалентно более чем 1 мЗв/год дополнительной дозы при определенных условиях), работы по дезактивации были завершены в 89 муниципалитетах и к концу марта 2018 года будут завершены в оставшихся 3 муниципалитетах.

Обращение с изъятыми из употребления закрытыми радиоактивными источниками

73. В нескольких государствах-членах продолжалась работа по поддержке технологий обращения с изъятыми из употребления закрытыми источниками (ИЗРИ). Гана и Малайзия добились прогресса в осуществлении проектов скважинного захоронения, и несколько других стран выразили заинтересованность в реализации скважинного захоронения. Организация и ведение инвентарного учета остается приоритетной задачей в ряде государств-членов.

74. В 2017 году при поддержке доноров было начато осуществление проектов по удалению высокоактивных источников в Албании, Боливии, Ливане, бывшей югославской Республике Македонии, Парагвае, Перу, Тунисе, Уругвае и Эквадоре, и завершение этих проектов прогнозируется в 2018 году. Один высокоактивный ИЗРИ был вывезен из больницы в Либерии и помещен в надежное и безопасное место хранения.

75. В нескольких государствах-членах, в том числе Гане, Гондурасе и Малайзии, были завершены операции по кондиционированию ИЗРИ категорий 3–5. В ходе этих миссий была обеспечена подготовка персонала операторов отходов и регулирующих органов, что позволило расширить их возможности по безопасному обращению с ИЗРИ.

76. Достигнут значительный прогресс в интеграции мобильных горячих камер в системы скважинного захоронения, которая позволит свести к минимуму манипуляции с высокоактивными источниками и исключить ненужные транспортные операции. В сентябре 2017 года в Южной Африке была проведена демонстрация такой интеграции. Кроме того, продолжалась работа по сборке мобильных устройств для облегчения операций по кондиционированию ИЗРИ категорий 3–5. В начале 2018 года планируется провести подготовку для государств-членов по вопросам использования этих устройств.

77. Несколько государств-членов приняли участие в процессе первоначального планирования и оценки создания аттестованных технических центров, которые представляют собой инициативу Агентства по оказанию помощи в обращении с ИЗРИ, осуществление которой было начато в 2017 году.

Обращение с радиоактивными отходами перед захоронением

78. В феврале 2017 года компания «Селлафилд лтд» объявила о том, что был зацементирован первый 500-литровый контейнер с радиоактивным шламом (состоящим из водорослей, продуктов коррозии и приносимых ветром материалов) из бассейна выдержки топлива в Селлафилде на расположенной на данной промышленной площадке установке по герметизации, и герметизированная форма отходов готова к долгосрочному захоронению. Компания «Селлафилд лтд» сообщила, что проект по удалению шлама осуществляется с опережением на десять лет намеченного графика и сокращением на половину ранее предусмотренных расходов в размере 200 млн фунтов ст. (249 млн долл.).

79. На площадке Министерства энергетики США в шт. Айдахо более чем 100 000 часов составила наработка уникального пресса для суперкомпактирования мощностью 1800 тонн для уплотнения 200-литровых бочек с отходами. За прошедшие 14 лет с помощью этого пресса было уплотнено свыше 238 000 цилиндрических контейнеров, содержащих отходы в виде обломков, что позволило сократить примерно на 6000 число перевозок грузовым автотранспортом, которые необходимо было бы выполнить для доставки примерно 43 000 кубических метров отходов на экспериментальный завод по изоляции отходов (WIPP).

80. На АЭС «Бредуэлл» в Соединенном Королевстве компания «Магнокс лтд» и ее дочерние предприятия успешно произвели удаление обломков твэлов в объеме 65 тонн с использованием инновационных методов переработки. После повторной классификации твердые отходы были помещены в хранилище низкоактивных отходов (НАО).

81. В США на заводе по обработке низкоактивных отходов в Ханфорде была успешно смонтирована первая из двух 300-тонных печей остекловывания. Тихоокеанская северо-западная национальная лаборатория разработала математический алгоритм формулирования состава стекла для фиксации высокоактивных отходов (ВАО), предназначенный для применения на этой печи с целью обеспечения оптимальной смеси отходов и присадок для каждой партии остекловываемых ВАО.

82. Исследователи в Центре атомных исследований им. Бхабхи (ЦАИБ) объявили об изготовлении «пеналов» с остеклованным цезием-137, извлеченным из радиоактивных отходов. Такой закрытый источник с периодом полураспада 30 лет может заменить источники на кобальте-60 (имеющие более короткий период полураспада 5,3 года), которые в настоящее время используются для облучения пищевых продуктов, брахитерапии и стерилизации медицинских изделий.

83. Центр по обращению с отходами, предназначенный для обработки 10 000 кубических метров твердых радиоактивных отходов, который находится в губе Сайда на севере России, прошел государственную экологическую экспертизу и будет использоваться для кондиционирования и обращения с радиоактивными отходами такого типа в составе «СевРАО» — российского Северо-Западного Центра по обращению с радиоактивными отходами.

84. Швейцарская федеральная инспекция по ядерной безопасности одобрила строительство временного хранилища для низко- и среднеактивных отходов НСАО) в Институте им. Пауля Шеррера. В запланированном к строительству здании «Stapelplatz Ost» в Вюренлингене будут храниться отходы от применения радиоизотопов в медицине и промышленности до тех пор, пока не появится пункт глубокого геологического захоронения.

85. Исследователи из Главной ядерно-энергетической корпорации и Университета Цинхуа в Китае совместно разработали систему облучения с помощью пучков электронов для очистки промышленных сточных вод. Путем облучения стоков пучками электронов более 70 сложных химических веществ могут быть разложены на более мелкие молекулы, которые затем можно обрабатывать и удалять с помощью обычных биологических процессов.

Захоронение радиоактивных отходов

86. В мире функционируют пункты захоронения радиоактивных отходов всех категорий, за исключением высокоактивных отходов и/или отработавшего топлива, отнесенного к разряду отходов. В число этих объектов входят пункты траншейного захоронения очень низкоактивных отходов (например, в Испании, США, Франции и Швеции) и низкоактивных отходов (НАО) в засушливых районах (например, в США, Южной Африке); приповерхностные инженерные сооружения для НАО (например, в Венгрии, Китае, Индии, Испании, Польше, Словакии, Соединенном Королевстве, Франции, Чешской Республике и Японии); инженерные сооружения для низко- и среднеактивных отходов (НСАО), находящиеся в геологических формациях на различных глубинах (например, в Венгрии, Германии, Корейской Республике, Норвегии, США, Финляндии, Чешской Республике). Пункты захоронения НСАО, например, в Бельгии, Болгарии, Германии, Исламской Республике Иран, Канаде, Литве, Румынии и Словении, находятся на разных стадиях лицензирования или строительства. Варианты захоронения отходов радиоактивных материалов природного происхождения зависят от действующих национальных регулирующих положений.

87. В 2017 году в рамках программы по захоронению отработавшего топлива в Канаде произошел переход к этапу поиска площадки для размещения пункта глубокого геологического захоронения, и в этом процессе отбора площадки продолжают участвовать семь из 22 общин, первоначально проявивших заинтересованность. В отношении заявки на получение лицензии на

строительство пункта геологического захоронения НСАО в Кинкардине министр по вопросам окружающей среды и изменения климата запросила дополнительную информацию, касающуюся заключения экологической экспертизы, представленного компанией «Онтарио пауэр дженерейшн», для дальнейшего рассмотрения Канадским агентством по экологической оценке.

88. В Китае продолжается осуществление программы по геологическому захоронению будущих остеклованных высокоактивных отходов, и изыскания площадки проводятся в кристаллических и осадочных формациях. В настоящее время рассматриваются планы строительства подземной исследовательской установки в кристаллической скальной формации нагорья Бэйшань и проведения дальнейших наземных изысканий для выбора площадки в осадочной формации Внутренней Монголии.

89. В ходе работ по сооружению первого в мире пункта геологического захоронения отработавшего ядерного топлива в Олкилуото, Финляндия, компания «Посива» изучила данные технологических и эксплуатационных исследований, таких как полномасштабные испытания систем на месте и дополнительные строительные и функциональные тесты, для подготовки к проведению работ по холодному и горячему вводу объекта в эксплуатацию с целью получения лицензии на эксплуатацию.

90. Во Франции национальная организация по обращению с радиоактивными отходами «Андра» продолжала осуществлять технологические исследования с демонстрационными устройствами и научными экспериментами на месте для обеспечения того, чтобы заявка на получение лицензии на строительство планируемого пункта глубокого геологического захоронения будет иметь надежное научно-техническое обоснование.

91. В марте 2017 года немецкий парламент внес поправки в Закон о размещении геологического захоронения на основе рекомендаций своей комиссии по хранению и захоронению ВАО, в том числе касающиеся базирования решения по размещению на соответствующих критериях безопасности и предусматривающих вовлечение в процесс всех заинтересованных сторон. Кроме того, в 2017 году, в соответствии с законом об обязательствах, относящихся к конечной стадии ядерного топливного цикла, операторы АЭС перечислили 24,1 млрд евро в Национальный фонд для финансирования захоронения ядерных отходов, и в результате вся ответственность за хранение и захоронение отходов перешла к государству. За операторами сохраняется ответственность за вывод из эксплуатации, обработку и кондиционирование отходов.

92. В июле 2017 года Министерство экономики, торговли и промышленности Японии, в качестве первого шага на пути к решению проблемы окончательного захоронения, опубликовало общенациональную карту научных характеристик, которые имеют отношение к геологическому захоронению.

93. Предприятие «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» («НО РАО») Российской Федерации ввели в эксплуатацию пункт приповерхностного захоронения НАО в Новоуральске (Свердловская область). Это первый из нескольких подобных объектов, планируемых для размещения в них радиоактивных отходов, оставшихся от прежней деятельности в стране.

94. В октябре в Шведском суде по делам земельных ресурсов и окружающей среды было завершено рассмотрение экологического лицензирования в рамках заявки на выдачу лицензии на строительство пункта геологического захоронения отработавшего топлива, и заключение будет представлено правительству Швеции. Муниципалитет Оскарсхамна, Шведское управление по радиационной безопасности и другие органы власти подтвердили, что они выступают за выдачу разрешения согласно Экологическому кодексу, однако муниципалитет Эстхаммара даст окончательный ответ лишь после проведения референдума.

95. В Швейцарии национальная организация по обращению с радиоактивными отходами «Награ» подала заявки на проведение дополнительных исследований геологических и гидрогеологических характеристик подземных скальных формаций в регионе Nördlich Lägern, выбранного для размещения геологического хранилища.

96. В США работы по послеаварийному восстановлению на объекте WIPP для геологического захоронения трансураниевых НСАО были выполнены в достаточном объеме, чтобы позволить возобновление операций в апреле 2017 года, но со сниженными темпами размещения отходов по сравнению с режимом работы до аварии 2014 года.

В. Усовершенствованные ядерные и термоядерные системы

В.1. Усовершенствованные ядерные системы

97. Ядерная энергетика является зрелой, проверенной технологией, которая позволяет повысить энергетическую безопасность, уменьшает влияние, обусловленное неустойчивостью цен на органическое топливо, делает экономику более конкурентоспособной и приводит к значительному снижению выбросов парниковых газов и других загрязнителей по сравнению с системами, в которых используется ископаемое топливо. Как и в других промышленных секторах, НИОКР и непрерывный процесс разработки инновационных технологий³ необходимы для поддержания конкурентоспособности ядерной энергетики и ее привлекательности даже в условиях изменения бизнес-среды, включая появление стран, приступающих к развитию ядерной энергетики.

В.1.1. Водоохлаждаемые реакторы

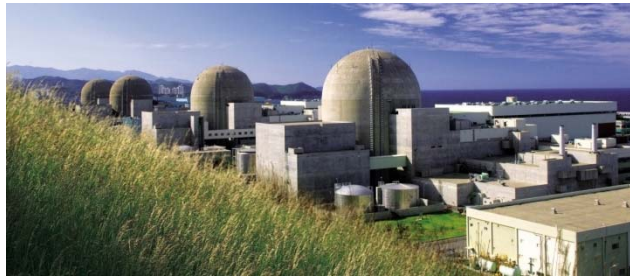
98. Водоохлаждаемые реакторы (WCR) играют ключевую роль в атомной промышленности, и опыт их промышленной эксплуатации насчитывает свыше 17 000 реактор-лет. Более 95% всех эксплуатируемых гражданских ядерных реакторов в мире и 56 из 58 строящихся реакторов охлаждаются легкой или тяжелой водой. В 2017 году к энергосетям были подключены три новых реактора WCR: в Китае и Пакистане и было начато строительство двух энергоблоков: в Индии и Республике Корея (рис. В-1). Большинство стран, приступающих к развитию ядерной энергетики, выбирают усовершенствованные реакторы WCR в качестве своих первых реакторов, как это имеет место в Беларуси и Объединенных Арабских Эмиратах. На шестой организованной Агентством Международной конференции по тематическим вопросам безопасности ядерных установок, состоявшейся в июне 2017 года, особое внимание было уделено демонстрации безопасности АЭС с усовершенствованными водоохлаждаемыми реакторами, включая реакторы малой и средней мощности или модульные реакторы.

99. В наиболее усовершенствованных конструкциях WCR была повышена выходная мощность. Реакторы новейшей конструкции обеспечивают выходную мощность энергоблока 1000–1700 МВт, и в эволюционных конструкциях планируется обеспечить дальнейшее увеличение мощности. Наблюдается отчетливая тенденция к размещению на одной площадке нескольких энергоблоков с одинаковыми или разными типами реакторов, что позволяет добиваться экономии за счет масштаба. В нескольких странах осуществляется деятельность по рассмотрению, изучению и строительству усовершенствованных модификаций существующих

³ См. дополнительную информацию в Информационной системе по усовершенствованным реакторам Агентства (АРИС): <https://aris.iaea.org>

WCR в целях постепенного внедрения более эффективных, частично или полностью замкнутых топливных циклов. Индия успешно продвигается в реализации своей трехэтапной стратегии развития ядерной энергетики на основе тория с тяжеловодными реакторами (HWR), быстрыми реакторами и усовершенствованными HWR с $\text{Th}/^{233}\text{U}$ -топливным циклом. Китай полностью загрузил топливом один действующий реактор CANDU эквивалентном природного урана — смесью отработавшего топлива легководного реактора (LWR) и хвостов обедненного урана.

100. Несколько государств-членов ведут НИОКР в области сверхкритических водоохлаждаемых реакторов (SCWR). Завершено концептуальное проектирование канадского SCWR (канального реактора, охлаждаемого тяжелой водой), а также китайского SCWR (CSR1000). В Европе была разработана концепция европейского высокоэффективного LWR, и в сотрудничестве с Китаем был разработан план, сконструирован и проанализирован образец внутриреакторного устройства для аттестации топлива. В Российской Федерации продолжают концептуальные исследования по инновационному водо-водяному энергетическому реактору (ВВЭР) со сверхкритическими параметрами водного теплоносителя, включая возможность использования активной зоны с быстрым спектром.



*Рис. В-1. На АЭС «Хануль» (прежнее название «Ульчхин»), Республика Корея, имеется шесть действующих энергоблоков, еще два энергоблока находятся в стадии строительства.
(Фото: КГЯЭ)*

В.1.2. Системы на быстрых нейтронах

101. Начиная с 1960 года в мире осуществляются масштабные программы по быстрым реакторам. На третьей Международной конференции по быстрым реакторам и соответствующим топливным циклам «Ядерные системы следующего поколения на благо устойчивого развития», состоявшейся в июне 2017 года в Екатеринбурге, Российская Федерация, был сделан вывод, что замкнутый ядерный топливный цикл на основе быстрых реакторов может обеспечить эффективный, безопасный, устойчивый, чистый источник энергии для многих поколений, особенно в плане сохранения ресурсов и обращения с высокоактивными и долгоживущими ядерными отходами. В настоящее время в стадии разработки на национальном и международном уровнях находится несколько инновационных быстрых реакторов с натриевым теплоносителем (SFR), быстрых реакторов со свинцовым и свинцово-висмутовым (эвтектический сплав) теплоносителем (LFR) и газоохлаждаемых быстрых реакторов (GFR). В качестве варианта на отдаленную перспективу разрабатывается быстрый реактор на солевых расплавах (MSR).

102. В области реакторов SFR, которые представляют собой наиболее зрелую технологию реакторов на быстрых нейтронах, имеется опыт эксплуатации более 420 реакторо-лет, накопленный в процессе проектирования, сооружения и эксплуатации экспериментальных, прототипных, демонстрационных и промышленных установок в нескольких странах, в том числе в Германии, Индии, Китае, Российской Федерации, Соединенном Королевстве, США, Франции и Японии.

103. В октябре 2016 года был введен в коммерческую эксплуатацию российский реактор на быстрых нейтронах БН-800 (рис. В-2). Строится многоцелевой исследовательский реактор на быстрых нейтронах (SFR) МБИР, который заменит экспериментальный реактор БОР-60 в 2020 году; в 2017 году был изготовлен корпус реактора. В области технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей следует отметить, что процедуру лицензирования проходит реактор БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем.



Рис. В-2. Реактор БН-800 с натриевым теплоносителем был сдан в промышленную эксплуатацию 31 октября 2016 года. (Фото: «Росэнергоатом»)

104. В Индии завершено строительство прототипного быстрого реактора-размножителя, и первый выход на критичность запланирован на 2018 год. На этой же площадке планируется сооружение еще двух реакторов-размножителей на быстрых нейтронах.

105. В 2017 году китайский исследовательский реактор со свинцовым теплоносителем CLEAR-1, который находится в стадии инженерной разработки, был выбран в качестве базового реактора для разработки электроядерных систем (ЭЛЯС) и быстрых реакторов. Инновационный реактор CFR-600 находится на стадии инженерного проектирования, начало эксплуатации планируется в 2025 году.

106. В декабре 2016 года правительство Японии приняло решение снять с эксплуатации прототип реактора SFR «Мондзю», который был в состоянии долгосрочного останова. Будет продолжена разработка инновационного быстрого реактора с натриевым теплоносителем JSFR, поскольку технология реакторов на быстрых нейтронах считается жизненно важной для будущей структуры энергопроизводства Японии.

107. В Европе правительство Франции одобрило осуществление до конца 2019 года этапа базового проектирования промышленного прототипного реактора SFR «Астрид». В Бельгии рассматривается вопрос о строительстве реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем «MYRRHA», который может работать в подкритическом и критическом режимах в качестве ЭЛЯС; целью является создание к концу 2024 года первой в стране установки для НИОКР. Шведский усовершенствованный реактор со свинцовым теплоносителем («SEALER») проходит процедуры, предшествующие лицензированию в Комиссии по ядерной безопасности Канады. Цель — до конца 2021 года начать строительство этого «батареинового» реактора мощностью 3–10 МВт (эл.), предназначенного для коммерческой выработки электроэнергии в арктических районах и в местах осуществления добычных работ, и в 2025 году сдать в эксплуатацию демонстрационный энергоблок. Другими разрабатываемыми концепциями являются: «ALFRED» (европейский демонстрационный реактор LFR поколения IV), «ALLEGRO» (экспериментальный реактор GFR).

108. В США компания «Терра пауэр» завершила концептуальное проектирование активной зоны реактора на бегущей волне, работающего в режиме «воспроизводство-сжигание», и проводит разработку ЖСР. Компания «Вестингауз электрик» разрабатывает инновационный малый модульный реактор мощностью 450 МВт(эл.) со свинцовым теплоносителем.

В.1.3. Газоохлаждаемые реакторы

109. В Соединенном Королевстве продолжается коммерческая эксплуатация 14 усовершенствованных газоохлаждаемых реакторов, и проводятся исследования по продлению срока их эксплуатации. Многие государства-члены разрабатывают модульные реакторы HTGR малой мощности с внутренне присущими характеристиками безопасности, которые делают ненужными большинство активных инженерно-технических систем безопасности. Реакторы HTGR, в которых используются микротвэлы, в качестве теплоносителя применяется гелий и которые работают при высоких температурах ($\geq 700^{\circ}\text{C}$), позволят повысить эффективность энергопроизводства и удовлетворить спрос на рынке технологического тепла.

110. В Китае завершено сооружение высокотемпературного модульного реактора с шаровыми твэлами (HTR-PM). Ожидается, что промышленная демонстрационная энергетическая установка мощностью 200 МВт (эл.), состоящая из двух реакторных блоков мощностью 250 МВт (тепл.), будет сдана в эксплуатацию в 2018 году. Был произведен монтаж корпусов реакторов, и в один из энергоблоков были загружены внутризонные устройства и графитовые сферы (в качестве составной части начальной активной зоны). В настоящее время проектируется коммерческая АЭС мощностью 600 МВт (эл.), и проводятся технико-экономические исследования пяти возможных площадок для ее размещения. В 2016 году было начато производство топлива в промышленных масштабах на заводе по изготовлению шаровых твэлов в Баотоу.

111. Саудовская Аравия включила в свой национальный проект использования атомной энергии будущее внедрение реакторов HTGR. С Китаем был подписан меморандум о взаимопонимании в отношении развития долгосрочного стратегического партнерства в целях локализации и обеспечения перехода в собственность технологии. В 2017 году было завершено совместное технико-экономическое обоснование применения технологического тепла в нефтехимической промышленности.

112. В сентябре 2017 года министр энергетики Польши одобрил доклад консультативного комитета, предусматривающий внедрение реакторов HTGR, которые также обеспечат замещение свыше 6500 МВт технологического тепла, вырабатываемого в настоящее время с использованием углеводородных источников. План включает размещение в стране европейского высокотемпературного экспериментального реактора мощностью ~ 10 МВт (тепл.) в целях содействия освоению новой технологии и развития людских ресурсов.

113. Национальное агентство по ядерной энергии Индонезии после получения первоначальной лицензии на площадку под строительство экспериментального энергетического реактора с шаровыми твэлами мощностью 10 МВт (тепл.) проводит работу по мобилизации финансовых средств для строительства.

114. В Японии ожидаются результаты рассмотрения регулирующим органом вопроса о возможности повторного запуска высокотемпературного реактора для технических испытаний (HTTR) мощностью 30 МВт (тепл.), чтобы затем можно было начать осуществление дальнейших испытаний с целью демонстрации безопасности и возможностей технологии.

115. В США проводятся работы, направленные на аттестацию топлива на основе микросфер с трехструктурным изотропным покрытием для будущего внедрения такого топлива. Достигнут прогресс в разработке новых основ лицензирования усовершенствованных реакторов, в частности HTGR.

116. Работа по реакторам HTGR продолжается в Европейской комиссии в рамках программы GEMINI+, в Южной Африке в ходе выполнения НИОКР по новой концепции усовершенствованного высокотемпературного реактора (HTR) с шаровыми твэлами и в

Республике Корея и Российской Федерации по развитию и поддержанию ключевых технологий. В рамках трех проектов координированных исследований Агентства проводится анализ неопределенностей, разрабатываются проектные критерии безопасности и исследуются вопросы применения тепла реакторов HTGR для обеспечения более устойчивой, чистой добычи полезных ископаемых.

В.1.4. Реакторы малой и средней мощности или модульные реакторы

117. Многие государства-члены проявляют растущий интерес к реакторам малой и средней мощности или модульным реакторам (МСР/ММР). Компоненты и системы этих реакторов нового поколения мощностью до 300 МВт (эл.) могут быть изготовлены на заводе и смонтированы на площадках в качестве модулей. МСР/ММР, предназначенные для заполнения ниш электрических или энергетических рынков, в которых реакторы большой мощности не являются целесообразными, могут удовлетворять потребности в гибкой генерации электроэнергии для широкого круга пользователей и сфер применения, включая замену стареющих электростанций, работающих на ископаемом топливе, обеспечение энергоснабжения в странах с энергосетями малой мощности, в удаленных и не охваченных энергосетями районах и внедрение гибридных ядерных и основанных на возобновляемых источниках энергии систем. Также они лучше подходят для частичного или полного использования в неэлектрических применениях, таких как выработка тепла для промышленных процессов, производство водорода и опреснение морской воды. Предполагается, что МСР/ММР будут иметь более высокие характеристики безопасности, а также будут более доступными, однако эти характеристики пока еще не полностью продемонстрированы.

118. В настоящее время в стадии разработки находятся более 50 конструкций МСР/ММР, представляющих все основные типы реакторов, при этом три реактора вышли на продвинутой этап сооружения: реактор «CAREM-25» мощностью 27 МВт(эл.) в Аргентине (прототип интегрального PWR «CAREM» мощностью 150–300 МВт (эл.) (рис. В-3), запланированный к пуску и сдачу в эксплуатацию в 2019 году; реактор HTR-PM в Китае, который планируется ввести в эксплуатацию в 2018 году; размещаемая на барже плавучая АЭС (ПАЭС) в Российской Федерации с двумя модулями КЛТ 40С (водо-водяными ядерными реакторами) мощностью 35 МВт (эл.), запланированная к пуску и сдаче в эксплуатацию в 2018 году.



РИС. В-3. Строительство реактора «CAREM-25» (слева); окончательный макет установки (справа). Фото: НКАЭ, Аргентина.

119. Комиссия по ядерной безопасности Канады получила десять заявок на проведение предшествующего лицензированию рассмотрения проектов поставщиков, и Канадские ядерные лаборатории выразили заинтересованность стать демонстрационным центром для ММР. В докладе о долгосрочной стратегии, опубликованном в 2017 году, сообщается о намечаемом на 2026 год выборе площадки для размещения нового ММР в Чок-Ривер.

120. В Китае на площадке АЭС «Чанцзян» в провинции Хайнань в 2018 году планируется начать строительство первой демонстрационной энергетической установки с двумя модулями АСР100 Национальной ядерной корпорации Китая. Главная ядерно-энергетическая группа Китая

приступила к производству систем и компонентов для плавучего реактора ACPR50S; в 2022 году ожидается подключение к энергосети. Шанхайский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт ядерной техники завершил концептуальное проектирование своих реакторов CAP150 и CAP200.

121. Во Франции возглавляемый ЭДФ консорциум, в который входят Комиссариат по атомной энергии и альтернативным источникам энергии (КАЭ), «Наваль групп» и «Текникатом», разрабатывает интегральный наземный ММП типа PWR мощностью 170 МВт (эл.). «Наваль групп» продолжала также разработку «Flexblue» — передвижного подводного реактора типа PWR мощностью 160 МВт (эл.).

122. В Саудовской Аравии Город короля Абдуллы для освоения атомной энергии и возобновляемых источников энергии (KACARE) приобрел права совместной собственности на проект реактора «SMART» мощностью 100 МВт (эл.) Корейского научно-исследовательского института атомной энергии (КАЭРИ), что было результатом подписания в 2015 году соглашения о сооружении в Саудовской Аравии двух энергоблоков. Иорданская комиссия по атомной энергии в партнерстве с KACARE и КАЭРИ проводит технико-экономическое обоснование строительства двух энергоблоков «SMART» для производства электроэнергии и опреснения воды.

123. Российская Федерация разработала реактор РИТМ-200 мощностью 50 МВт (эл.), который представляет собой интегральный реактор для атомных ледоколов; его сдача в эксплуатацию ожидается в 2020 году. Для исследования характеристик инновационных быстрых реакторов разработан реактор СВБР-100; это — многоцелевой быстрый реактор мощностью 100 МВт (эл.), охлаждаемый свинцово-висмутовым эвтектическим составом. Технология уже была использована в проектах нескольких российских атомных подводных лодок. Проектная организация работает над созданием пилотной установки, серийное производство которой ожидается начать к 2030 году.

124. Правительство Соединенного Королевства в марте 2016 года объявило конкурс на проведение дальнейших исследований с целью определения потенциала ММП посредством, например, технико-экономических оценок, и обеспечения возможности для отрасли взаимодействовать с правительством в создании движущих факторов и стимулов, необходимых для освоения данной технологии. В Соединенном Королевстве компания «Роллс-Ройс» разрабатывает ММП, представляющий собой PWR петлевого типа мощностью 450 МВт (эл.) со стандартизированными транспортабельными модулями.

125. В марте 2017 года КЯР США зарегистрировала и приняла к рассмотрению заявку на сертификацию конструкции реактора «NuScale», представляющего собой 12-модульный интегральный PWR с единичной мощностью модуля 50 МВт (эл.). Компания «НьюСкейл Пауэр» планирует начать коммерческую эксплуатацию своей первой станции в Айдахо к 2026 году, и работает над планом внедрения данной технологии в краткосрочной перспективе в Соединенном Королевстве. В рамках программы по поддержке инновационных разработок в атомной отрасли (GAIN) Министерства энергетики США оказывается поддержка в освоении реактора SMR-160 — другого PWR интегрального типа, разработанного компанией «Холтек интернэшнл».

126. К числу новых реакторов, появляющихся на рынке, относится усовершенствованный реактор с жидкосолевым топливом (и охлаждающим теплоносителем), так называемый жидкосолевой реактор (ЖСР). Потенциальными преимуществами применения ЖСР являются высокие рабочие температуры, позволяющие повысить эффективность, а также низкое давление теплоносителя, сокращение объема и времени жизни отходов высокого уровня активности,

высокие характеристики безопасности, устранение проблем, связанных с эффектами глубокого выгорания твердого топлива и гибкие топливные циклы (уран, плутоний, торий). Одним из многих концептуальных проектов является проект интегрального ЖСР IMSR400 мощностью около 190 МВт (эл.), который разрабатывается в Канаде компанией «Террестриал энерджи».

127. Для скорейшего внедрения РМСМ/ММР необходимо решить ряд определенных проблем. Должна быть разработана надежная регулирующая (нормативно-правовая) база для проведения рассмотрений институциональных вопросов регулирующим органом. К проблемам технического характера относятся укомплектование персоналом помещения щита управления и учет человеческих факторов применительно к многомодульным станциям с РМСМ/ММР, определение размеров зоны аварийного планирования, разработка новых сводов положений и норм и формирование систем устойчивых поставок. Кроме того, несмотря на то, что для РМСМ/ММР требуются меньшие первоначальные капиталовложения в расчете на энергоблок, стоимость произведенной на этих реакторах электроэнергии, вероятно, будет выше, чем в случае реакторов большой мощности. Их экономическая конкурентоспособность должна оцениваться с учетом альтернатив и обеспечиваться за счет эффекта масштаба. Ожидается, что эксплуатация первой серии коммерческих РМСМ/ММР начнется в период с 2025 по 2030 год с дальнейшим расширением парка этих реакторов. Международное сотрудничество и партнерские отношения являются ключом к прогрессу в разработке и внедрении РМСМ/ММР.

В.1.5. Международные инициативы в области инновационных ядерно-энергетических систем

128. В течение последних нескольких десятилетий был предпринят ряд международных инициатив, касающихся инновационных ядерно-энергетических систем, в целях содействия решению имеющихся проблем, включая растущий спрос на энергию, доступность урановых топливных ресурсов, переработку отработавшего ядерного топлива для снижения будущих издержек, связанных с геологическими хранилищами, увеличение теплового КПД, повышение безопасности проектными решениями и устойчивость к распространению.

129. Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО), учрежденный Агентством в 2000 году, объединяет усилия разработчиков, поставщиков и пользователей технологий, направленные на выработку международных и национальных мер, необходимых для внедрения желаемых инноваций в области ядерных реакторов и топливных циклов в целях обеспечения долгосрочной устойчивости ядерной энергетики. В настоящее время в ИНПРО входят 42 члена: 41 государство — член МАГАТЭ и Европейская комиссия.

130. В 2016 году был опубликован обновленный вариант руководства ИНПРО по оценке устойчивости экологических стрессоров. В Румынии и на Украине выполняются оценки ядерно-энергетических систем (ОЯЭС) по методологии ИНПРО, и Китай, Индия и Российская Федерация проводят ограниченные по охвату оценки своих новейших проектов реакторов SFR. В 2017 году Руководящий комитет ИНПРО одобрил разработку новой услуги для государств-членов с применением инструментов моделирования сценариев развития ядерно-энергетических систем, анализа и составления «дорожных карт» развития, разработанных в рамках ИНПРО в течение последних нескольких лет. Эти новые услуги будут дополнять существующие услуги по ОЯЭС.

131. В 2017 году Австралия присоединилась к Международному форуму «Поколение IV» (МФП) — международной инициативе в области сотрудничества, предпринятой с целью определения технико-экономического и функционального потенциала ядерных реакторов следующего поколения. В совместных НИОКР по одному или нескольким из

шести ядерно-энергетических систем: GFR, сверхвысокотемпературный реактор (VHTR), SCWR, SFR, LFR и ЖСП принимают участие 14 членов МФП. Проводятся ежегодные совещания по вопросам взаимодействия МФП-МАГАТЭ, на которых рассматриваются методы оценки в области экономики и устойчивости с точки зрения распространения, позволяющие осуществлять обмен информацией о текущих проектах.

132. В 2016 году МФП опубликовал доклад, озаглавленный «Safety Design Guidelines on Safety Approach and Design Conditions for Generation IV Sodium-cooled Fast Reactor Systems» («Руководящие принципы обеспечения безопасности при проектировании, касающиеся подхода к обеспечению безопасности и проектных условий для систем быстрых реакторов с натриевым теплоносителем поколения IV»), с целью обеспечения руководства для разработчиков и поставщиков по вопросам реактивности активной зоны быстрых реакторов и потери отвода тепла. Этому предшествовала деятельность МФП, начатая в 2011 году в сотрудничестве с Агентством, по разработке проектных критериев безопасности для SFR, которые были опубликованы в 2013 году.

133. Учрежденная Европейским союзом устойчивая платформа ядерно-энергетических технологий (УПЯЭТ) объединяет усилия более 100 европейских участников, представляющих секторы промышленности, исследований, научные круги, учреждения, занимающиеся обеспечением безопасности, правительственные и неправительственные организации, с целью содействия исследованиям, разработке и демонстрации усовершенствованных технологий ядерного деления, необходимых для выполнения Европейского стратегического плана по энергетическим технологиям. Европейская промышленная инициатива по созданию ядерной энергетики с устойчивой ресурсной базой, учрежденная ЕС в 2010 году в рамках УПЯЭТ, направлена на удовлетворение потребности в демонстрации технологий поколения IV реакторов на быстрых нейтронах. УПЯЭТ в своей стратегической повестке инноваций и исследований установила приоритеты для различных систем следующего поколения и предложила разработку следующих проектов: реактор SFR «ASTRID» в качестве базового решения со строительством прототипа во Франции приблизительно в 2020 году; реактор LFR «ALFRED» в качестве первой альтернативы с сооружением экспериментального реактора для демонстрации технологии в другой европейской стране, выразившей готовность принять данную программу, при поддержке со стороны бельгийского проекта «MYRRHA»; реактор GFR «ALLEGRO» в качестве второй альтернативы, в рамках которой также необходимо построить в европейской стране установку для демонстрации технологии.

134. Среди недавних международных инициатив по разработке дорожных карт для продвижения к безуглеродной энергетике будущего следует отметить инициативу «Ядерные инновации — 2050» (NI2050) Агентства по ядерной энергии (АЯЭ). Инициатива NI2050, в которой участвует ряд стран ОЭСР, а также представители УПЯЭТ, МФП, ВЯА и Агентство, призвана помочь в определении глобальных приоритетов в НИОКР по технологиям ядерного деления, содействию реализации этих задач и выявлению возможностей для расширения сотрудничества.

В.1.6. Неэлектрические применения ядерной энергетики

135. Использование ядерной энергии для неэлектрических применений, также известное как комбинированное производство или ядерная когенерация, вызывает все больший интерес. Комбинированное производство может использоваться для опреснения морской воды, производства водорода, централизованного теплоснабжения, добычи нефти третичными методами и других промышленных применений, а также может помочь обеспечению энергетической безопасности, устойчивого развития и борьбы с изменением климата. Оно может обеспечить повышение общего теплового КПД АЭС более чем на 30% благодаря вторичному

использованию сбросного тепла, а также снижение воздействия на окружающую среду сектора теплоснабжения и транспорта почти на 35% в случае, если данная технология поступит на эти рынки.

136. Недавние исследования показывают, что комбинированное производство с использованием сбросного тепла способно компенсировать значительную часть затрат на выработку электроэнергии на АЭС. Например сбросное тепло НТGR может быть использовано для опреснения морской воды, обеспечивая значительный выигрыш в стоимости воды по сравнению с опреснением с помощью газовых или мазутных электростанций.

137. Благодаря современным достижениям в развитии технологии опреснения морской воды, таким как низкотемпературные технологические системы, системы утилизации сбросного тепла, эффективные энергетические и технологические системы и инновационные процессы оптимизации, ядерное опреснение с помощью АЭС будет жизнеспособным вариантом в будущем. Интегрированная гибридная технология теплового и мембранного опреснения рассматривается в качестве оптимальной с точки зрения использования тепла от конденсаторов АЭС или низкокачественного технологического пара, отбираемого на поздних стадиях низкого давления турбин и подаваемого в систему опреснения с многоступенчатой пленочной дистилляцией. Это может обеспечить снижение потребления энергии, объемов забора морской воды и затрат на системы выпуска морской воды. Несколько государств-членов, в том числе Египет, Иордания, Китай, Пакистан и Саудовская Аравия, выразили или подтвердили свою заинтересованность в ядерном опреснении. В нескольких разрабатываемых конструкциях реакторов, таких как «SMART» в Республике Корея, для опреснения морской воды будет использоваться сбросное тепло.

138. Благодаря прогрессу, достигнутому в разработке конструкций НТR и производстве водорода с использованием ядерной энергии, особенно в высокотемпературном электролизе пара, производство водорода с помощью АЭС может играть все более важную роль в будущей водородной экономике и способно помочь в борьбе с изменением климата. Современные низкотемпературные ядерные реакторы могут также производить водород посредством усовершенствованной технологии низкотемпературного электролиза воды. Экономические показатели этого процесса можно улучшить за счет использования электроэнергии, вырабатываемой во внепиковый период.

139. АЭС могут обеспечивать получение адекватного, затратоэффективного технологического тепла или пара, будь то для централизованного теплоснабжения или других целей, при современных технических возможностях транспортировки больших объемов тепла (~ ГВт) на большие расстояния (~ 100 км). Стоимость тепла, доставляемого потребителям, может быть конкурентоспособной в случае, если количество тепла, получаемого от АЭС, превышает пороговое значение.

В.2. Термоядерный синтез

140. В реализации проекта ИТЭР достигнуты значительные успехи с заметными результатами в осуществлении строительных и монтажных работ (рис. В-4). Продолжается доставка на площадку основных узлов и изготовление других компонентов. Главные коллективные усилия направлены на завершение проектирования, техническую комплектацию и обеспечение ядерной безопасности. Параллельно этому стороны, участвующие в ИТЭР, осуществляют широкую программу НИОКР, которая направлена на оказание поддержки в доработке обращенных к плазме компонентов, систем нагрева и возбуждения тока, систем диагностики и управления. ИТЭР и семь национальных учреждений после нескольких корректировок графика пришли к выводу, что первая плазма будет получена к концу 2025 года.

141. Еще одной вехой в освоении термоядерного синтеза стало получение первой плазмы на оптимизированном стеллараторе «Вендельштайн 7-Х» (W7-X) в Институте физики плазмы им. Макса Планка, Германия (рис. В-4). Основное назначение этой машины заключается в демонстрации работы в режиме устойчивого состояния плазмы с параметрами, релевантными к термоядерному синтезу, тем самым подтверждая, что стелларатор является жизнеспособной концепцией термоядерной энергетической установки. После завершения основного этапа сооружения стелларатора W7-X и успешного пуска устройства работа в режиме поддержания плазмы осуществлялась три дня каждую неделю с декабря 2015 года по март 2016 года, что в общей сложности составило 10 недель работы в плазменном режиме. Катушки магнитного поля и поддерживающие их конструкции внутри криостата находились в условиях криогенной температуры (100 К) на протяжении всей кампании (в магнитном поле рабочая температура катушек W7-X равна 4 К), при этом магнитное поле повышалось и понижалось каждый день в режиме работы с удержанием плазмы.



РИС. В-4. Слева: площадка ИТЭР в октябре 2017 года. (Фото: ITER IO) Справа: внешний вид стелларатора «Вендельштайн 7-Х». (Фото: Институт физики плазмы им. Макса Планка)

142. Продолжалось осуществление нескольких программ НИОКР по инженерно-техническим вопросам, интеграции, проектированию энергетических установок, материалам и безопасности в области термоядерного синтеза. Значительные НИОКР по источнику нейтронов для термоядерного синтеза осуществляются в Европе, Китае и Японии. Цель инженерной валидации (аттестации) и проведения работ по инженерно-техническому проектированию для Международной установки по облучению материалов для термоядерного синтеза (ИФМИФ), выполняемых совместно Европой и Японией, сводится к подготовке детального, полномасштабного, полностью интегрированного инженерного проекта и валидации непрерывной, стабильной эксплуатации прототипов каждой подсистемы ИФМИФ. Была проведена валидация рабочих характеристик литиевой мишени, полуволновых резонаторов с низким бета и других подсистем. Завершение валидации прототипа линейного ускорителя ИФМИФ планируется на 2019 год.

143. Ожидается, что китайский компактный источник нейтронов для управляемого термоядерного синтеза, еще находящийся в стадии сооружения, достигнет к концу 2018 года плотности потока быстрых нейтронов до $10^{14} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$.

144. Агентство разрабатывает нормы и руководящие принципы для методов испытаний малых образцов, которые будут использоваться при подборе и аттестации материалов для нейтронных источников, предназначенных для управляемого термоядерного синтеза.

С. Применения ускорителей и исследовательских реакторов

С.1. Ускорители

145. К наиболее распространенным областям применения ускорителей пучков ионов относятся экологические исследования, биомедицинские применения, определение характеристик и происхождения объектов культурного наследия, материаловедение и углеродное датирование⁴.

Цельноклеточная ядерная микроскопия сверхвысокого разрешения

146. Ускорители пучков ионов с энергиями ионов порядка нескольких мегаэлектронвольт в сочетании со сложной системой фокусировки способны обеспечивать диаметр пучков в несколько десятков нанометров. Это открывает возможность цельноклеточной визуализации биологических клеток с разрешениями, заведомо превышающими предел, определяемый оптической дифракцией.

147. Недавние новые разработки в области фокусирующих систем и приборов для детектирования света привели к дальнейшим успехам в сфере биовизуализации с использованием ядерных микронзондов. На рис. С-1 представлены результаты комбинированной флуоресцентной и структурной визуализации цельноклеточной культуры HeLa, выращенной в среде, содержащей флуоресцентные наноалмазы. Размер пятна, используемый при визуализации, составлял 30 нм, и он является одним из наименьших размеров пучка, когда-либо достигнутых при использовании ионов с энергией 1,6 МэВ. Эти новые события способствуют пониманию воздействия радиации на отдельно взятые живые клетки и разработке новых методов лечения и лекарственных средств.

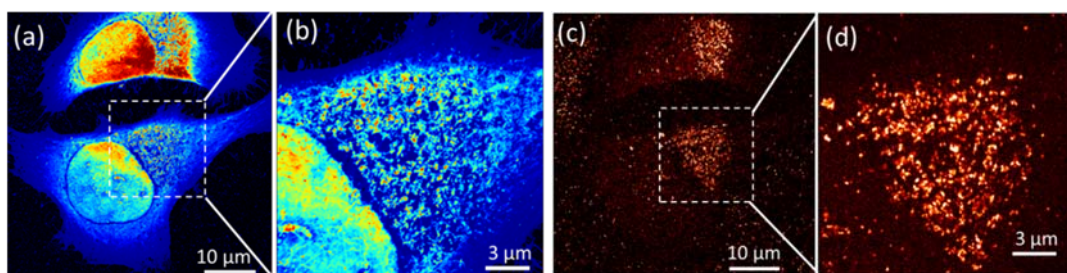


РИС. С-1. Поглощение наноалмазов клетками HeLa. (a) и (b) Полученные методом растровой просвечивающей ионной микроскопии изображения, показывающие различия в плотности. Ясно видно клеточное ядро. (c) и (d) Полученные методом индуцированной ионным пучком флуоресценции изображения, показывающие расположение наноалмазов. (Фото: А/П Эндрю Беттиоль, Центр по применению ионных пучков, Национальный университет Сингапура)

Определение возраста с помощью ионных пучков

148. Использование ионно-пучковых методов также оказалось чрезвычайно полезным при расследовании преступлений, изучении вопросов продовольственной безопасности и здравоохранения, артефактов культурного наследия и проб окружающей среды. Определение абсолютного возраста методом радиоуглеродного датирования позволяет выявлять подделки, и в настоящее время оно является признанным инструментом диагностики объектов культурного наследия (рис. С-2). Радиоуглеродное датирование основано на измерении остаточных концентраций ¹⁴C в образце методом ускорительной масс-спектрометрии. В 2017 году Агентство приступило к осуществлению проекта координированных исследований с целью улучшения информированности и устранения разрыва между специалистами-практиками в области ядерных аналитических методов и сообществами ученых-криминалистов.

⁴Дополнительную информацию по этой теме можно получить на портале знаний МАГАТЭ об ускорителях: <https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators>



РИС. С-2. Отбор проб знаменитой бронзовой скульптуры Капитолийской волчицы в Центре датирования и диагностики Университета Саленто, Лечче, Италия (слева). Считалось, что эта бронзовая статуя была создана этрусками примерно в 500 году до н.э. Были взяты образцы оригинальных сердечников отливной формы, с помощью оптической микроскопии были отобраны органические остатки, и радиоуглеродное датирование, выполненное с использованием ускорителя (справа), дало окончательный ответ: статуя была создана в период 1100–1200 годов нашей эры и поэтому она примерно на 16 веков моложе, чем предполагалось ранее. (Авторы: Г. Куарта, Л. Кальканьиле, Университет Саленто).

Установка СЕЗАМЕ генерирует синхротронное излучение для пользователей

149. Установка в Международном центре по использованию синхротронного излучения в научных экспериментах и прикладных исследованиях на Ближнем Востоке (СЕЗАМЕ) в январе 2017 года начала генерировать синхротронное излучение и была официально введена в эксплуатацию в мае (рис. С-3). В новом научно-исследовательском центре в Иордании действует относящийся к третьему поколению генератор синхротронного излучения с энергией 2,5 ГэВ, являющийся первым устройством такого рода на Ближнем Востоке, способным генерировать интенсивное излучение в диапазоне волн от инфракрасного до жесткого рентгеновского излучения, используемого в различных научных применениях, включая биологию, разработку новых материалов, изучение культурного наследия и физику конденсированных сред. Помимо ЮНЕСКО, являющейся международной организацией, обеспечивающей основную поддержку проекту СЕЗАМЕ, этому проекту оказывают поддержку многие государства — члены МАГАТЭ, Европейский союз и ЦЕРН.



РИС. С-3. Внутреннее накопительное кольцо установки СЕЗАМЕ, отклоняющие и фокусирующие магниты которого обеспечивают управление траекторией движения электронных пучков в процессе их ускорения (слева). Профиль первого пучка, отображенный системой сбора данных на главном пульте управления установки СЕЗАМЕ. (Фото: МАГАТЭ)

С.2. Исследовательские реакторы

150. По состоянию на 31 декабря в 67 странах сооружены 749 гражданских исследовательских реакторов⁵, из которых 254 эксплуатируются в 55 странах⁶. Наибольшее количество действующих исследовательских реакторов находится в Российской Федерации (59), за ней

⁵ Источник: база данных Агентства по исследовательским реакторам (<http://nucleus.iaea.org/RRDB/>).

⁶ И на Тайване, Китае.

следуют США (50), Китай (17) и Япония (9). Во всем мире 57 исследовательских реактора эксплуатируются на мощности 5 МВт или выше, создавая нейтронные потоки большой плотности для применения в высокомоощных продуктах и услугах.

151. Исследовательские реакторы играют важную роль, предоставляя радиоизотопы для медицины и промышленности, нейтронные потоки для материаловедения и неразрушающего контроля, аналитические услуги и услуги по облучению для частного и государственного секторов и услуги для применения в исследованиях культурного наследия и экологических исследованиях (Таблица С-1). Они вносят стратегический вклад в образование и профессиональную подготовку. В связи с выводом из эксплуатации многих стареющих исследовательских реакторов необходимо обеспечивать эффективное использование, высококачественное управление и устойчивое функционирование остающихся и новых установок. Агентство рекомендует операторам исследовательских реакторов разрабатывать или обновлять стратегические планы использования имеющихся установок. За последние три года 41 установки представили Агентству свои стратегические планы с целью получения дальнейших рекомендаций.

152. Возраст половины находящихся в эксплуатации исследовательских реакторов превышает 40 лет. Продолжительность их жизненного цикла может достигать 60 лет и более, однако чрезвычайно важно своевременно разрабатывать надлежащие программы управления старением, переоборудования и модернизации. С учетом общей тенденции к сокращению финансирования таких установок и ограниченного планирования замен, для обеспечения экономически эффективного выполнения стоящих перед ними задач становятся жизненно важными надежные системы управления, надежные программы эксплуатации и менеджмента и надежные программы управления сроком службы. Ожидается, что на некоторых из 122 исследовательских реакторов в 27 государствах-членах, которые находятся в режиме постоянного останова, в ближайшем будущем начнется подготовка к выводу из эксплуатации.

153. Новые исследовательские реакторы сооружаются в Аргентине, Индии, Республике Корея, Российской Федерации, Саудовской Аравии, Украине (подкритическая ЭЛЯУ) и Франции. Несколько государств-членов имеют официальные планы строительства новых реакторов, в том числе Беларусь, Бельгия, Боливия, Вьетнам, Замбия, Нигерия, Нидерланды, США, Таджикистан (завершение строительства реактора «Аргус-ФТИ») и Таиланд. Другие страны, такие, как Азербайджан, Бангладеш, Боливия, Гана, Кувейт, Ливан, Малайзия, Монголия, Мьянма, Нигерия, Объединенная Республика Танзания, Судан, Таджикистан, Таиланд, Тунис, Эфиопия и Южная Африка, рассматривают возможность строительства новых установок. Многоцелевой иорданский исследовательский и учебный реактор мощностью 5 МВт в Иорданском научно-технологическом университете был введен в эксплуатацию и получил эксплуатационную лицензию в ноябре 2017 года. В 2017 году, после того, как были выполнены требования безопасности, сформулированные после аварии на АЭС «Фукусима-дайити», были вновь введены в эксплуатацию исследовательский реактор нулевой мощности «KUCA» и исследовательский реактор «KUR» мощностью 5 МВт в университете Киото, а также исследовательский реактор нулевой мощности «UTR» в университете Киндай. В декабре после более чем трехлетнего останова для переоборудования здания реактора была возобновлена эксплуатация многоцелевого исследовательского реактора «HANARO» мощностью 30 МВт в Республике Корея.

Таблица С-1. Распространенные виды применения исследовательских реакторов во всем мире^а.

| Тип применения | Число соответствующих исследовательских реакторов ^б | Число государств-членов, в которых находятся такие установки |
|--|--|--|
| Обучение и подготовка кадров | 157 | 53 |
| Нейтронно-активационный анализ | 114 | 52 |
| Производство радиоизотопов | 83 | 43 |
| Нейтронная радиография | 68 | 38 |
| Облучение материалов и топлива | 62 | 26 |
| Нейтронное рассеивание | 44 | 29 |
| Геохронология | 25 | 22 |
| Трансмутация (легирование кремния) | 23 | 16 |
| Трансмутация (драгоценные камни) | 18 | 11 |
| Нейтронная терапия, в основном НИОКР | 14 | 11 |
| Инновационные исследования в области ядерной энергии | 15 | 10 |
| Прочие применения ^с | 118 | 37 |

^а Более подробно эти применения описаны в публикации Агентства «Applications of Research Reactors» («Применение исследовательских реакторов») (Серия изданий МАГАТЭ по ядерной энергии No. NP-T-5.3, 2014).

^б Из 238 рассмотренных исследовательских реакторов (217 находятся в эксплуатации, 21 временно остановлен по состоянию на ноябрь 2017 года).

^с Например, калибровка и поверка приборов, эксперименты по экранированию, измерение ядерных данных, экскурсии для населения, семинары.

154. Государства-члены, планирующие развитие или сохранение национального ядерного потенциала для своих научно-технических программ, включая программы ядерной энергетики, по-прежнему заинтересованы в получении доступа к научно-исследовательским реакторам. Поэтому в 2017 году Агентство объединило и расширило имеющиеся у него четыре инструмента и инструментальных средства: реакторную интернет-лабораторию — инструментальное средство дистанционного обучения главным образом для получения академического образования (ее работа была продолжена в 2017 году для регионов Африки, Европы и Латинской Америки и Карибского бассейна); региональные школы по исследовательским реакторам (РШИР) для базовой подготовки и Инициатива в области восточноевропейских исследовательских реакторов (EERRI) для практического обучения повышенного уровня главным образом для молодых специалистов (в 2017 году РШИР была совместно организована Вьетнамом и Таиландом, а 13-е учебные курсы EERRI были проведены в Австрии, Венгрии и Чешской Республике); и механизм международных центров МАГАТЭ на базе исследовательских реакторов (ICERR) для конкретной улучшенной подготовки молодых и старших специалистов (в 2017 году для этой цели были определены SCK•CEN в Бельгии и Национальная лаборатория Айдахо и Окриджская национальная лаборатория Министерства энергетики США).

155. Продолжительное безопасное, надежное, экономичное обращение с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) исследовательских реакторов и его хранение представляют собой проблему для ряда государств-членов, точно так же, как определение жизнеспособных вариантов конечной стадии топливного цикла, которые должны соответствовать требованиям нераспространения, национальной политики, экономики и экологическим требованиям и ограничениям, наряду с

техническими вопросами. Многие страны, имеющие один или несколько исследовательских реакторов и не имеющие ядерно-энергетической программы или имеющие лишь небольшую программу, сталкиваются с проблемой окончательного захоронения относительно небольших количеств ОЯТ; они могут оказаться вынужденными принимать решение о будущем своих исследовательских реакторов с учетом ограниченной продолжительности международных программ возврата ОЯТ исследовательских реакторов. Предпринимаются координируемые Агентством коллективные усилия, направленные на разработку моделей принятия решений в помощь государствам-членам при выборе наиболее реального варианта для их сценария.

156. На сегодняшний день 97 исследовательских реакторов и две установки по производству медицинских изотопов переведены с высокообогащенного урана (ВОУ) на НОУ или подтверждены как закрываемые. В 2017 году малогабаритный реактор — источник нейтронов (МРИН) в Гане был переведен с ВОУ на НОУ топливо, а облученное ВОУ топливо было возвращено в Китай. Оказывается поддержка аналогичной конверсии нигерийского МРИН. Для конверсии высокопоточных, высокопроизводительных исследовательских реакторов необходимо проводить разработку и аттестацию высокоплотного НОУ топлива (например, ураново-молибденового); несмотря на значительный прогресс, для того, чтобы сделать их коммерчески доступными, необходима дополнительная работа в области испытаний под облучением, послереакторных исследований и методов изготовления.

157. В конце 2017 года в рамках программы возвращения произведенного в США ВОУ топлива было завершено удаление приблизительно 1300 кг свежего и отработавшего ВОУ топлива исследовательского реактора, а в рамках программы возвращения топлива российского происхождения было завершено удаление около 2250 кг топлива.

158. Во Франции «АРЕВА» расширила ассортимент видов перерабатываемого отработавшего топлива исследовательских реакторов, в частности силицидного топлива, которое впервые было переработано в 2017 году. Продолжается перевод процессов производства молибдена-99 с ВОУ на НОУ. В 2017 году Австралийская организация по ядерной науке и технике завершила строительство своей новой производственной установки. Компания «NTP Radioisotopes» (Южная Африка) объявила о полном переводе своих технологических процессов на использование НОУ. Два других крупных производителя, Институт радиоэлементов в Бельгии и компания «Curium» (объединяющая компании «IBA Molecular» и «Mallinckrodt Nuclear Medicine LLC») в Нидерландах, продолжают работу по переводу производственных процессов с ВОУ на НОУ.

159. Краткосрочные остановки работы некоторых значимых в плане мировых поставок предприятий и установок по облучению мишеней из молибдена-99 в 2017 году не привели к какому-либо дефициту поставок, достаточно острому, чтобы это повлияло на пациентов, поскольку усилия органов, координирующих работу системы поставок, и крупных международных производителей, а также эффективные усилия медиков-практиков, направленные на смягчение последствий, позволили сгладить воздействие колебаний. Прекращение регулярного производства молибдена-99 на канадском национальном исследовательском универсальном реакторе в 2016 году к негативным последствиям для глобальных поставок не привело.

D. Продовольствие и сельское хозяйство

D.1. Готовность к ядерным аварийным ситуациям в продовольственной и сельскохозяйственной областях

D.1.1. Проблемы реагирования на ядерные аварийные ситуации

160. Быстрое определение подвергшихся заражению районов производства продовольствия и предотвращение попадания к потребителям потенциально загрязненных продуктов являются примерами проблем, которые потребуют решения во время ядерных аварийных ситуаций. Однако традиционная обработка данных о радиоактивном загрязнении оказывает влияние как на скорость, так и на точность реагирования. Ввиду возможных крупных масштабов ядерной аварийной ситуации могут быть задействованы несколько лабораторий различных учреждений, которые предоставляют разнообразную информацию, часто получаемую с использованием широкого спектра методологий. Эффективная и действенная обработка больших объемов часто разнообразных данных способна определять качество реагирования.

161. Это может быть достигнуто путем использования надежной основанной на информационной технологии системы поддержки принятия решений (IT-DSS), накапливающей и централизованно обрабатывающей всю соответствующую информацию и нацеленной на обработку данных в реальном времени.

D.1.2. Новые разработки в области систем поддержки принятия решений для реагирования на аварийные ситуации

162. Разработки инструментов и алгоритмов для IT-DSS позволяют улучшить обработку в режиме реального времени больших объемов данных и обеспечивают комплексную поддержку принятия решений. Использование мобильных технологий в области сбора полевых и лабораторных данных позволяет уменьшить человеческие ошибки и повысить скорость обработки информации.

163. Современная IT-DSS обеспечивает предоставление четкой визуальной помощи с целью улучшения возможностей реагирования. Например, можно графически представить этап сбора данных (карты, демонстрирующие ход отбора или анализа проб), этап анализа/валидации (карты, демонстрирующие распределение концентрации/выпадения радиоактивных веществ) и этап принятия решений (информационная панель, помогающая определить зоны введения ограничений в отношении пищевых продуктов). Могут сразу же быть предоставлены карты загрязнения пищевых продуктов, так что все участвующие стороны имеют возможность принимать обоснованные решения. Нанесение на карты условных обозначений с заранее заданным цветовым обозначением диапазонов также может использоваться для содействия информированию заинтересованными сторонами населения о рисках.

164. Возможность визуально оценивать данные в реальном времени помогает сопоставить затраты и результаты возможных сценариев реагирования. Пороговые значения и уровни действий, определяемые каждой из заинтересованных сторон в процессе прогнозирования сценария, учитывают различные уровни допустимого риска, предлагая ограничения в отношении сельского хозяйства и перемещения пищевых продуктов. Эти функции поддержки принятия решений позволяют заинтересованным сторонам в большей степени сосредоточить внимание на наиболее важных возникающих вопросах — обеспечении безопасности продуктов питания и безопасности для потребителей.

D.1.3. DSS4NAFA

165. DSS4NAFA — это облачная IT-DSS, разработанная Объединенным отделом ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в продовольственной и сельскохозяйственной областях для руководства действиями Агентства и государств — членом ФАО, предпринимаемыми ими при реагировании во время ядерной аварийной ситуации, затрагивающей продовольствие и сельское хозяйство (рис. D-1). Она оптимизирует сбор, обработку и визуализацию данных с помощью современных алгоритмов. Отличительными особенностями DSS4NAFA являются использование современных технологий, таких, как мобильные инструментальные средства и передовая географическая визуализация, для преодоления материально-технических проблем, возникающих в ходе ядерных аварийных ситуаций, и наличие удобного для пользователей компонента анализа данных, предлагающего меры реагирования. DSS4NAFA построена на модульной основе и включает несколько ИТ-компонентов, которые интегрированы в систему, но могут заменяться по отдельности, делая систему чрезвычайно гибкой и адаптируемой. Бета-версия системы будет выпущена в 2018 году.



Рис. D-1. Использование современных ИТ-систем для оптимизации и реагирования на ядерные аварийные ситуации, затрагивающие продовольствие и сельское хозяйство. Общая схема функционирования DSS4NAFA. (Источник: ФАО-МАГАТЭ)

166. DSS4NAFA — это инновационная система для оценки и интерпретации данных о радиоактивном загрязнении в сфере продовольствия и сельского хозяйства и укрепления потенциала реагирования органов по безопасности пищевых продуктов в случае ядерной аварийной ситуации. Она оказывает поддержку лицам, принимающим решения, при определении мест отбора проб и распределении заданий, связанных с пробами и лабораторным анализом. Она предоставляет мощные инструментальные средства визуальной интерпретации, интегрирующие многомерные данные различного масштаба, от местного до международного, собираемые и обрабатываемые во время ядерной чрезвычайной ситуации.

167. После получения данных о концентрации радионуклидов информационная панель по ограничениям в отношении продовольствия отображает сводную информацию, включая пространственное распределение и развитие аварии во времени, и предлагает введение ограничений в отношении продовольствия и возделывания сельскохозяйственных культур,

основанных на уровне риска и заданных допустимых уровнях. Использование DSS4NAFA позволяет уменьшить сложность управления материально-техническим обеспечением сбора данных, прогнозирования сценариев при анализе данных, предлагая меры по ограничению для принятия решений.

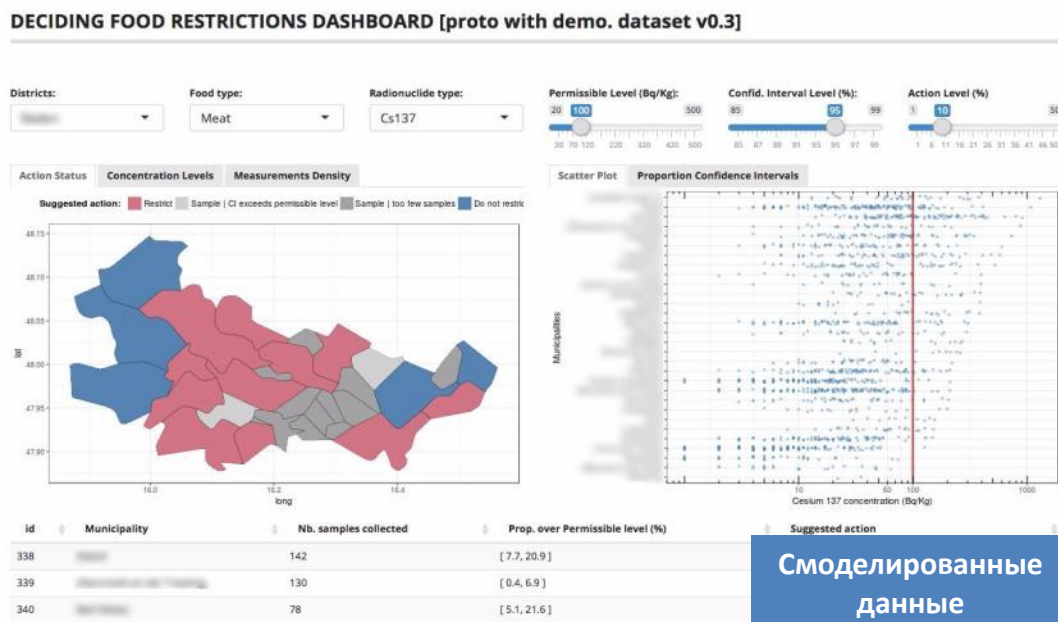


РИС. D-2. Информационная панель по ограничениям, специализированный модуль DSS4NAFA, оказывает помощь лицам, принимающим решения, предлагая меры по принятию решений, основанные на информации о концентрациях радионуклидов и регулируемых интервалах доверительных уровней. У заинтересованных сторон имеются три варианта действий:

- i) ввести ограничения в отношении продовольствия или возделывания сельскохозяйственных культур, ii) не вводить ограничения в отношении продовольствия или возделывания сельскохозяйственных культур и iii) провести дополнительный отбор проб.

(Источник: ФАО-МАГАТЭ)

168. DSS4NAFA способна обрабатывать большие объемы данных, не создавая информационной перегрузки для пользователей. Практические примеры ее использования включают визуализацию пространственных и временных данных о загрязнении, интерактивные графические изображения для оптимизации распределения работ по отбору проб и использования технических средств аналитических лабораторий, и информационные панели для выявления зон, в которых целесообразно введение ограничений в отношении продовольствия.

169. Доступ к платформе системы возможен на месте с помощью приложения в смартфоне или в офисе через интерфейс рабочего стола, что позволяет упростить использование и коммуникации. Сочетание этих функциональных возможностей позволяет включить в процесс все заинтересованные стороны и расширяет возможности надежного реагирования на аварийные ситуации.

D.2. Использование облучения для разработки новых и эффективных вакцин против болезней животных и зоонозных заболеваний

170. Повышение продуктивности животноводства помогает миллионам семей во всем мире увеличить свои доходы. Наличие и доступность эффективных вакцин уменьшают бремя, связанное с болезнями, и являются жизненно важными для животноводства. Многие заболевания, которые передаются от животных к человеку и наоборот (зоонозные заболевания) можно предотвратить путем использования вакцин.

171. Использование вакцин также позволяет сократить применение терапевтических средств в животноводстве и способствует снижению нагрузки, связанной с резистентностью к антипаразитарным и противомикробным препаратам. Хотя успехи в области биотехнологии за последнее столетие способствовали разработке многочисленных новых вакцин против болезней животных, ряд разрушительных трансграничных инфекционных заболеваний по-прежнему являются проблемой для животноводов ввиду отсутствия эффективных вакцин или низкой эффективности вакцин, имеющихся в настоящее время.

172. Одним из лучших способов получения вакцины является использование полностью неинфекционных патогенных микроорганизмов в качестве инструмента стимулирования иммунитета. При разработке вакцин радиационные технологии применяются различными рациональными способами (рис. D-3). В соответствии с одним из подходов патогенные микроорганизмы, такие как вирусы, подвергаются воздействию высоких доз гамма-облучения (25–30 кГр) с целью полной инактивации возбудителя инфекции. Такой подход желателен в случае высокопатогенной микрофлоры, когда не предполагается введение живых организмов в организм-носитель. Однако инактивация путем облучения не уничтожает антигены в отличие от химических методов, которые часто используются при производстве вакцин.

173. Кроме того, для остановки репликации или способности организма вызывать заболевание в то время, как организм все еще метаболически активен, используется низкая доза облучения. Это обусловлено частичным разрушением или возникновением определенных мутаций в генетическом материале. Поэтому такие вакцины называют «метаболически активными и репликативно дефектными»⁷.

174. В рамках третьего подхода облученный патоген используется для усиления или коррекции иммуногенности другого связанного или не связанного с ним микроорганизма, содержащегося в вакцине.

175. Соединения, повышающие эффективность вакцины, называют адъювантами, и они часто используются в вакцинных препаратах. Радиационные технологии также могут косвенно использоваться для повышения эффективности и безопасности вакцин. Одним из таких применений является облучение существующих вакцин для обеспечения того, чтобы в составе вакцины, используемой для прививки, не содержались инфекционные, загрязняющие организмы. В качестве альтернативы можно облучать адъюванты вакцин с целью изменения их структуры (например, полимеризации) и усиления иммунологического или защитного эффекта.

176. Начиная с 1950-х годов, ученые пытались создавать вакцины путем облучения патогенов. Однако классическое использование радиационных технологий приводило к переоблучению патогенных микроорганизмов, тем самым разрушая связанные с ядром и белковые структуры этих вакцин-кандидатов. Наше новое понимание использования радиационных технологий основано на том, что, как было обнаружено, современные облучатели способны эффективно генерировать более высокие и целенаправленные дозы облучения. В то же время также расширились знания иммунной системы, что повлекло за собой появление улучшенных инструментальных средств и технологий для оценки иммунных реакций после вакцинации.

177. Наряду с достижениями в области геномных исследований эти события привели к возрождению интереса к облученным вакцинам и активизации разработки новых и эффективных вакцин. Например, новые электронно-лучевые облучательные установки способны в течение нескольких минут генерировать дозы облучения, достигающие 30 кГр, что предотвращает накопление нежелательных побочных продуктов, таких как свободные радикалы, появления которых невозможно избежать при использовании более продолжительного облучения.

⁷ Magnani, D.M., Harms, J.S., Durward, M.A., Splitter G.A., Nondividing but metabolically active gamma-irradiated *Brucella melitensis* is protective against virulent *B. melitensis* challenge in mice, *Infect. Immun.* 77 11 (2009) 5181-5189.

178. Недавно обнаруженные радиопротекторные препараты также помогают защитить структуры, которые отвечают за антигенность вакцин. В их числе Mn²⁺-декапептидный комплекс (MDP) — соединение, выделенное из радиационно-стойких бактерий, которое сохраняет иммуногенные протеины вирусов и бактерий, подвергшихся воздействию повышенных доз γ -излучения, путем удаления свободных радикалов, образовавшихся во время облучения⁸.

179. Упомянутые выше технологические достижения и креативные подходы к разработке вакцин вышли за рамки первоначальных базовых экспериментов. В области медицины, метаболически активные не способные к репликации спорозоиты, полученные из облученных комаров, использовались для стимулирования иммунитета к малярийным инфекциям. Для использования вакцины-кандидата в клинических испытаниях, проводимых на людях, необходимы надежное подтверждение правильности концепции и строгие стандарты безопасности.

180. Облученная противомаларийная вакцина не только вышла на этапы клинических испытаний, но также продемонстрировала существенную защиту от последующих инфекций⁹. Облучение также использовалось для полной инактивации вируса ВИЧ-1, который, как затем было показано, оказался безопасным в клинических испытаниях на людях и в плане улучшенной реакции на образование антител против ВИЧ.

181. Опираясь на эти позитивные события и наше новое понимание выборочного и контролируемого использования облучения, многие государственные и частные учреждения активизировали свои усилия по разработке «радиовакцин». Исследования, проведенные учеными Института клеточной терапии и иммунологии им. Фраунгофера (IZI) в Германии, показали, что облучение электронами низкой энергии сохраняет антигенные свойства вирусов, таких, как вирус конского герпеса и вирус, вызывающий репродуктивный и респираторный синдром у свиней и даже защитные иммунные ответы при гриппе¹⁰.

182. Исследования, проведенные в Висконсинском университете в Мэдисоне и в Университете Пердью, Соединенные Штаты Америки, показали, что вакцинация мышей метаболически активными облученными бактериями бруцеллеза предотвращает их заболевание при воздействии инфекции. Бруцеллез является наносящей экономический ущерб болезнью животных, имеющей глобальные экономические последствия, а также зоонозным заболеванием. Известно лишь несколько примеров успешных экспериментов, которые были проведены при разработке облученных вакцин против заболеваний скота. Другие текущие эксперименты по разработке облученных вакцин для трансграничных заболеваний животных связаны с ящуром и геморрагической септициемией.

183. Агентство явилось инициатором нового поколения научных исследований в этой области, проводимых в рамках проекта координированных исследований при участии шести партнеров (Бангладеш, Египта, Исламской Республики Иран, Судана, Шри-Ланки и Эфиопии) с целью оценки новых подходов к производству экспериментально облученных вакцин.

⁸ Gayen, M., et al., Deinooccus Mn²⁺-peptide complex: A novel approach to alphavirus vaccine development, *Vaccine*. 35 29 (2017) 3672-3681.

⁹ Sissoko, M.S., et al., Safety and efficacy of PfSPZ Vaccine against *Plasmodium falciparum* via direct venous inoculation in healthy malaria-exposed adults in Mali: a randomised, double-blind phase 1 trial, *Lancet Infect. Dis.* 17 5 (2017) 498-509.

¹⁰ Fertey, J., et al., Pathogens inactivated by low-energy-electron irradiation maintain antigenic properties and induce protective immune responses, *Viruses* 8 11 (2016) E319.

184. Ученые из этих стран исследуют различные патогены животных или зоонозные патогены и проверили концепции дифференциальных доз облучения при разработке вакцин-кандидатов. В настоящее время проводятся эксперименты с целью определить, могут ли такие вакцины обеспечивать защиту животных при воздействии инфекционных болезнетворных организмов. Первое сообщение об успехе касалось прототипа облученной вакцины против *Haemonchus contortus* — паразитов желудочно-кишечного тракта жвачных животных. Подвергающиеся опасности заражения животные были на 100% защищены после получения двух пероральных доз облученных личинок *Haemonchus contortus*.

185. Агентство проводит эксперименты по разработке прототипов облученных вакцин против двух вирусов свиней, наносящих серьезный ущерб свиноводству: вируса свиного гриппа и вируса репродуктивно-респираторного синдрома свиней. Оно также разрабатывает и предоставляет инструментальные средства для измерения иммунного ответа, индуцированного вакцинацией облученными организмами. Разрабатываются методы измерения клеточно-опосредованного иммунитета — области, которая была слабо развита в иммунологии скота, но имеет большое значение при изучении вирусных заболеваний.

186. Агентство также занимается созданием хранилища моноклональных антител, распознающих иммунные маркеры жвачных животных, которые будут предоставляться лабораториям государств-членов. Что касается определенных патогенов, то ученые недавно обнаружили «горячие точки» генома паразитов трипаносома, подверженные воздействию низких доз облучения. Это открытие окажет помощь в разработке лекарств и вакцин против паразита, серьезно влияющего на производство продукции животноводства в развивающихся странах.

187. После того, как была проверена и утверждена концепция технологии дифференциального облучения, исследования теперь сосредоточиваются на разработке технологического процесса и расширении масштабов производства вакцин. Биотехнологическая компания «Санария», проводящая эксперименты с облученной противомаларийной вакциной, изучает возможности использования роботов для производства вакцин, в то время как Институт Фраунгофера в Германии проводит эксперименты по разработке новой автоматизированной технической процедуры с целью внедрения электронно-лучевого облучения в промышленных масштабах для производства вакцин. Некоторые из партнеров по проекту координированных исследований предприняли инициативы по производству сухих составов облученных вакцин с целью достижения термостабильности, что облегчило бы их доставку в отдаленные районы без необходимости хранения вакцин в охлажденном состоянии.

188. Хотя многие разработки технологии облученных вакцин находятся лишь на этапе исследований, недавние открытия несомненно демонстрируют потенциальную возможность применения этой технологии для разработки эффективных вакцин против многих болезнетворных вирусов, бактерий и паразитов. Инвестирование в эту технологию поможет бороться со многими заболеваниями и способно оказать существенное влияние на экономику и здравоохранение развивающихся стран.

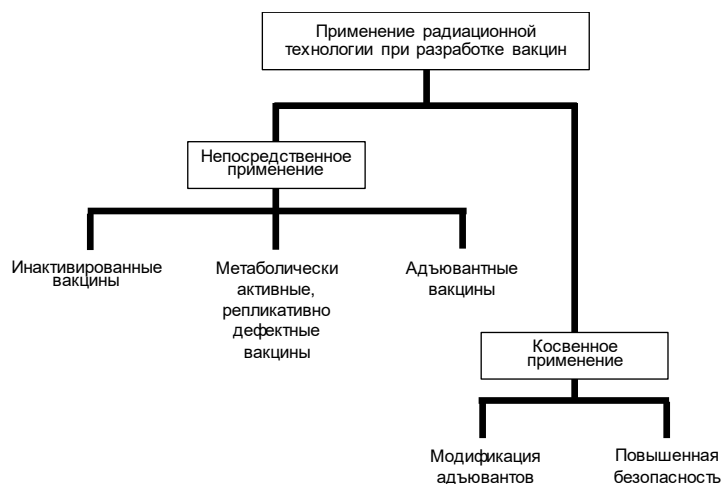


РИС. D-3. Радиационные технологии могут применяться для разработки новых вакцин и повысить эффективность и безопасность существующих вакцин. (Источник: МАГАТЭ-ФАО)



РИС. D-4. В Исламской Республике Иран ученый занимается разработкой облученной вакцины (слева), тогда как ученый из Судана проводит забор крови овцы (справа) с целью оценки эффективности вакцины. (Фото: Фарахназ Мотамеди Седех, Институт исследований в области ядерной науки и технологий, Исламская Республика Иран и Михад Алавад, Центральная научно-исследовательская ветеринарная лаборатория, Судан)

D.3. Мультиизотопные «отпечатки пальцев» для идентификации источников агрозагрязнителей, поступающих из почвы в водоемы

189. В настоящее время Агентство проводит работу по разработке протоколов и руководящих принципов для отслеживания источников агрозагрязнителей и разработки инновационных практических приемов землепользования и водопользования с целью уменьшения содержания агрозагрязнителей в окружающей среде.

190. Сельскохозяйственное загрязнение рек и ручьев оказывает непосредственное негативное воздействие на здоровье человека, биоразнообразие и промышленное рыболовство. Расширение и интенсификация сельскохозяйственных систем в ответ на растущий спрос на продовольствие зачастую приводят к чрезмерному и неправильному использованию таких агрохимикатов, как органические и неорганические удобрения и пестициды. В глобальных масштабах большие объемы производства сельскохозяйственных культур были достигнуты главным образом за счет интенсивного использования агрохимикатов в сочетании с ирригацией, что способствовало переносу сельскохозяйственных загрязнителей из почвы в водоемы. В большинстве стран с

высоким уровнем доходов и во многих развивающихся странах сельскохозяйственное загрязнение уже превышает загрязнение, создаваемое домашними хозяйствами и промышленностью, и является основной причиной ухудшения качества внутренних и прибрежных вод. В Европейском союзе 38% водоемов подвергаются значительному воздействию сельскохозяйственного загрязнения¹¹ (рис. D-5). В Соединенных Штатах Америки сельское хозяйство является основным источником загрязнения рек и ручьев, вторым основным источником загрязнения водно-болотных угодий и третьим основным источником загрязнения озер¹².

191. Основной пробел в знаниях относительно загрязнения в агроэкосистемах связан с определением и распределением источников — областью, которая требует большего объема данных, исследований и интеграции подходов. Выявление и распределение соответствующих вкладов имеет важное значение для национальных учреждений и правительств с точки зрения разработки соответствующей политики и практики управления, а также целенаправленного принятия ответных мер. Когда загрязнение агроэкосистемы создают несколько источников, традиционные методы, такие как количественная оценка загрязняющих элементов и массового баланса, оказываются неэффективными при оценке относительного вклада различных источников. Поэтому для устранения этих пробелов необходимы взаимодополняющие подходы. Стабильные изотопы основных химических элементов, дополняющие традиционные подходы, являются ключом к определению характеристик и количественному определению источников и переноса растворенных веществ через почву и водоемы в агроэкосистемах.

192. Стабильные изотопы химических элементов азота, углерода, кислорода, серы и водорода успешно используются для отслеживания и мониторинга источников и переноса растворенных веществ и воды в агроэкосистемах¹³. Исследования показали, что, в зависимости от происхождения источника загрязнения, изотопная сигнатура каждого элемента является уникальной и поэтому может использоваться для идентификации источника. Для того, чтобы отслеживать и контролировать источники фосфора, основного компонента удобрений, повышающих урожайность сельскохозяйственных культур, поступающего из почвы в водоемы, используется изотопная сигнатура кислорода-18 в неорганическом фосфате ($\delta^{18}\text{O-PO}_4$). Применение компонентно-специфического изотопного анализа (КСИА) в отношении микрозагрязнителей основано на способности контролировать изменения состава стабильных изотопов между источником(ами) и выходом(ами) и тем самым количественно оценивать степень химических и биохимических преобразований в агроэкосистемах^{14,15,16}. Множественные источники загрязнителей в агроэкосистемах могут приводить к перекрытию изотопных сигнатур, затрудняя или делая невозможными их идентификацию и распределение с помощью единственного изотопного индикатора.

¹¹ ПОВРМ (Программа оценки водных ресурсов мира Организации Объединенных Наций) (2015). Доклад о состоянии водных ресурсов мира Организации Объединенных Наций-2015: Вода для устойчивого мира. Организация Объединенных Наций по вопросам образования, науки и культуры

¹² АОС США (Агентство по охране окружающей среды Соединенных Штатов) (2016). Water Quality Assessment and TMDL Information. https://ofmpub.epa.gov/waters10/attains_index.home.

¹³ Skrzypek G., Mydłowski A., Dogramaci S., Hedley P., Gibson J.J., Grierson P.F. (2015). Estimation of evaporative loss based on the stable isotope composition of water using Hydrocalculator. *Journal of Hydrology* 523: 781-789. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.010>.

¹⁴ Tamburini F., Pfahler, V., von Sperber, C., Frossard E., Bernasconi, S.M. (2014). Oxygen isotopes for unravelling phosphorous transformations in the soil-plant systems: a review. *Soil Science Society of America Journal* 78: 38-46.

¹⁵ Granger, S.J., Harris, P., Peukert, S., Gou, R., Tamburini, F., Blackwell, M.S.A., Howden, J.K., McGrath, S. (2017). Phosphate stable oxygen isotope variability within a temperate agricultural soil. *Geoderma* 285: 64-75.

¹⁶ Elsner M., Imfeld, G. (2016). Compound-specific isotope analysis (CSIA) of micro pollutants in the environment — current developments and future challenges. *Curr. Opin. Biotechnol.* 41:60-72.

193. Полное определение характеристик потенциально многочисленных источников макронутриентов и микрозагрязнителей в комплексных агроэкосистемах требует комплексного подхода с использованием нескольких изотопных индикаторов. Сигнатуры стабильных изотопов углерода, кислорода, азота и серы в жидкой фазе характеризуют пропорциональный вклад различных источников, тогда как стабильные изотопы водорода и кислорода в молекулах воды характеризуют гидрологический цикл (поступление от источников воды и потери на испарение). Этот комплексный подход к анализу растворенных веществ и воды позволяет разделить пути распространения загрязнителей и потоков воды. Преимущество применения методов стабильных изотопов заключается в том, что они являются недорогой аналитической альтернативой обычно трудоемкого и длительного полномасштабного мониторинга, требующего устоявшейся инфраструктуры. Поэтому Объединенный отдел ФАО/МАГАТЭ выступил инициатором проекта координированных исследований по разработке и проверке руководящих принципов использования нескольких индикаторов, меченых стабильными изотопами, для мониторинга загрязняющих веществ сельскохозяйственного происхождения в почве, воде и питательных веществах в локальном и более широком масштабе.

194. В сочетании с обычными методами этот подход должен способствовать принятию соответствующих восстановительных мер в государствах-членах и привести к повышению качества и устойчивости практики землепользования.



РИС. D-5. Слева: Схематическая диаграмма, показывающая перенос загрязнителей сельскохозяйственного происхождения в агроэкосистеме (Фото: Гвенель Имфельд, НЦНИ, Франция). Справа: Качество воды в дельте Дуная, подвергшейся воздействию загрязнителей (Фот: ФАО-МАГАТЭ)

Е. Здоровье человека

Е.1. Стереотаксическая лучевая терапия: высокоточный метод лучевой терапии

195. Стереотаксическая радиохирургия (СРХ) является нехирургическим усовершенствованным радиационным методом доставки точно нацеленного излучения к опухолям и областям некоторых функциональных нарушений головного мозга. Стереотаксическая радиотерапия всего тела (СРВТ), иногда называемая абляционной стереотаксической лучевой терапией (АСЛТ), является продолжением того же метода, обеспечивающим доставку излучения к экстракраниальным частям тела.

196. При проведении СРХ или СРВТ вся доза доставляется в течение одной — пяти процедур, в то время как при обычной лучевой терапии доза доставляется как сумма малых ежедневных долей в течение нескольких недель. Оба метода являются важными альтернативами инвазивной хирургии, особенно для пациентов, которые не могут быть подвергнуты операции, и в случае опухолей и аномалий, которые трудно достижимы или расположены рядом с жизненно важными органами. Их отличительными чертами являются отсутствие разреза, минимальный дискомфорт, меньшее время восстановления и меньшее число рисков, обычно связанных с хирургией, таких, как инфекции.

197. Для успешной реализации СРХ и СРВТ требуется экспертное знание пораженного участка и используемого оборудования. Поэтому для проведения СРХ и СРВТ должна быть разработана методика выполнения процедур, специфическая для пораженного участка и используемого оборудования.

Е.1.1. Технические требования

198. Для обеспечения безопасности и качества программы СРХ или СРВТ требуется наличие надлежащего персонала. Погрешность этих методов меньше, чем в случае обычной лучевой терапии, поскольку при каждой фракционной процедуре используются более высокие дозы, а число процедур уменьшено. Поэтому установка, используемая для проведения такого лечения, должна соответствовать самым строгим техническим требованиям, в том числе в отношении механических допусков и ввода в эксплуатацию. До начала фактического лечения весь процесс лечения от начала до конца тестируется на модели тела. Как правило, проведение СРХ и СРВТ включает этапы визуализации, иммобилизации и планирования и проведения лечения, как указано ниже.

Трехмерная визуализация и четырехмерная локализация опухоли

199. Визуализация высокого разрешения позволяет определить локализацию, размер и форму опухоли, помогает определить точные координаты цели (опухоли) в теле и организовать планирование лечения. Для этой цели используются компьютерная томография (КТ), магнитно-резонансная визуализация (МРВ) и позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ)/КТ. Как правило, КТ используется для получения исходных изображений. Она предоставляет точную информацию о плотности электронов и обычно имеет весьма низкий уровень пространственных искажений. Для многих целевых областей применения СРВТ, например, легких и живота предпочтительным инструментом визуализации является ПЭТ-КТ, а в случае поражения мозга и поражения печени — МРВ, поскольку эти методы позволяют различать нормальные и аномальные ткани лучше, чем КТ.

Иммобилизация, укладка и сохранение положения пациента

200. Во время визуализации и лечения положение опухоли может изменяться вследствие движения, связанного с дыханием или перемещением тела; могут также претерпевать изменения размеры и форма опухоли. Поскольку этот вид лечения требует миллиметровой точности, необходимы индивидуальные настраиваемые под конкретного пациента устройства укладки пациентов, обеспечивающие фиксацию положения пациентов и тем самым сводящие к минимуму перемещение мишени во время выполнения процедуры лечения. Существуют различные методы оценки, управления и мониторинга дыхательных движений во время проведения СРВТ, включая замедленную КТ, 4-D КТ, абдоминальную компрессию, синхронизацию и задержку дыхания. 4-D КТ визуализация обеспечивает реконструкцию внутреннего объема мишени, учитывающую положение опухоли на всех фазах дыхательного цикла. Возможно также динамическое отслеживание положения мишени в реальном времени.

Сильно сфокусированные пучки гамма- или рентгеновского излучения

201. СРХ и СРВТ могут осуществляться с использованием линейного ускорителя, установки «гамма-нож» или ускорителя заряженных частиц. Линейные ускорители могут применяться для воздействия на опухоли большего размера (СРХ) в рамках одной или нескольких процедур (стереотаксической лучевой терапии).

202. Устройство «гамма-нож» было изобретено шведским нейрохирургом Лекселлом в Швеции в 1951 году и явилось первым устройством, использованным для проведения СРХ. Оно состоит из нескольких кобальтовых источников излучения, создающих пучки сильно сфокусированного гамма-излучения, направленные на область целевого воздействия. Оно идеально подходит для лечения малых и средних внутричерепных поражений размером обычно менее 4 см и позволяет избегать высоких доз облучения таких структур, как зрительный аппарат и ствол головного мозга.

203. Главным преимуществом протонной СРХ с использованием тяжелых заряженных частиц является то, что пучок проникает на глубину, определяемую энергией частиц. Отсутствие дозы на выходе и четкий профиль протонного пучка обеспечивают целенаправленное облучение с более низкими уровнями дозы, чем в случае использования фотонного излучения. Это дорогостоящая форма лечения.

Е.1.2. Требуемые специалисты

204. Для проведения СРХ и СРВТ необходима группа высококвалифицированных специалистов различного профиля, включая радиационных онкологов, медицинских физиков, техников-радиотерапевтов, радиологов, нейрохирургов и специалистов по неврологии. Радиационные онкологи руководят лечением; иногда они делают это в сотрудничестве с нейрохирургами.

205. Радиационный онколог определяет контуры целевой области лечебного воздействия и нормальных тканей, назначает надлежащую дозу облучения, утверждает план лечения и интерпретирует результаты радиохирургических процедур. Медицинский физик обеспечивает доставку точной дозы излучения; он или она с помощью компьютеризированной системы планирования лечения разрабатывает планы лечения и рассчитывает время экспозиции и конфигурацию пучка, обеспечивающую воздействие на мишень(и) назначенной дозой. Техник-радиотерапевт укладывает пациента на процедурный стол и включает установку.

Е.1.3. Показания

206. СРХ обеспечивает лечение многих доброкачественных, злокачественных и функциональных заболеваний головного мозга. СРВТ применяется при различных показаниях, включая рак легких на ранней стадии у больных с неоперабельными формами рака и больных, отказывающихся от хирургического лечения, метастазы в легких, первичный рак печени, метастазы в печени, локализованный рак простаты, рак поджелудочной железы, метастазы в надпочечнике, первичный рак почек у больных с неоперабельными формами рака, метастазы во внутрибрюшных и внутригрудных лимфатических узлах, рецидивирующий и первичный рак головы и шеи, опухоли позвоночника и метастазы в позвоночных костях.

207. После лечения размеры доброкачественных опухолей могут уменьшаться в течение последующих полутора — двух лет, тогда как размеры злокачественных и метастатических опухолей уменьшаются более быстрыми темпами. Многие опухоли остаются стабильными, неактивными и без изменений и могут со временем стабилизироваться или подвергнуться регрессу. В качестве варианта лечения, который неинвазивен и обычно завершается в амбулаторных условиях в течение дня или недели, СРХ и СРВТ не только обеспечивают потенциальную экономию больничных ресурсов, но также позволяют больным более быстро

возвратиться к обычной повседневной деятельности. Побочные эффекты лечения зависят от локализации опухоли и используемой дозы. К счастью, ожидаемые побочные эффекты СРХ и СРВТ находятся в допустимых пределах.

Е.1.4. Вклады Агентства

208. В 2014 году Агентство приступило к осуществлению проекта координированных исследований по рандомизированному сравнительному исследованию СРВТ и трансартериальной химиоэмболизации при гепатоцеллюлярной карциноме. В этом исследовании участвуют одиннадцать онкологических центров в Азиатско-Тихоокеанском регионе, Африке и Европе. Кроме того, Агентство оказывает поддержку региональному проекту по клиническому применению СРВТ и помогает государствам-членам в организации или обновлении служб СРВТ. Многие радиационные онкологи, медицинские физики и радиологи в участвующих странах прошли подготовку по различным аспектам СРВТ, включая обеспечение качества и контроль качества.

209. СРХ/СРВТ находит широкое признание и используется все чаще. Опубликованные результаты высококачественных клинических исследований подтвердили их роль в различных клинических ситуациях. Кроме того, СРХ/СРВТ подвергается оценке в рамках многочисленных клинических испытаний, как по отдельности, так и в сочетании с препаратами направленного действия или иммунотерапией, при лечении многих видов первичного и вторичного рака. Доклинические данные показывают, что иммунотерапия может дополнять радиационно-активированный ответ при локальных опухолях, и, аналогичным образом, высокие дозы радиации могут дополнять системные эффекты иммунотерапии, делая СРХ/СРВТ идеальным методом для использования в сочетании с иммунотерапией. Во многих клинических ситуациях СРХ/СРВТ может оказаться более экономически выгодным методом лечения, чем обычная лучевая терапия.

Е.2. Нейропсихиатрия: революция, произведенная молекулярной визуализацией в борьбе с болезнью Альцгеймера

Е.2.1. Общие сведения

210. Деменция является прогрессивным, в основном необратимым нейродегенеративным заболеванием, которое характеризуется нарушением психических функций; она влияет на память, мышление, поведение и возможность выполнения повседневной деятельности. Из примерно 47 миллионов человек, страдающих деменцией во всем мире, две трети живут в развивающихся странах.

211. Отличительные клинические симптомы может быть трудно диагностировать на ранних стадиях; однако ядерная технология может играть важную роль в определении основного патологического процесса за несколько лет до того, как начнут проявляться симптомы болезни.

212. Существует много различных видов деменции, причем болезнь Альцгеймера (БА) является наиболее распространенным из них и на нее приходится примерно 60–70% случаев во всем мире. К другим распространенным видам деменции относятся сосудистая или мультиинфарктная деменция, на которую приходится примерно 25% случаев; деменция с тельцами Леви, на которую приходится 15% случаев; и фронтотемпоральная деменция. Деменция может также вызываться такими заболеваниями, как болезнь Паркинсона, сифилис и болезнь Крейтцфельдта-Якоба. Больной может страдать более чем одним видом деменции.

213. Такие расстройства, как БА, являющаяся наиболее опасным заболеванием после рака, представляют собой существенное бремя во всем мире и имеют значительные медицинские и социально-экономические последствия. Деменция является одной из основных причин инвалидности и зависимости пожилых людей во всем мире.

214. Хотя никакого известного метода лечения деменции не существует, имеются различные конкретные подходы к борьбе с ее симптомами, планированию помощи и ориентации для специалистов по уходу и членов семьи, в зависимости от причины. Кроме того, некоторые лекарства могут быть полезными на ранних стадиях, замедляя тем самым развитие болезни; а другие меры могут улучшить качество жизни людей с деменцией и лиц, ухаживающих за ними. Поэтому ранний, более точный дифференциальный диагноз важен для улучшения ухода за такими больными.

215. Деменция обычно диагностируется путем оценки истории болезни и результатов тестов познавательных способностей, проводимых с целью анализа сознательной интеллектуальной деятельности, такой как мышление, аргументация или запоминание. Обнаружение возможных когнитивных нарушений является первым шагом при определении того, следует ли проводить дальнейшую оценку состояния пациента.

Е.2.2. Диагностика

216. В области ядерной медицины, также известной как молекулярная визуализация, за последние несколько десятилетий достигнут значительный прогресс. Начиная с 1990-х годов, визуализация головного мозга методом позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) с применением радиофармацевтического препарата фтордезоксиглюкоза (ФДГ) и визуализация перфузии мозга методом однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) сыграли важную роль в клинической диагностике различных болезней мозга, включая БА и другие формы деменции.

217. Исследования методом молекулярной визуализации полезны в сложных случаях деменции и в тех случаях, когда также присутствуют другие нарушения, и невозможно сразу же установить, с каким заболеванием связан определенный симптом. Инсульт является широко распространенным сопутствующим заболеванием. Он может сам по себе влиять на функции мозга, а некоторые из его симптомов аналогичны симптомам нейродегенеративной деменции. Молекулярная визуализация позволяет врачам различать эти состояния.

218. ПЭТ является общепризнанным средством для оценки пациентов с нейродегенеративными расстройствами, особенно при диагностике деменции. При использовании ФДГ может быть оценен метаболизм глюкозы в головном мозге, что делает возможной раннюю, правильную диагностику, дифференциальную диагностику, раннее распознавание прогрессирующей деменции, мониторинг развития заболевания и оценку реакции на медикаментозное лечение.

219. Изотопные индикаторы также открывают новые перспективы для изучения невропатологии скрытой деменции, такой как накопление амилоидных белков, тау-белков и наличие воспалений или нарушений деятельности сердечно-сосудистой системы. ПЭТ визуализация с использованием различных изотопных индикаторов предлагает надежные биомаркеры, связанные с деменцией, которые способны оказать врачам-клиницистам помощь в диагностике различных дементных расстройств, особенно в случае перекрытия заболеваний.

220. В последнее время амилоидная ПЭТ визуализация стала доступной в клинических условиях во многих странах. Амилоидное ПЭТ сканирование обеспечивает точное обнаружение *in vivo* амилоидных бляшек — признака одного из основных патологических процессов БА. Сканирование, которое является крайне специфичным для оценки аномальных белковых

отложений в головном мозге, способно помочь в выработке улучшенных рекомендаций относительно диагностики и лечения. Его клиническая ценность в настоящее время оценивается посредством испытаний, проводимых в ряде центров.

221. Другими новыми методами ПЭТ визуализации являются оценка тау-белка и оценка воспаления. Тау-белок — это ассоциированный с микротрубочками белок, который необходим для обеспечения стабильности и функционирования нейронов, и его избыточная фосфорилиция и аномальная агрегация связаны с различными нейродегенеративными заболеваниями, известными как «таупатии». Наиболее распространенным из них является БА.

222. Эти методы не только улучшают повседневный уход за пациентами, но также позволяют получать критически важные знания о самом процессе протекания заболевания, что поможет улучшить разработки в области терапии.

Е.2.3. Глобальные инициативы и информированность

223. С проблемой деменции связан ряд глобальных инициатив. Некоторыми из наиболее важных являются: идентификация деменции как глобальной приоритетной проблемы, быстрое развитие нейровизуализации и медицинских исследований для создания новых альтернативных методов лечения. Кроме того, некоторые организации включают деменцию в свою повестку дня, например, Группа семи с ее инициативой глобальных действий против деменции, Конференция ВОЗ на уровне министров по глобальным действиям против деменции и, совсем недавно, Фонд Билла и Мелинды Гейтс.

224. Агентство участвует в текущих событиях и мероприятиях, направленных на улучшение информированности о важности деменции и других неврологических заболеваний. Эти мероприятия включают проекты координированных исследований, региональные учебные курсы и национальные семинары-практикумы по тематике важности методов ядерной медицины в визуализации цереброваскулярных и неврологических заболеваний, включая деменцию. Агентством создан консорциум МАГАТЭ по нейровизуализации с целью изучения значения нейровизуализации с использованием современных методов, таких, как ПЭТ-КТ, для правильной диагностики умеренных когнитивных нарушений и определения того, приводит ли наличие сопутствующих факторов, таких как ВИЧ-инфекция, заболевания сосудов головного мозга и черепно-мозговая травма, к более низкой точности диагноза, чем у больных, не имеющих этих сопутствующих факторов. В настоящее время имеются лишь ограниченные научные данные относительно этой подгруппы пациентов; поэтому новая информация окажется полезной для государств-членов. Учебные программы МАГАТЭ для семинаров-практикумов, проведенных в Школе медицины Осакинского университета в Японии и рассчитанных на специалистов в области ядерной медицины, посвящены важности методов ядерной медицины в визуализации цереброваскулярных и неврологических заболеваний, в том числе опухолей головного мозга, эпилепсии и деменции. Семинары-практикумы по нейровизуализации для повышения квалификации врачей ядерной медицины при интерпретации результатов исследований в области ядерной неврологии, включая исследования деменции, были также проведены в Аргентине, Бразилии, Словении, Таиланде и на Филиппинах.

225. В поддержку непрерывного медицинского образования, на веб-сайте Агентства «Кампус по здоровью человека» имеется раздел, посвященный нейровизуализации, который предлагает посетителям учебные материалы, лекции, список рекомендуемой литературы и руководящие принципы, руководство по составлению отчетов о медицинском сканировании и образовательные материалы, используемые в учебных курсах Агентства.

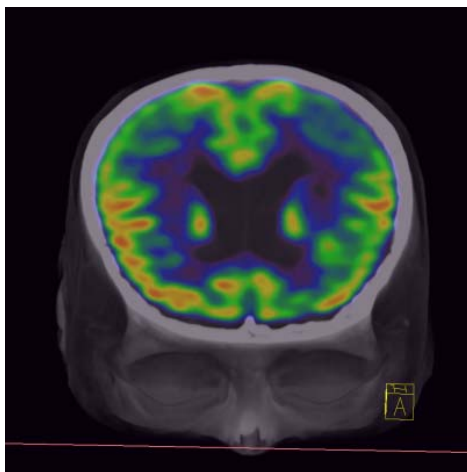


РИС. Е-1. Объемная реконструкция результатов исследования методом ПЭТ/КТ страдающей диабетом пациентки возрастом 65 лет с болезнью Альцгеймера. Исследование методами ядерной медицины с использованием ПЭТ/КТ и ^{18}F -ФДГ было проведено с целью установить тип деменции и тяжесть заболевания. (Фото: д-р Иван Диас, Национальный институт неврологии и нейрохирургии в Мексике)

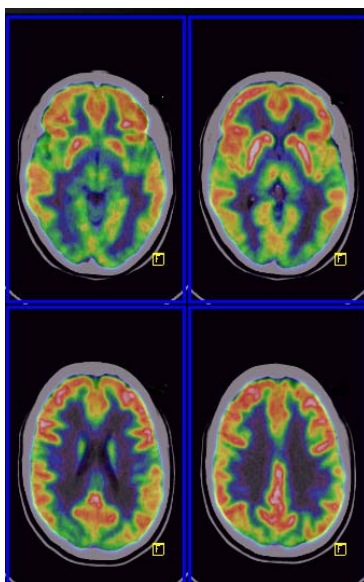


РИС. Е-2. 75-летний пациент с историей гипертонии и клиническими признаками деменции. Исследование методами ядерной медицины с использованием ПЭТ/КТ и ^{18}F -ФДГ было проведено с целью установить тип деменции и тяжесть заболевания. Сканирование подтверждает изменения, связанные с болезнью Альцгеймера (фото: д-р Иван Диас, Национальный институт неврологии и нейрохирургии в Мексике)

Ф. Окружающая среда

Ф.1. Ядерные методы в исследованиях пластикового загрязнения морской среды

226. Океаны покрывают более 70 процентов земной поверхности, и они безусловно определяют благоприятный климат Земли и способствуют смягчению некоторых негативных последствий изменения климата. При рациональном управлении океаны могут также играть важную роль в обеспечении рабочих мест и средств к существованию для широких слоев населения в мире. К сожалению, океаны являются также местом окончательного удаления многочисленных образующихся на суше загрязнителей, включая разнообразные сельскохозяйственные, муниципальные и промышленные выбросы органических и неорганических загрязнителей. Как следствие такой деятельности, пластиковые фрагменты всех размеров теперь встречаются повсеместно в океане, где мелкие частицы могут попадать в организмы морских животных, таких как бентические организмы, зоопланктон, моллюски, рыбы, птицы и киты. В то время как явно выраженное видимое воздействие макропластика на морские организмы хорошо документировано, потенциальный вред, причиняемый микропластиком, обычно определяемым как частицы диаметром менее 5 мм^{17,18}, выяснен гораздо менее (рис. F-1).



РИС. F-1. Пластиковый мусор, включая микропластик, теперь присутствует повсюду в океане и может через пищеварительный тракт и в результате биоаккумуляции попадать в разнообразные морские организмы, где он может создавать риск для здоровья людей.

Фото: Дж.Л. Тэйсси/МАГАТЭ.

227. С целью улучшения информированности и разработки более эффективных стратегий смягчения последствий и инструментальных средств Агентство использует ядерные и изотопные методы оценки воздействия широко распространенных и возникающих экологических стрессоров, включая воздействие пластмасс на морские организмы. В настоящее время такие методы разрабатываются с целью количественного определения перемещения микропластика в

¹⁷ Andrady, A.L., Microplastics in the marine environment. Marine Pollution Bulletin 62, 1596-1605. Эта публикация упоминается несколько раз в разделе F.

¹⁸ Программа Организации Объединенных Наций по окружающей среде, «Marine plastic debris and microplastics — Global lessons and research to inspire action and guide policy change» («Пластиковый мусор и микропластики в морской среде — глобальные уроки и исследования в поддержку мероприятий и в качестве руководства для изменения политики»). ЮНЕП, Найроби (2016). Эта публикация несколько раз упоминается в разделе F.

морской среде и связанных с ними органических загрязнителей в прибрежных и морских экосистемах и в соответствующих взаимосвязанных пищевых сетях. Некоторые органические загрязнители эффективно осаждаются на пластиковые поверхности из морской воды; этот микропластик и связанные с ними загрязнители создают дополнительную угрозу для морских организмов¹⁹. Ядерные методы позволяют изучать «кинетику сорбции», или то, как органические загрязнители закрепляются на микропластиковых носителях, а также процессы и скорости деградации. При использовании в контролируемых экспериментальных аквариумах эти методы обеспечивают получение количественных данных, позволяющих понять уникальные аспекты биологического воздействия микропластика в морской среде.

228. Присутствующие в морской среде пластиковые материалы представляют собой синтетические органические полимеры, которые обычно недороги в производстве и весьма устойчивы к разрушению. Все пластики в конечном итоге становятся хрупкими и распадаются на более мелкие фрагменты, которые могут подвергаться дальнейшей деградации при постоянном воздействии ультрафиолетового излучения. Наиболее распространенными в океанах полимерами являются полиэтилен высокой и низкой плотности, поливинилхлорид, полистирол, полипропилен и терефталат полиэтилена. В совокупности на эти полимеры приходится более 95% глобального производства пластмасс²⁰. Большинство этих пластмасс, поскольку они были специально разработаны как устойчивые к разрушению, считается «трудноразложимыми» и сохраняется в морской среде в течение 100 лет и более.



РИС. F-2. Поглощение микропластика морской биотой, в том числе мидиями, червями, рыбами и зоопланктоном (как показано на рисунке) все еще недостаточно исследовано. Cole, M. et al. (2013). Microplastic ingestion by zooplankton, Environ. Sci. 2013 47 (12) 6646-6655.

229. Микропластиковые частицы обнаруживаются во многих морских организмах, в том числе в тех видах, от которых мы зависим и которые потребляем в пищу как часть нашей обычной диеты, например, во многих видах моллюсков и рыб. Ввиду малого размера этих пластиковых частиц они могут осаждаться в некоторых внутренних органах, где они могут стать

¹⁹ Law, K.L., Thompson, R.C., Microplastics in the seas. Science 345, 144-145. Эта публикация несколько раз упоминается в разделе F.

²⁰ Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., Galloway, T.S., Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. Marine Pollution Bulletin 62, 2588-2597.

эффективными переносчиками химических загрязняющих веществ²¹. Помимо негативных эффектов, связанных просто с поступлением микропластика через желудочно-кишечный тракт, возможны также вторичные токсические эффекты, возникающие, когда соединенные с микропластиком загрязнители отделяются от него внутри органов и претерпевают последующие биохимические превращения (рис. F-2). Примером негативных биологических воздействий микропластика являются эндокринные нарушения (т.е. изменения экспрессии генов), которые наблюдались у некоторых рыб, случайно заглотнувших пластиковые соединения²². В нашем понимании судьбы и токсичности микропластика и связанных с ним загрязнителей в организме человека все еще имеются значительные пробелы, которые Агентство будет пытаться устранить путем проведения новых исследований.

230. Лабораторные ядерные методы обеспечат получение важной новой информации о взаимодействиях и воздействии широкого спектра пластиковых микрочастиц и связанных с ними токсичных загрязнителей, включая стойкие органические загрязнители (СОЗ) и микроэлементы, такие как ртуть, кадмий и свинец.

231. Радиоизотопы обладают уникальными свойствами, делающими их пригодными для количественного определения перемещения и биологического воздействия микропластика и связанных с ним загрязнителей. Эксперименты, в которых радиоизотопы используются в качестве индикаторов для микропластика, могут быть разработаны с использованием концентраций, присутствующих в окружающей среде, и коммерчески важных морских организмов. Таким образом, меченые радиоизотопами частицы микропластика могут использоваться для отслеживания реалистичных показателей поглощения в организме, включая информацию о процессе деградации микропластика с течением времени. Аналогичным образом эти методы меченых изотопами могут использоваться для количественной оценки происходящих в организме биохимических превращений и биокинетики окончательной очистки.

232. Для получения полной картины могут быть применены дополнительные аналитические методы, такие как масс-спектрометрия конкретных соединений или масс-спектрометрия высокого разрешения с индуктивно связанной плазмой, в которых изотопные сигнатуры загрязняющих частиц используются для отслеживания их источников и путей распространения. Таким образом, применение ядерных и изотопных методов может предоставить уникальную возможность для решения важных нерешенных вопросов о биологическом воздействии микропластика, включая, например, потенциальные последствия для водных организмов на различных этапах их жизненного цикла; оценку последствий для популяций, сообществ и экосистем; понимание кинетики интернализации (например, переноса через стенку кишечника); и улучшенную оценку роли как важных переносчиков при воздействии и биоаккумуляции адсорбированных стойких органических загрязнителей и следов металлов.

233. Информация, полученная в ходе этого нового исследования, улучшит понимание роли микропластика и связанных с ним органических загрязнителей в социально- и коммерчески важных морских организмах и поможет укрепить программы государств-членов в области безопасности/сохранности морепродуктов, которые должны опираться на точный и своевременный мониторинг безвредности продуктов питания.

²¹ Engler, R.E., The Complex Interaction between Marine Debris and Toxic Chemicals in the Ocean. *Environmental Science and Technology* 46, 12302–12315.

²² Lusher, A.L., Hollman, P.C.H., Mendoza-Hill, J.J., Microplastics in fisheries and aquaculture: status of knowledge on their occurrence and implications for aquatic organisms and food safety. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper* 615. Rome.

Г. Производство радиоизотопов и радиационные технологии

Г.1 Альфа-терапия: новые терапевтические применения радиофармацевтических препаратов, содержащих альфа-излучатели

234. Терапевтические радиофармацевтические препараты содержат радиоизотопы, которые испускают обладающие определенной энергией частицы, довольно быстро передающие свою энергию веществу путем столкновений, и это свойство известно как высокая линейная передача энергии (ЛПЭ). Длина пробега частиц корпускулярного излучения и интенсивность передачи энергии частицами веществу зависят от энергии и массы частиц. Длина пробега бета-частиц, по существу представляющих собой электроны, гораздо больше, чем у альфа-частиц такой же энергии. Иными словами, альфа-частицы, которые почти в 7 300 раз тяжелее, чем электроны, передают свою энергию веществу при гораздо меньшем пробеге, чем бета-частицы такой же энергии. Поэтому ЛПЭ альфа-частиц гораздо выше, чем бета-частиц.

235. Терапевтические радиофармпрепараты первого поколения, меченые радиоизотопами, излучающими бета-частицы, например, йодом-131, на протяжении нескольких десятилетий используются для лечения пациентов, страдающих раком и другими заболеваниями. Хотя бета-частицы эффективно уничтожают раковые клетки благодаря большой длине пробега, обычно составляющей в тканях несколько миллиметров, они все же могут повреждать соседние здоровые клетки даже в оптимизированных условиях. В отличие от них альфа-частицы имеют более высокую ЛПЭ и меньшую длину пробега в живой ткани, составляющую, как правило, лишь несколько микрометров. Поэтому они лучше подходят для целенаправленного облучения клеток-мишеней, которые обычно имеют размеры порядка нескольких микрометров. Терапия с использованием альфа-эмиттерных радиофармацевтических препаратов может быть успешным подходом в тех случаях, когда альфа-эмиттерный радиофармацевтический препарат находится вблизи ядра клетки-мишени, которое считается субцеллюлярной мишенью. В этом случае задача состоит в том, чтобы разместить альфа-излучатель достаточно близко к клеткам-мишеням, с тем чтобы добиться желаемого целенаправленного повреждения.

236. В таблице 1 перечислены различные альфа-эмиттерные радионуклиды, которые могут быть использованы в радиофармацевтических препаратах. За последние десятилетия многочисленные усилия по разработке эффективных радиофармацевтических препаратов на основе альфа-излучателей принесли некоторые весьма обнадеживающие результаты.

Таблица G-1. Альфа-эмиттерные радионуклиды и их применения

| Радионуклид | Период полураспада | Получение | Применение |
|-------------|--------------------|--|---|
| Ac-225 | 10 сут. | Цепочка распада U-233 Th-229 (альфа-распад) Ra-226 (p, 2n) | Пептидная радионуклидная терапия |
| Ra-224 | 3,66 сут. | Th-228 (альфа-распад) | Паллиативная терапия у больных, страдающих раком груди и простаты со скелетными метастазами |
| Ra-223 | 11,4 сут. | Цепочка распада Ac-227 Th-227 (альфа-распад) | |
| Bi-213 | 45,6 мин. | Цепочка распада Ac-227 Генератор Ac/Bi | Пептидная радионуклидная терапия |
| Bi-212 | 60 мин. | Цепочка распада Ac-227 Генератор Ra-Bi/Pb | Пептидная радионуклидная терапия |
| At-211 | 7,2 час. | Bi-209 (альфа, 2n) | Радиоиммунотерапия |

G.1.1. Радий-223

237. Хлорид радия-223 является одним из альфа-эмиттерных радиофармацевтических препаратов первого поколения. Это привлекательный альфа-эмиттерный радиофармацевтический препарат, поскольку он имеет простую химическую формулу неорганической молекулы, которую легко получить и понять. В 2013 году хлорид радия-223 был одобрен Управлением по контролю за качеством продуктов питания и медицинских препаратов США для использования в качестве паллиативного средства для устранения костных болей, и с тех пор он коммерчески доступен под названием «Ксофиго». Радий, который по химическим свойствам похож на кальций, весьма эффективно накапливается в костной ткани естественным образом. Хлорид радия-223 обладает отличными характеристиками как терапевтический радиофармпрепарат для паллиативного устранения болей, испытываемых больными со скелетными метастазами. В настоящее время он применяется для лечения пациентов, страдающих раком простаты и яичников с метастазами. Однако ограниченное количество производителей и техническая сложность производства радия-223 привели к его ограниченной доступности, высокой стоимости и малой распространенности в большинстве стран, особенно развивающихся стран.

G.1.2. Генератор актиния-225/висмута-213

238. Опыт работы с хлоридом радия-223 привел к проведению исследований по разработке радиофармацевтических препаратов, которые могут быть использованы для целевого воздействия на опухоли, помимо костных метастаз, с помощью целенаправленно воздействующих молекул, таких как пептиды и антитела. Поиски мультивалентного альфа-излучающего радионуклида, который можно было бы использовать для меченя пептидов/антител, привели к изучению альфа-излучателя висмут-213 с периодом полураспада 45,6 минуты, в качестве «тераностического» (т.е. выполняющего функции диагностики и терапии) радионуклида. Учитывая короткий период полураспада и ограничения в отношении непосредственного производства висмута-213, наилучшим подходом к производству висмута-213 для радиофармацевтического применения в больницах является генератор актиния-225/висмута-213. Существует генератор актиния-225/висмута-213 с высокой удельной активностью, и благодаря благоприятным химическим и физическим свойствам он уже был использован в многочисленных доклинических исследованиях и ряде клинических испытаний. Эта система демонстрирует осуществимость, безопасность и терапевтическую эффективность целенаправленной альфа-терапии, использующей пептиды и иммунные молекулы в качестве целенаправленно воздействующих агентов²³. Методы производства актиния-225 с помощью радионуклидного генератора актиния-225/висмута-213 хорошо освоены в ряде научно-исследовательских институтов. Однако этот генератор все еще не является широкодоступным ввиду ограниченного числа производителей. Имеющееся производство в научно-исследовательских институтах покрывает только ограниченный спрос, связанный с текущими клиническими испытаниями²⁴. Для уточнения фактического рыночного спроса необходимы рыночная оценка и анализ спроса.

G.1.3. Актиний-225

239. Недавно было проведено непосредственное мечение актиния-225, который используется в клинических применениях и продемонстрировал широкие потенциальные возможности в качестве тераностического радиофармпрепарата. Актиний-225, прикрепленный к фрагменту

²³ Morgenstern, A., Bruchertseifer, F., Apostolidis, C., Bismuth-213 and actinium-225 — generator performance and evolving therapeutic applications of two generator-derived alpha-emitting radioisotopes, *Curr Radiopharm.* 5(3) (2012) 221-227.

²⁴ McDevitt, M.R. et al., An ²²⁵Ac/²¹³Bi generator system for therapeutic clinical applications: construction and operation, *Appl Radiat Isot.* 50 (1999) 895–904.

молекулы, нацеленной на уничтожение клеток рака простаты, а именно, простатическому специфическому мембранному антигену (ПСМА), был использован для лечения пациентов, страдающих раком предстательной железы на поздних стадиях. Результаты (показанные на рис. G-1) привлекли к этому радиофармпрепарату интерес во всем мире. Одним из вопросов, связанных с подготовкой и распределением ПСМА с актинием-225, является производство и наличие актиния-225, поскольку все методы его производства имеют определенные недостатки. Для того, чтобы удовлетворить ожидаемый в ближайшем будущем потенциально высокий спрос на актиний-225, все соответствующие вопросы должны быть решены. Ядерные лаборатории Канады сооружают генератор на основе мКи тория-229, который сможет ежегодно производить десятки мКи актиния-225 в год.

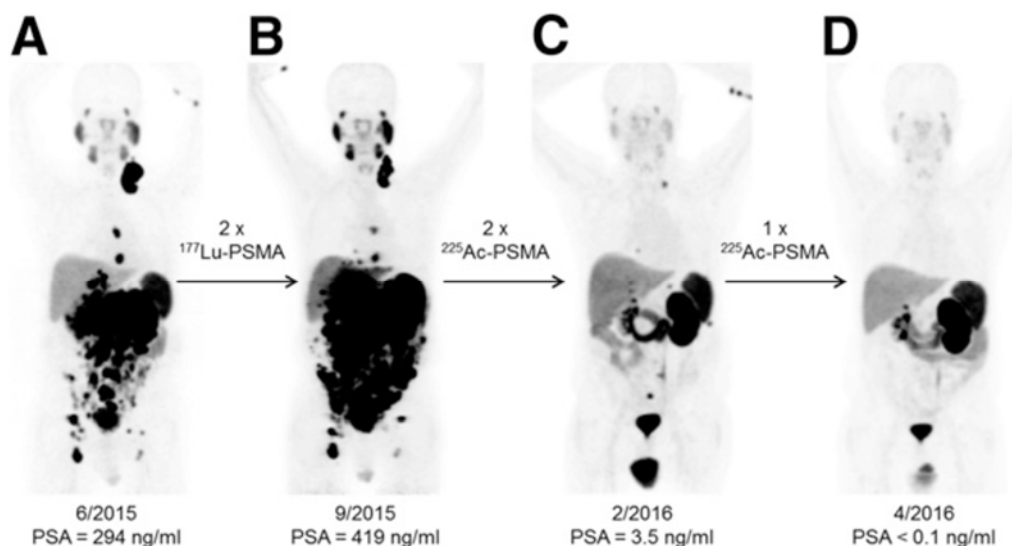


РИС. G-1. Результаты ПЭТ/КТ сканирования пациента, получавшего ^{68}Ga -ПСМА-11, в сравнении с первоначальным распространением опухоли (A); уточнение диагноза после 2 циклов β -излучающего ^{177}Lu -ПСМА-617 показало прогрессирующее развитие (B). В отличие от этого, уточнение диагноза после второго (C) и третьего циклов (D) α -излучающего ^{225}Ac -ПСМА-617 показывает впечатляющую реакцию²⁵.

G.1.4. Астатин-211

240. Еще одним известным альфа-излучателем, свойства которого подходят для использования в радиофармпрепаратах, является астатин-211. Галоидному радионуклиду астатин-211 присущи ограничения в плане производства, связанные с малым числом циклотронов для ускорения альфа-частиц, низким выходом при производстве и низкой эффективностью мечения. Это ограничивало его применение в последнее десятилетие²⁶. До сих пор нет сообщений о клинических испытаниях радиофармацевтических препаратов на основе этого радионуклида. Поэтому сохраняется необходимость решения проблем, связанных с производством и доступностью, а также с облегчением процесса планового производства радиофармпрепаратов²⁷.

241. Недавние успехи в области применения альфа-излучающих радиофармацевтических препаратов вызвали живой интерес к использованию таких молекул при лечении рака. Изучение возможности их стабильного использования во всем мире представляется актуальным и своевременным.

²⁵ Clemens Kratochwil, C. et al., ^{225}Ac -PSMA-617 for PSMA-Targeted α -Radiation Therapy of Metastatic Castration-Resistant Prostate Cancer, J Nucl Med 57 (2016) 1941–1944.

²⁶ Elgqvist, J., Targeted alpha therapy: part I. Curr Radiopharm. 4(3) (2011) 176.

²⁷ IAEA, Report of the Technical Meeting on Alpha emitting radionuclides and radiopharmaceuticals for therapy (2013) http://www-naweb.iaea.org/napc/iachem/working_materials/TM-44815-report-Alpha-Therapy.pdf



IAEA

Международное агентство по атомной энергии

www.iaea.org

Международное агентство по атомной энергии
Vienna International Centre, Box 100
1400 Vienna, Austria
Тел.: (+43-1) 2600-0
Факс: (+43-1) 2600-7
Эл. почта: Official.Mail@iaea.org

GC(62)/INF/2