



Обзор ядерных технологий ■ 2021

Доклад Генерального директора



IAEA

Международное агентство по атомной энергии

Атом для мира и развития

GC(65)/INF/2

Обзор ядерных технологий — 2021

Доклад Генерального директора

GC(65)/INF/2

Отпечатано МАГАТЭ в Австрии
Сентябрь 2021 года
IAEA/NTR/2021

Содержание

Предисловие	5
Резюме	7
А. Ядерная энергетика	11
А.1. Прогнозы развития ядерной энергетики	11
А.2. Эксплуатация атомных электростанций	12
А.3. Новые и расширяющиеся ядерно-энергетические программы	16
А.4. Развитие ядерно-энергетических технологий	20
А.4.1. Усовершенствованные водоохлаждаемые реакторы	20
А.4.2. Реакторы малой и средней мощности и малые модульные реакторы, а также микрореакторы	21
А.4.3. Системы на быстрых нейтронах	25
А.4.4. Неэлектрические применения ядерной энергии	27
А.4.5. Исследования и развитие технологий в области термоядерного синтеза с перспективой применения в энергетике	30
В. Ядерный топливный цикл	33
В.1. Начальная стадия топливного цикла	33
В.2. Конечная стадия топливного цикла	36
С. Вывод из эксплуатации, восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами	37
С.1. Вывод из эксплуатации	37
С.2. Восстановление окружающей среды	40
С.3. Обращение с радиоактивными отходами	42
Д. Исследовательские реакторы и ускорители частиц	46
Д.1. Исследовательские реакторы	46
Д.2. Ускорители частиц и контрольно-измерительные приборы	50
Е. Продовольствие и сельское хозяйство	54
Е.1. Использование изотопного мечения и инновационных ядерных методов для измерения содержания остатков вредных веществ в пищевых продуктах: удовлетворение потребностей в сфере общественного здравоохранения и торговли	54
Ф. Здоровье человека	56
Ф.1. Достижения в области микродозиметрии и нанодозиметрии	56
Г. Радиоизотопы и радиационные технологии	58
Г.1. Роль радиофармацевтических препаратов в обнаружении, диагностике и лечении инфекционных заболеваний	58
Н. Окружающая среда	62
Н.1. Применение ядерных и смежных методов для расширения знаний о голубом углероде в глобальном масштабе и решения проблем, связанных с воздействием изменения климата	62
Приложение	65

Предисловие

- В ответ на просьбы государств-членов Секретариат ежегодно подготавливает всеобъемлющий обзор ядерных технологий.
- В «Обзоре ядерных технологий — 2021» рассматриваются следующие отдельные области: ядерная энергетика, ядерный топливный цикл, вывод из эксплуатации, восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами, исследовательские реакторы и ускорители частиц, ядерные методы в продовольственной и сельскохозяйственной областях, здоровье человека, радиоизотопы и радиационные технологии, а также окружающая среда.
- Проект «Обзора» был представлен Совету управляющих на его сессии в марте 2021 года в документе GOV/2021/2. Окончательный вариант был подготовлен с учетом обсуждения, состоявшегося в Совете управляющих, а также замечаний, поступивших от государств-членов.

Резюме

1. Прогнозы Агентства от 2020 года в целом согласуются с таковыми от предыдущего года. Согласно оптимистической оценке, к 2050 году ожидается рост мирового производства электроэнергии на атомных станциях на 82%, то есть до 715 гигаватт (электрической мощности) (ГВт (эл.)), что составит 11% от общего мирового производства электроэнергии (в 2019 году — 10%). В соответствии с пессимистической оценкой прогнозируется снижение на 7% до 363 ГВт (эл.), что составит 6% от общего мирового производства электроэнергии.
2. К концу 2020 года общая мощность мировой ядерной энергетики составила 392,6 ГВт (эл.), которые вырабатывают 442 действующих ядерных энергетических реактора, расположенных в 32 странах. Приняв эффективные меры, ядерный сектор адаптировался к национальным руководящим указаниям в отношении пандемии коронавирусной инфекции (COVID-19). На раннем этапе пандемии в начале 2020 года Агентство создало сеть «Опыт эксплуатации АЭС в условиях пандемии COVID-19», предназначенную для обмена информацией о мерах, принимаемых для борьбы с пандемией и смягчения ее негативных последствий для эксплуатации атомных электростанций (АЭС). Ни одна из 32 стран, эксплуатирующих атомные электростанции, не сообщала о вызванных пандемией эксплуатационных событиях, повлиявших на безопасность и надежность эксплуатации АЭС.
3. Ядерная энергетика, будучи чистым, надежным, устойчивым и современным источником энергии, вносит значительный вклад в сокращение выбросов парниковых газов во всем мире, удовлетворяя растущие мировые потребности в энергии, поддерживая устойчивое развитие и восстановление после пандемии COVID-19. В 2020 году ядерная энергетика произвела 2553,2 тераватт-часов электроэнергии, не связанной с выбросами парниковых газов, что составило примерно треть от мирового производства низкоуглеродной электроэнергии. Широко признано, что для решения задач перехода к экологически чистой энергетике значительную роль должна играть ядерная энергетика.
4. Приблизительно 5,5 ГВт (эл.) подключенных к сетям новых ядерных мощностей приходится на пять новых реакторов с водой под давлением в Беларуси, Китае, Объединенных Арабских Эмиратах и Российской Федерации. С пуском первого энергоблока Белорусской АЭС в Беларуси и первого энергоблока АЭС «Барака» в ОАЭ началась реализация ядерно-энергетических программ в этих двух странах.
5. Был достигнут заметный прогресс в ведущейся во всем мире деятельности по разработке технологий реакторов малой и средней мощности и модульных реакторов (PMCM/MMP) для внедрения в ближайшем будущем. В Российской Федерации был введен в коммерческую эксплуатацию первый в мире усовершенствованный MMP и единственная в мире плавучая АЭС «Академик Ломоносов». На данный момент в мире разрабатывается более 70 конструкций MMP основных типов для различных применений.
6. Во всем мире, особенно в Северной Америке и Европе, растет число ядерных энергетических реакторов, охваченных программами долгосрочной эксплуатации и управления старением. В Соединенных Штатах Америки были продлены лицензии на эксплуатацию второго и третьего ядерных энергоблоков АЭС «Пич-Боттом», благодаря чему срок их безопасной и надежной эксплуатации вырос с 60 до 80 лет.

7. В общей сложности на разных этапах подготовки своей национальной инфраструктуры к реализации новой ядерно-энергетической программы находились 27 государств-членов: ожидается, что к 2035 году ядерную энергетику внедрят у себя 10–12 стран-новичков, в результате чего общемировая генерирующая мощность вырастет, согласно оценкам, на 26 ГВт (эл.).

8. Сообщество, занимающееся вопросами термоядерного синтеза, отметило начало сборки и подключения ИТЭР после более чем десяти лет сложного строительства. Эксплуатация ИТЭР позволит создать научную и технологическую основу для разработки и проектирования будущих термоядерных энергетических реакторов.

9. По причинам, обусловленным глобальной пандемией COVID-19, несколько крупных производителей урана приостановили работу либо существенно снизили объемы производства. В 2020 году общий объем поставок первичного урана снизился, в связи с чем возросла значимость вторичного урана для удовлетворения потребностей в ядерном топливе.

10. Во время пандемии COVID-19 для того, чтобы свести последствия связанных с ней ограничений к минимуму, исследовательские реакторы, которые производят медицинские радиоизотопы, поставляемые по всему миру, были признаны оказывающими важнейшие услуги.

11. Несмотря на наличие значительного и растущего интереса к ММП, ожидается, что в ближайшие три десятилетия рост мощностей будет происходить в основном за счет усовершенствованных водоохлаждаемых реакторов большой мощности. Для достижения оптимистического прогноза Агентства до 2050 года потребуется ежегодно подключать к электросети 16 ГВт (эл.) мощностей или более, однако для этого будет необходимо решить ряд проблем, затрудняющих строительство новых АЭС, в частности, сократить затраты и повысить уровень стандартизации для достижения большей конкурентоспособности, а также обеспечить доступ к финансированию на тех же условиях, что и для других поставщиков низкоуглеродной энергии.

12. В ядерно-энергетическом секторе продолжает расти использование ядерной энергии для целей, не связанных с производством электроэнергии, что обусловлено увеличением доли возобновляемых источников энергии с переменным характером генерации, подключаемых к электросети. В целях, не связанных с производством электроэнергии, использовался 64 действующих ядерных энергетических реактора: было произведено 3396,4 гигаватт-часа тепловой мощности в электрическом эквиваленте. При этом 56 реакторов обеспечивали централизованное теплоснабжение и производили технологическое тепло для промышленных целей и 8 обеспечивали опреснение морской воды. Помимо декарбонизации конечного потребления, например, в таких секторах, как транспорт, промышленность и ЖКХ, ядерная когенерация все чаще рассматривалась как аргумент экономического характера против досрочного вывода из эксплуатации некоторых убыточных АЭС. Ожидалось, что интерес к производству водорода с использованием ядерной энергии от низкотемпературных водоохлаждаемых реакторов со временем позволит наладить такое производство на коммерческой основе.

13. Были достигнуты крупные успехи в создании пунктов глубокого геологического захоронения высокоактивных отходов и отработавшего топлива, заявленного как отходы. Управление по радиационной и ядерной безопасности Финляндии объявило, что в середине 2020-х годов Финляндия намерена приступить к окончательному захоронению отработавшего ядерного топлива. В Швеции муниципальный совет Эстхаммара проголосовал за строительство планируемого хранилища отработавшего ядерного топлива в Форсмарке.

14. В прошлые десятилетия собственники установок в качестве стратегии вывода из эксплуатации в основном выбирали отсроченный демонтаж, однако сейчас все большее распространение получает подход, предполагающий немедленный демонтаж. Окончательный демонтаж выведенных из эксплуатации станций начинается все раньше, что обусловлено желанием уменьшить неопределенность в отношении расходов на вывод из эксплуатации.

15. Во всем мире продолжился рост интереса к исследовательским реакторам. Многие страны пользовались возможностями, позволяющими получить доступ к существующим исследовательским реакторам, в том числе по линии региональных курсов Агентства по исследовательским реакторам для создания потенциала, а также в рамках концепции международного центра МАГАТЭ на базе исследовательского реактора (ИСЕРР). В 2020 году соответствующий статус был присвоен Институту ядерных исследований в Питешти, Румыния, а французский Комиссариат по атомной энергии и альтернативным источникам энергии получил статус ИСЕРР повторно на пять лет.

16. В процессе производства продовольствия для профилактики и борьбы с вредителями и болезнями животных и растений используются различные химические вещества, такие как ветеринарные препараты и пестициды. Присутствие в пище остатков этих химических веществ может представлять угрозу для здоровья населения и для торговли, в связи с чем регулирующими органами предписывается наибольшая разрешенная концентрация остатков в пище или на ее поверхности. Ведущая роль отводится меченым радиоизотопами соединений, которые позволяют отслеживать и изучать все остаточные химические вещества в различных тканях. Соответствующие исследования крайне важны для определения допустимых норм. С ростом производства новых лекарственных препаратов и химических веществ увеличивается потребность в их регулировании с помощью инновационных экономичных аналитических методов.

17. Микродозиметрия — это специализированное направление в радиационной физике, которое занимается системным изучением пространственного распределения поглощаемой энергии в микроскопических структурах облучаемого вещества. Хотя как отдельное направление микродозиметрия появилась более 60 лет назад, она все еще вызывает научный интерес у специалистов в области радиационной медицины, радиационной защиты, радиационной биологии и в других областях, таких как космические исследования. В области радиационной медицины микродозиметрия особенно актуальна для ионно-пучковой терапии — передового метода, который предполагает использование для лечения некоторых видов опухолей пучков протонов и ионов углерода, чтобы минимизировать повреждение здоровых тканей.

18. Инфекционные заболевания представляют угрозу человечеству. В рамках научных дисциплин предпринимаются усилия для улучшения понимания таких заболеваний с помощью передовых технологий с использованием радиофармацевтических препаратов. Новые радиофармпрепараты, изготовленные с использованием воздействующих на конкретные микроорганизмы моноклональных антител, достигли этапа, когда становится возможной неинвазивная визуализация клеточных и биохимических процессов, позволяющая усовершенствовать схемы диагностики и потенциального лечения инфекционных заболеваний.

19. Глобальному потеплению способствует наблюдаемое с конца XIX века резкое увеличение концентрации в атмосфере парниковых газов, таких как двуокись углерода, метан и закись азота. Океан и растительные прибрежные экосистемы обладают значительным потенциалом секвестрации органического углерода, поскольку они могут захватывать и удерживать атмосферный углекислый газ, тем самым снижая темпы глобального потепления. Захватываемый и удерживаемый океаном органический углерод называется «голубым углеродом». Ядерные и смежные методы вносят важный вклад в оценку роли карбонатов и

макроводорослей в рамках цикла голубого углерода, определение происхождения углерода, понимание факторов, влияющих на секвестрацию в экосистемах — резервуарах голубого углерода, и их соответствующего углеродного баланса, а также принятие управленческих мер для содействия осуществлению стратегий в области голубого углерода.

А. Ядерная энергетика

А.1. Прогнозы развития ядерной энергетики

Текущее состояние

1. Прогнозы Агентства от 2020 года¹ в целом согласуются с таковыми от предыдущего года. Согласно пессимистической оценке, к 2050 году мировое производство электроэнергии на атомных станциях снизится на 7% до 363 ГВт (эл.)² и составит 6% от общего мирового производства электроэнергии (в 2019 году — 10%). Согласно оптимистической оценке, ожидается рост на 82%, то есть до 715 ГВт (эл.), что составит 11% от общего мирового производства электроэнергии.

Пессимистический прогноз

7% ↓

снижение с сегодняшней
установленной мощности,
составляющей **392** ГВт (эл.),
до приблизительно
363 ГВт (эл.),

что соответствует **6%** от
общего производства электроэнергии

Оптимистический прогноз

82% ↑

рост с сегодняшней
установленной мощности,
составляющей **392** ГВт (эл.),
до приблизительно
715 ГВт (эл.),

что соответствует **11%** от
общего производства электроэнергии

2. Для реализации оптимистического прогноза необходимы как дальнейшая долгосрочная эксплуатация нынешнего парка ядерных энергетических реакторов, как правило, в течение более чем 40 лет, так и значительные усилия, направленные на строительство в течение трех десятилетий новых мощностей в объеме порядка 500 ГВт (эл.). Это потребует подключения к сетям до 2050 года более 16 ГВт (эл.) новых мощностей ежегодно, что почти втрое больше, чем в среднем подключалось в период 2010–2019 годов. При всей амбициозности этого ориентира он составляет лишь половину от рекордного значения в более чем 30 ГВт (эл.) ежегодно, достигнутого в середине 1980-х годов.

¹ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, Reference Data Series No. 1, IAEA, Vienna (2020).

² ГВт (эл.), или гигаватт (электрической мощности), равен одному миллиарду ватт электрической мощности.

Тенденции

3. Наблюдается значительный и растущий интерес к реакторам малой и средней мощности и модульным реакторам (РМСМ/ММР), особенно в отдаленных местах и в странах с небольшими электросетями. В то же время ожидается, что в ближайшие три десятилетия рост мощностей будет происходить в основном за счет усовершенствованных водоохлаждаемых реакторов большой мощности, что позволит быстро нарастить мощности для производства низкоуглеродной энергии в рамках борьбы с изменением климата. В этой связи в ядерной отрасли необходимо решить ряд проблем, в частности, сократить затраты и повысить уровень стандартизации для достижения большей конкурентоспособности, а также обеспечить доступ к финансированию на тех же условиях, что и для других поставщиков низкоуглеродной энергии.

4. Необходима мощная политическая поддержка идеи о том, что ядерная энергетика представляет собой надежный и устойчивый низкоуглеродный источник энергии³. Расширение возможностей, позволяющих использовать ядерную энергию для декарбонизации других энергетических секторов, в том числе путем производства «чистого» водорода, также может сделать ядерную энергетiku более привлекательной для инвесторов.

А.2. Эксплуатация атомных электростанций

Текущее состояние

5. К концу 2020 года общая мощность мировой ядерной энергетике составила 392,6 ГВт (эл.)⁴, которые вырабатывают 442 действующих ядерных энергетических реактора, расположенных в 32 странах (таблица А-1 в приложении). Страны продемонстрировали способность адаптироваться к пандемии коронавирусной инфекции (COVID-19), приняв эффективные меры, продемонстрировавшие высокий уровень организационной культуры. На раннем этапе пандемии в начале 2020 года Агентство создало сеть «Опыт эксплуатации АЭС в условиях пандемии COVID-19» (COVID-19 NPP OPEX), предназначенную для обмена информацией о мерах, принимаемых для борьбы с пандемией и смягчения ее негативных последствий для эксплуатации атомных электростанций (АЭС). Ни одна из 32 стран, эксплуатирующих атомные электростанции, не сообщила о вызванных пандемией эксплуатационных событиях, повлиявших на безопасность и надежность эксплуатации АЭС.

³ Благодаря ядерной энергетике в атмосферу ежегодно не выбрасывается приблизительно две гигатонны углекислого газа.

⁴ Все данные, касающиеся ядерных энергетических реакторов, указаны согласно записям в Информационной системе МАГАТЭ по энергетическим реакторам (ПРИС) по состоянию на 1 июня 2021 года.

Ядерная энергетика помогает государствам-членам сократить выбросы парниковых газов

Ядерная энергетика обеспечивает производство в **32** странах

~1/3 мирового объема низкоуглеродной электроэнергии

Ядерная энергетика позволяет сократить выбросы углекислого газа на **~2** гигатонны в год.

Это эквивалентно выхлопам от более чем **400** миллионов автомобилей ежегодно.

За последние 50 с лишним лет ядерная энергетика позволила не допустить выбросов **55** гигатонн углекислого газа.

6. Ядерная энергетика, будучи чистым, надежным, устойчивым и современным источником энергии, вносит значительный вклад в сокращение выбросов парниковых газов во всем мире, удовлетворяя растущие мировые потребности в энергии, поддерживая устойчивое развитие и восстановление после пандемии COVID-19. В 2020 году ядерная энергетика произвела 2553,2 тераватт-часов электроэнергии, не связанной с выбросами ПГ, что составило приблизительно 10% общемировой электрогенерации и примерно треть мирового производства низкоуглеродной электроэнергии.

7. Приблизительно 5,5 ГВт (эл.) подключенных к сетям новых ядерных мощностей приходится на пять новых реакторов с водой под давлением (PWR): 1110 МВт (эл.) — первый энергоблок Белорусской АЭС в Беларуси; 1000 МВт (эл.) — пятый энергоблок АЭС «Тяньвань» и 1000 МВт (эл.) — пятый энергоблок АЭС «Фуцин» в Китае; 1066 МВт (эл.) — второй энергоблок Ленинградской АЭС-2 в Российской Федерации; 1345 МВт (эл.) — первый энергоблок АЭС «Барака» в Объединенных Арабских Эмиратах. С пуском первого энергоблока Белорусской АЭС в Беларуси и первого энергоблока АЭС «Барака» в Объединенных Арабских Эмиратах началась реализация ядерно-энергетических программ в этих двух странах.

Подключения к сетям в 2020 году

Первый энергоблок

АЭС «Барака»



1345 МВт (эл.)

Первый энергоблок

Белорусской АЭС



1110 МВт (эл.)

Второй энергоблок

Ленинградской АЭС-2



1066 МВт (эл.)

Пятый энергоблок

АЭС «Фуцин»



1000 МВт (эл.)

Пятый энергоблок

АЭС «Тяньвань»



1000 МВт (эл.)

Первый энергоблок Белорусской АЭС



Тип
PWR

Модель
ВВЭР В-491

Полезная мощность
1110 МВт (эл.)

Начало строительства
8 нояб. 2013 г.

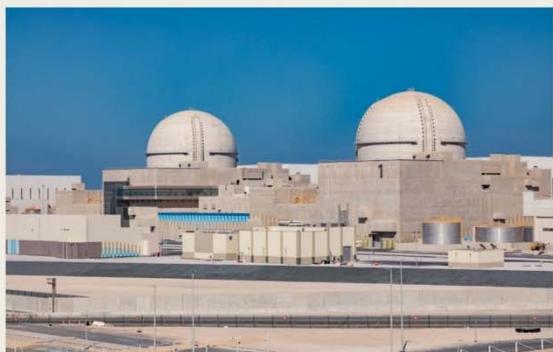
Первая критичность
11 окт. 2020 г.

Первое подключение к сети
3 нояб. 2020 г.

Миссии ИНИР
этапов 1 и 2
2012 год

Миссия ИНИР
этапа 3
2020 год

Первый энергоблок АЭС «Барака»



Тип
PWR

Модель
APR-1400

Полезная мощность
1345 МВт (эл.)

Начало строительства
19 июля 2012 г.

Первая критичность
31 июля 2020 г.

Первое подключение к сети
19 авг. 2020 г.

Миссии ИНИР
этапа 2
2011 год

Миссия ИНИР
этапа 3
2018 год

8. В 2020 году был введен в коммерческую эксплуатацию первый в мире усовершенствованный ММП и единственная в мире плавучая АЭС «Академик Ломоносов». Эта АЭС расположена у арктического побережья России и имеет в своем составе два малых модульных энергоблока КЛТ-40С мощностью 35 МВт (эл.) каждый.

9. Приблизительно 89,5% действующих мощностей ядерной энергетики приходится на реакторы с легководным замедлителем и теплоносителем, 6% — на реакторы с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем, 2% — на легководные реакторы с графитовым замедлителем и оставшиеся 2% — на газоохлаждаемые реакторы. Остальные 0,5% приходятся на три быстрых реактора с жидкометаллическим теплоносителем.

10. Во всем мире, особенно в Северной Америке и Европе, растет число ядерных энергетических реакторов, охваченных программами ДСЭ и управления старением. В Соединенных Штатах Америки были продлены лицензии на эксплуатацию второго и третьего ядерных энергоблоков АЭС «Пич-Боттом», благодаря чему срок их безопасной и надежной эксплуатации вырос с 60 до 80 лет.

11. Несмотря на проблемы, связанные с пандемией COVID-19, проекты капитального ремонта и глубокой модернизации продолжали осуществляться. Например, в течение этого периода были завершены капитальный ремонт второго энергоблока АЭС «Дарлингтон» в Канаде и модернизация системы управления и аварийной системы первого и второго энергоблоков АЭС «Дул» в Бельгии. В Соединенных Штатах Америки первый энергоблок АЭС «Гранд-Галф» был вновь подключен к сети после планового отключения для перегрузки, технического обслуживания и ремонта, в процессе которых было установлено новое оборудование и модернизирована система регулирования турбин.

12. В течение года были выведены из эксплуатации 5,2 ГВт (эл.) ядерных мощностей, при этом были окончательно остановлены шесть ядерных энергетических реакторов: реакторы с водой под давлением первого и второго энергоблоков АЭС «Фессенхайм» мощностью 880 МВт (эл.) каждый во Франции; легководный реактор с графитовым замедлителем второго энергоблока Ленинградской АЭС мощностью 925 МВт (эл.) в Российской Федерации; кипящий реактор на АЭС «Дуэйн-Арнольд» мощностью 601 МВт (эл.) и реактор с водой под давлением второго энергоблока АЭС «Индиан-Пойнт» мощностью 998 МВт (эл.) в Соединенных Штатах Америки. В Швеции в последний день 2020 года был остановлен первый энергоблок АЭС «Рингхальс» (BWR мощностью 881 МВт (эл)), прослуживший более 46 лет.

Совокупный мировой опыт эксплуатации ядерных реакторов

18 772 реакторо-года

с суммарной
мощностью

479,9 ГВт (эл.)



634
реактора



35
стран,
когда-либо
эксплуатировавших АЭС

Тенденции

13. В прошедшее десятилетие суммарный объем мощностей ядерной энергетики демонстрировал тенденцию к плавному росту. За счет появления новых реакторов и модернизации существующих было добавлено приблизительно 23,7 ГВт (эл.) новых мощностей. Производство электроэнергии на АЭС постоянно росло и в период с 2011 года увеличилось более чем на 6%.

14. Для перехода на низкоуглеродную электроэнергетику и сокращения до нуля выбросов углекислого газа чрезвычайно важны программы ДСЭ, которые также позволяют выиграть время для строительства новых низкоуглеродных генерирующих мощностей, включая новые АЭС. Более того, существующие АЭС являются самым дешевым источником безопасной и надежной низкоуглеродной электроэнергии. Однако в последнее десятилетие некоторые реакторы были остановлены, а другие, вероятно, будут закрыты в ближайшем будущем по экономическим причинам, несмотря на то, что их операторы получили лицензии на эксплуатацию за пределами первоначального срока службы. Эти тенденции особенно характерны для Соединенных Штатов Америки, где за прошедшее десятилетие по экономическим причинам были остановлены около 10 реакторов, не выдержавших конкуренции с дешевым сланцевым газом и субсидируемыми возобновляемыми источниками энергии. В некоторых регионах страны были введены экономические механизмы (такие как программа вознаграждения за отсутствие выбросов), направленные на поддержку ядерной энергетики, вносящей вклад в декарбонизацию энергетической отрасли, и на содействие дальнейшей эксплуатации существующих АЭС. В других регионах мира надлежащие политические решения могут стать решающим фактором, обеспечивающим долгосрочную эксплуатацию имеющихся реакторов.

15. Помимо этого, сохраняются неопределенности, связанные с цепями поставок, обеспечивающими работу ядерной энергетики. Закрытие отраслей, представлявших несущественными в краткосрочном периоде, повлечет за собой пока не ясные последствия в отношении среднесрочной и долгосрочной стабильности снабжения ядерных реакторов во всем мире. Существующие цепи поставок сталкиваются с проблемами, которые могут негативно повлиять на текущую эксплуатацию, реализацию проектов и планирование отключений. Тем не менее в странах, приступающих к развитию ядерной энергетики, возникают новые цепи поставок, что может способствовать появлению в отрасли новых действующих сил.

А.3. Новые и расширяющиеся ядерно-энергетические программы

Текущее состояние

16. В последние годы установленная мощность строящихся ядерных энергетических объектов оставалась практически неизменной, при этом в 2020 году было отмечено снижение темпов нового строительства. В азиатском регионе продолжается устойчивое наращивание ядерных мощностей: в период с 2005 года в регионе были подключены к сетям в общей сложности 58,5 ГВт (эл.) новых мощностей на базе 64 новых реакторов.

17. Среди 32 стран, использующих ядерную энергетику, 19 реализуют проекты по расширению мощностей, включая Беларусь и Объединенные Арабские Эмираты, которые в 2020 году подключили к сетям свои первые ядерные энергетические реакторы. В совокупности эти проекты имеют мощность 54,4 ГВт (эл.) на базе 52 новых реакторов.

Реакторные проекты в рамках существующих ядерно-энергетических программ

54,4 ГВт (эл.)  **52**
от **52**
НОВЫХ реакторов

включая новое строительство:

 АЭС «Чжанчжоу»
энергоблок №2 **1126** МВт (эл.)

 АЭС «Тайпинлин»
энергоблок №2 **1116** МВт (эл.)

 АЭС «Санаоцунь»
энергоблок №1 **1117** МВт (эл.)

18. Ограничение поездок и закрытие границ, вызванные пандемией COVID-19, затруднили участие подрядчиков в новых строительных проектах. Это привело к более широкому распространению практики дистанционных и гибридных проверок. Во время пандемии некоторые национальные регулирующие органы применяли инновационные подходы или проводили инспекции для целей регулирования в объемах, соответствующих их значимости с точки зрения безопасности.

19. Среди 50 государств-членов, выразивших заинтересованность в использовании ядерной энергетики, 23 находятся на этапе подготовки к принятию решения и проводят мероприятия по энергетическому планированию. Остальные 27 государств занимаются разработкой ядерно-энергетической программы:

- 17 государств находятся на этапе принятия решения, то есть рассматривают возможность внедрения ядерной энергетики; в эту группу также входят страны, не принявшие решение, но активно создающие необходимую инфраструктуру (Алжир, Боливия, Замбия, Индонезия, Казахстан, Марокко, Нигер, Сальвадор, Сенегал, Судан, Таиланд, Тунис, Уганда, Филиппины, Чили, Шри-Ланка, Эфиопия).
- 10 государств находятся на этапе после принятия решения, то есть приняли решение и создают необходимую инфраструктуру или подписали договор на строительство АЭС и готовятся к строительству либо уже приступили к нему (Бангладеш, Гана, Египет, Иордания, Кения, Нигерия, Польша, Саудовская Аравия, Турция, Узбекистан).

27 стран-новичков

17

на этапе принятия решения

Страны, рассматривающие возможность внедрения ядерной энергетики, но не принявшие окончательного решения



10

на этапе после принятия решения

Страны, которые либо приняли решение и создают инфраструктуру, либо подписали контракт и готовятся к строительству или приступили к нему



20. В соответствии с текущими планами, имеющимися у 27 указанных выше государств-членов, ожидается, что к 2035 году 10–12 из них будут обладать ядерно-энергетическим потенциалом, в результате чего количество государств-членов, использующих ядерную энергетику (на сегодняшний день таких государств 32), увеличится примерно на 30%. Согласно оценкам, созданные этими странами-новичками к 2035 году дополнительные генерирующие мощности составят приблизительно 26 ГВт (эл.).

Согласно текущим планам **27** государств-членов
ожидается, что
10-12 государств внедрят у себя
ядерную энергетику
к **2035** году,
пополнив группу из **32** государств-членов, обладающих ядерно-
энергетическим потенциалом, примерно на **30%**

По оценкам, созданные этими новыми странами
дополнительные генерирующие мощности составят **26 ГВт (эл.)**.
приблизительно

21. В 2020 году в связи с ограничениями, вызванными пандемией COVID-19, была проведена только одна миссия по комплексной оценке ядерной инфраструктуры (ИНИР) — в Беларуси (миссия третьего этапа). Другие запланированные миссии были перенесены на 2021 год по просьбе правительств соответствующих стран: Кении (повторная миссия по этапу 1), Шри-Ланки (этап 1), Уганды (этап 1) и Узбекистана (этап 2). Помимо этого, 15 государств-членов осуществляли комплексные планы работы (КПР). Некоторые государства-члены смогли пройти ежегодную оценку КПР до введения связанных пандемией COVID-19 ограничений на передвижения, тогда как оставшиеся проходили оценку КПР в электронном формате.

22. В Бангладеш было поставлено основное оборудование для АЭС «Руппур», в начале 2020 года был изготовлен и прошел испытания корпус реактора. Ввод в эксплуатацию намечен на 2023 год. В Турции в 2020 году продолжилось строительство двух энергоблоков АЭС «Аккую». Производителем был отгружен корпус реактора для первого энергоблока, на объект были доставлены четыре парогенератора. Ввод в эксплуатацию первого энергоблока ожидается в 2023 году. В Египте выдана лицензия на площадку для строительства четырехблочной АЭС в Эд-Дабаа и продолжается подготовка площадки. Ожидается, что в случае получения разрешения от регулирующего органа строительство первого энергоблока будет начато во второй половине 2021 года.

23. В Саудовской Аравии в конце 2021 года ожидается начало тендера на строительство первых двух крупных АЭС мощностью 1000–1600 МВт (эл.). Предполагается, что поставщик ядерных технологий будет выбран в 2024 году, а ввод в эксплуатацию первого энергоблока запланирован на 2036 год.

24. В Польше было принято решение о строительстве АЭС с общей установленной мощностью 6,0–9,0 ГВт (эл.) на базе реакторов с водой под давлением большой мощности. Начало строительства первой польской АЭС запланировано на 2026 год, а ее ввод в эксплуатацию — на 2033 год.

25. Иордания реализует свою ядерно-энергетическую программу двумя параллельными путями: путем использования ММР и путем строительства крупной АЭС (мощностью 1000 МВт (эл.), по принципу «строительство–эксплуатация–передача / строительство–владение–эксплуатация–передача»), уделяя первоочередное внимание первому пути. Первая заливка бетона ожидается в 2026 году, а начало коммерческой эксплуатации запланировано на 2031 год.

26. В Узбекистане планируется до конца 2022 года начать строительство АЭС с общей установленной мощностью 2,400 ГВт (эл.). Гана планирует начать строительство своей первой АЭС в 2023 году и ввести ее в эксплуатацию в 2029 году. В Кении была создана новая организация, Агентство по ядерной энергетике и энергии, и выпущен доклад о стратегической экологической оценке, по материалам которого будут проводиться общественные слушания. Страна собирается запустить собственную АЭС к 2035 году. На Филиппинах в июле 2020 года вышло постановление о создании Межучрежденческого комитета по ядерно-энергетической программе, который займется изучением возможности внедрения ядерной энергетики в стране. Правительство Шри-Ланки официально пригласило в страну миссию ИНИР.

Тенденции

27. При строительстве новых АЭС в странах, уже использующих ядерную энергетику или приступающих к ее развитию, возникают две проблемы экономического характера: конкуренция со стороны альтернативной энергетики и необходимость в инвестициях.

28. При относительно небольшом количестве построенных за последнее десятилетие новых АЭС ядерная отрасль до сих пор не имела возможности сколь-либо существенно снизить свои затраты — в отличие от альтернативной энергетики, внедрение которой облегчается благодаря значительной политической и финансовой поддержке. Данная ситуация стала причиной снижения конкурентоспособности ядерной энергетики с точки зрения приведенной стоимости. Тем не менее становится все более очевидным, что стоимость технологий должна также включать в себя стоимость их интеграции в будущие системы электроснабжения, в том числе затраты, связанные с электросетями, а также затраты на резервные источники электроэнергии или ее аккумуляцию. На системном уровне ядерная энергетика может быть конкурентоспособной по сравнению с возобновляемыми источниками и аккумуляцией. Помимо этого, в ядерной отрасли имеются возможности для снижения стоимости строительства путем упрощения конструкции, увеличения стандартизации, улучшения надзора за системой поставок, а также максимального использования опыта, полученного в ходе реализации инновационных проектов.

29. Вторая проблема касается финансирования. Строительство новых АЭС по природе своей является капиталоемким процессом, и немногие энергопредприятия имеют возможность финансировать такие проекты из собственных средств. Использование мер политической поддержки открывает множество путей к увеличению надежности финансирования за счет снижения рисков для организаторов проектов в процессе строительства и эксплуатации с целью обеспечения гарантированных доходов в условиях рыночной нестабильности — например, путем заключения соглашений о закупке электроэнергии (СЗЭ). (В рамках СЗЭ покупатель обязуется приобрести указанный объем электроэнергии по фиксированной цене, покрывающей полную стоимость проекта и обеспечивающей желаемую прибыль, в противном случае выплачивается неустойка.)

30. Несколько стран-новичков, в том числе Гана, Иордания, Кения, Саудовская Аравия, Судан и Эстония, включили проекты ММР в свои оценки технологий. ММР могут иметь ряд преимуществ по сравнению с реакторами большой мощности, в частности, меньшие начальные капитальные затраты, совместимость с небольшими электросетями и возможность добавления новых модулей. Успешное внедрение ММР в течение следующего десятилетия может побудить большее число стран-новичков обратить внимание на данную технологию.

А.4. Развитие ядерно-энергетических технологий

А.4.1. Усовершенствованные водоохлаждаемые реакторы

Текущее состояние

31. Водоохлаждаемые реакторы играют значительную роль в коммерческой ядерной отрасли с момента ее создания. Подавляющее большинство строящихся в настоящий момент в мире ядерных реакторов являются реакторами, охлаждаемыми легкой водой.

32. Некоторые страны также все более активно рассматривают, изучают и строят усовершенствованные водоохлаждаемые реакторы в целях постепенного внедрения более эффективных усовершенствованных топливных циклов, частично или полностью замкнутых. Несколько государств-членов ведут научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) в области сверхкритических водоохлаждаемых реакторов (SCWR). Завершено концептуальное проектирование канадского SCWR — канального реактора с тяжеловодным замедлителем, а также китайского реактора CSR1000. В Европе была разработана концепция высокоэффективного легководного реактора (HPLWR), а также в сотрудничестве с Китаем было запланировано, разработано и проанализировано внутриреакторное устройство для аттестации топлива. В Российской Федерации продолжаются концептуальные исследования по инновационному водо-водяному энергетическому реактору (ВВЭР) со сверхкритическими параметрами водного теплоносителя, включая возможность использования активной зоны на быстрых нейтронах.

Тенденции

33. Большинство усовершенствованных водоохлаждаемых реакторов имеют повышенную выходную мощность, у недавно построенных она находится в пределах 1000–1700 МВт (эл.). В настоящее время ведется разработка еще более мощных моделей. Наблюдается отчетливая тенденция к размещению на одной площадке нескольких энергоблоков с реакторами одного или нескольких типов, что свидетельствует о стремлении к экономии за счет масштабирования. В странах-новичках, рассматривающих возможности строительства АЭС, планируют начинать именно с использования усовершенствованных водоохлаждаемых реакторов.

А.4.2. Реакторы малой и средней мощности и малые модульные реакторы, а также микрореакторы

Текущее состояние

34. К концу 2020 года по меньшей мере 16 государств-членов реализовывали национальные программы в области ММР, преимущественно в рамках международного сотрудничества. Во всем мире был достигнут ощутимый прогресс в сфере разработки ММР с целью их внедрения в ближайшем будущем. Были решены основные задачи, связанные с использованием данной технологии⁵.

35. В Российской Федерации плавучая АЭС «Академик Ломоносов» с двумя энергоблоками КЛТ-40С была введена в коммерческую эксплуатацию в мае 2020 года, через полгода после подключения к сети. На данный момент в мире разрабатывается более 70 конструкций ММР основных типов для различных применений. В Китае высокотемпературный модульный реактор с шаровыми твэлами (HTR-PM) (рис. А-1), имеющий два реакторных модуля общей мощностью 210 МВт (эл.), соединенных с системой паровых турбогенераторов, проходит функциональные испытания в рамках работ по вводу в эксплуатацию. Начало эксплуатации запланировано на 2021 год. В Аргентине полным ходом идет строительство прототипа реактора CAREM (рис. А-2). Загрузка топлива и ввод в эксплуатацию запланированы к четвертому кварталу 2024 году. Полная мощность реактора составит 100 МВт (тепл.) и 30 МВт (эл.). Это интегральный ММР с водой под давлением, рассчитанный на работу в режиме естественной циркуляции и оснащенный пассивными средствами безопасности. В проекте использовались местные технологии, при этом не менее 70% компонентов и связанных с ними услуг поставлялись аргентинскими компаниями.

⁵ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments*, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), IAEA, Vienna (2020).



РИС. А-1. В Китае высокотемпературный модульный реактор с шаровыми твэлами проходит «горячие» функциональные испытания системы в рамках работ по вводу в эксплуатацию. Начало коммерческой эксплуатации запланировано на 2022 год. (Фото: Институт ядерно-энергетических и новых энергетических технологий, Университет Цинхуа, Китай)



*РИС. А-2. Реактор CAREM, строительство которого идет полным ходом на площадке, прилегающей к АЭС «Атуга»/«Нестор Карлос Киришер» в Аргентине. Ввод в эксплуатацию запланирован на 2024 год. Мощность при работе в качестве демонстрационного прототипа составит 30 МВт (эл.).
(Фото: НКАЭ)*

36. В Китае началась подготовка площадки для многоцелевого малого энергетического реактора АСР100, известного также как «Линлун-один», мощностью 125 МВт (эл.). Это интегральный реактор с водой под давлением. Предполагается, что реактор будет введен в

эксплуатацию к 2025 году после примерно пяти лет строительства. Он будет использоваться для производства электроэнергии и технологического тепла, а также для опреснения морской воды. В Соединенных Штатах Америки Комиссия по ядерному регулированию утвердила проект компании «НьюСкейл пауэр» по созданию интегрального ММР с водой под давлением мощностью 50 МВт (эл.) с естественной циркуляцией и полным комплексом пассивных средств безопасности. Вслед за этим компания увеличила мощность модуля «НьюСкейл пауэр» до 60 МВт (эл.). В будущем предполагается довести мощность до 77 МВт (эл.), для чего в 2022 году компания планирует подать в Комиссию заявку для нового утверждения проекта. Конструкция модуля позволяет пошагово увеличивать мощность вплоть до 924 МВт (эл.) полной мощности в пределах одной АЭС. Сооружение первого модуля будет начато в ближайшие годы, а его ввод в эксплуатацию запланирован на 2030 год в Айдахской национальной лаборатории.

37. Республика Корея и Саудовская Аравия совместно осуществили предпроектные работы по созданию системно-интегрированного модульного усовершенствованного реактора (SMART), результатом которых стал выпуск предварительной документации по техническому обоснованию безопасности для интегрального реактора с водой под давлением мощностью 110 МВт (эл.) (365 МВт (тепл.)), проект которого является совместной собственностью этих двух стран. В настоящее время утверждаются изменения конструкции реактора SMART, после чего будет создана рабочая документация для его сооружения. Япония опубликовала Стратегию зеленого роста через достижение углеродной нейтральности в 2050 году, в которой содержится подробная информация об активной поддержке правительством Японии международного сотрудничества в продвижении технологий ММР.

38. Франция продолжала разработку NUWARD – ММР мощностью 340 МВт(э) на основе PWR, состоящего из двух реакторных модулей мощностью 170 МВт(э), с целью замены с помощью этой технологии устаревающих угольных электростанций в течение следующего десятилетия. NUWARD — это реактор с принудительной конвекцией и усовершенствованными системами безопасности. Великобритания также продолжает разработку собственного ММР — трехконтурного реактора с водой под давлением мощностью 450 МВт (эл.), предназначенного для сооружения внутри страны и за рубежом к 2030 году.

39. В Российской Федерации интегральный реактор с водой под давлением РИТМ-200 мощностью 50 МВт (эл.), который изначально создавался для атомных ледоколов и устанавливался на них, рассматривается как возможный кандидат на роль будущего наземного ММР.

40. Канадская «дорожная карта» по ММР включает их возможное применение в качестве замены электростанций на ископаемом, в том числе дизельном, топливе, с подключением к сети или автономно, в частности в нефтяной и горнодобывающей промышленности. По меньшей мере 12 компаний, разрабатывающих и/или поставляющих ММР, взаимодействуют с Комиссией по ядерной безопасности Канады (КЯБК) для проведения экспертизы предлагаемых концепций реакторов, включая быстрые реакторы с жидкометаллическим охлаждением, реакторы на расплавленных солях, реакторы с газовым охлаждением и реакторы с интегральным водяным охлаждением. Заявка на получение лицензии на подготовку площадки была подана компанией «Глобал ферст пауэр» для установки газоохлаждаемого ММР мощностью 15 МВт (тепл.) в Чок-Риверских лабораториях. В данном проекте предполагается как производство электроэнергии, так и выработка технологического тепла. Компания «Онтарио пауэр дженерейшн» (OPG) недавно сообщила, что находится в процессе выбора ММР для размещения на площадке нового ядерного проекта «Дарлингтон» в Кларингтоне, Онтарио; при условии одобрения провинцией OPG рассматривает возможность подачи заявки на получение лицензии на строительство в 2022 году.

Тенденции

41. В нескольких странах, включая Канаду, Соединенное Королевство, Соединенные Штаты Америки, Чешскую Республику и Японию, активизировалась разработка микрореакторов, являющихся одним из видов ММР. Хотя пока еще нет глобального консенсуса относительно определения и диапазона мощности микромодульных реакторов (ММР), существует общее понимание того, что они будут пригодны для обеспечения когенерации тепла и электроэнергии

в отдаленных районах или на небольших островах и/или для замены дизельных генераторов. Одной из концепций, проходящей процесс лицензирования строительства под руководством Комиссии по ядерному регулированию (КЯР) для проекта на площадке министерства энергетики США, является реактор на быстрых нейтронах «Аугога» мощностью 1,5 МВт (эл.), сооружаемый компанией «Окло» — стартапом из Соединенных Штатов Америки. В Канаде высокотемпературный газоохлаждаемый микромодульный реактор (ММР) с блочной призматической активной зоной мощностью около 15 МВт (тепл.), или около 5 МВт (эл.), компании «Алтра сэйф ньюклеар корпорейшн» (USNC), прошел первый этап процесса рассмотрения проекта поставщиком в КЯБК и переходит ко второму этапу рассмотрения; а в отношении разрабатываемого компанией «УРЕНКО» многоцелевого модульного высокотемпературного газоохлаждаемого энергетического реактора «Ю-Бэтэри» мощностью 4 МВт (эл.) при 10 МВт (тепл.), должен начаться первый этап процесса рассмотрения проекта поставщиком в КЯБК.

42. Среди государств-членов растет интерес к жидкосолевым реакторам (ЖСР): число проектов по их разработке увеличивается. Технология ЖСР отличается чрезвычайной гибкостью, благодаря чему она легла в основу множества различных концепций, таких как реакторы на тепловых и быстрых нейтронах. Жидкосолевые реакторы могут быть выполнены как в виде ММР, так и в виде мощных реакторов на АЭС. Несколько разработчиков ЖСР планируют в течение следующего десятилетия соорудить реакторы согласно имеющимся у них проектам. Малогабаритный ЖСР, разрабатываемый датской компанией «Сиборг технолоджиз», прошел этап базового проектирования и первый этап утверждения в регулирующих органах. В Канаде в настоящее время два проекта ЖСР находятся в процессе рассмотрения проекта поставщиком в КЯБК, который предшествует лицензированию: интегральный реактор на солевых расплавах (IMSR-400, мощностью 195 МВт(э)) компании «Террестриал энерджи» находился на втором этапе процесса рассмотрения проекта поставщиком в КЯБК; и стабильный солевой реактор — дожигатель отходов SSR-W300 компании «Молтекс энерджи», разрабатываемый в Канаде и Великобритании, находился на стадии перехода от концептуального проектирования к проектированию на уровне системы и проходил первый этап процесса рассмотрения проекта поставщиком в КЯБК. Еще несколько ЖСР находятся на разных этапах разработки в других странах и могут быть построены в ближайшие годы.

43. В нескольких странах ведется разработка реакторов морского базирования. Российская Федерация разработала четыре проекта ММР для плавучих энергоблоков и один проект под названием «ШЕЛЬФ» для подводного энергоблока. В Китае имеется по меньшей мере один проект, АСРР50S, предназначенный для снабжения электроэнергией морских нефтяных и газовых платформ. В конце 2020 года Республика Корея сообщила о разработке плавучего энергоблока BANDI 60 на базе реактора с водой под давлением.

44. Общей целью разработки ММР является демонстрация того, что модульное строительство позволяет снизить начальные капитальные затраты благодаря экономии, достигаемой за счет серийного производства, а также того, что упрощение конструкции и сокращение сроков строительства могут сделать возможным использование более доступных схем финансирования. Чтобы помочь государствам-членам прийти к общему пониманию их потребностей и характерных особенностей, связанных с ММР, Агентство инициировало разработку типовых пользовательских требований и критериев для проектов и технологических решений в данной области. Этот документ должен содержать набор ключевых политических, технических и экономических требований, использование которых странами-новичками позволит облегчить процесс оценки реакторных технологий и, при необходимости, разработки тендерной документации. Ожидается, что успешное внедрение ММР в течение следующего десятилетия побудит большее число стран-новичков обратить внимание на данную технологию и принять участие в соответствующих НИОКР.

45. Агентство активизировало свою деятельность по оказанию поддержки государствам-членам, заинтересованным в создании безуглеродных гибридных энергетических систем, включающих возобновляемые источники энергии с переменным характером генерации, ММР, накопители энергии и неэлектрические применения. Во многих странах полагают, что ММР, обычно мощностью менее 300 МВт (эл.), могут стать эффективным источником безуглеродной

электроэнергии, который заменит устаревающие электростанции, работающие на ископаемом топливе. Кроме того, в связи с ростом во всем мире доли неустойчивых возобновляемых источников энергии ММП представляются решением, подходящим как для условий базисной нагрузки, так и для гибкой эксплуатации при их использовании вместе с возобновляемыми источниками с целью обеспечить надежное энергоснабжение.

Международные инициативы в области инновационных ядерно-энергетических систем

Созданный в 2000 году Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО) является ключевым инструментом международного сотрудничества в вопросах устойчивости ядерной энергетики, долгосрочных стратегий и институциональных и технических инноваций.

В 2020 году в рамках новой услуги ИНПРО «Аналитическая поддержка для повышения устойчивости ядерной энергетики» (ASENES) был выпущен набор инструментов, позволяющий странам проводить оценку топливного цикла в режиме онлайн.



Был также создан новый курс электронного обучения, призванный помочь техническим экспертам во всем мире эффективно использовать инструменты и методы для моделирования сценариев развития ядерной энергетики, сравнительной оценки ядерно-энергетических систем и составления дорожных карт для движения в сторону устойчивой ядерной энергетики. Кроме того, по линии ИНПРО был начат совместный проект, предусматривающий использование ASENES для подготовки тематических исследований по сценариям устойчивого развертывания, разработанным специально для ММП.

А.4.3. Системы на быстрых нейтронах

Текущее состояние

46. Несколько стран с передовыми ядерно-энергетическими программами продолжают развивать в рамках своих национальных программ системы на быстрых нейтронах. Два промышленных быстрых реактора с натриевым теплоносителем продолжают работать в Российской Федерации: БН-600 (с 1980 года) и усовершенствованный БН-800 (с 2016 года). Проектируемый реактор БН-1200 будет следующим в серии российских быстрых реакторов с натриевым теплоносителем и должен иметь повышенный уровень безопасности, установленный для инновационных реакторов Международным форумом «Поколение IV». Индия завершила ввод в эксплуатацию созданного ею прототипа быстрого реактора-размножителя с натриевым теплоносителем. В Китае начиная с 2010 года эксплуатируется китайский экспериментальный быстрый реактор с натриевым теплоносителем мощностью 20 МВт (эл.). Инновационный быстрый реактор с натриевым теплоносителем CFR-60 строится начиная с 2017 года. Начались строительные работы на втором реакторе на быстрых нейтронах CFR-600 бассейнового типа с натриевым теплоносителем в уезде Сяпу, Фуцзянь, Китай. Известный также как демонстрационный проект реактора на быстрых нейтронах в Сяпу, CFR-600 является частью китайского плана по достижению замкнутого ядерного топливного цикла. Франция, несмотря на имеющийся у нее солидный опыт разработки и эксплуатации быстрых реакторов с натриевым теплоносителем, отложила планы строительства прототипа инновационного реактора данного типа — усовершенствованного технологического реактора с натриевым теплоносителем для промышленной демонстрации (ASTRID), вместо этого сосредоточив усилия на программе НИОКР. Япония поощряет конкуренцию между различными технологиями реакторов на быстрых нейтронах, включая реакторы ММП, подготавливая по линии своей программы «Ядерная энергия как движитель инноваций» (НЕКСИП) технико-экономическое обоснование в качестве первого этапа реализации «Стратегической дорожной карты по созданию быстрых реакторов». Следующая цель дорожной карты — продемонстрировать данную технологию в середине 21 века.

47. В Российской Федерации реактор со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300 и ММР со свинцово-висмутовым теплоносителем СВБР-100 находятся на этапе лицензирования. Несколько стран Европейского союза ведут совместную разработку европейского демонстрационного быстрого реактора со свинцовым теплоносителем (ALFRED), который Румыния предложила построить на площадке в Миовени. В Соединенном Королевстве ожидают решения национального Департамента деловой, энергетической и промышленной стратегии в отношении проекта шведского усовершенствованного реактора со свинцовым теплоносителем (SEALER) мощностью 55 МВт (эл.) для установки SEALER-UK.

48. В 2020 году компании «Дженерал атомикс» и «Фраматом» совместно анонсировали новый концептуальный проект модульного быстрого реактора с гелиевым теплоносителем мощностью 50 МВт (эл.). В Европейском союзе продолжается разработка экспериментального быстрого реактора с гелиевым теплоносителем ALLEGRO. Компании «ТерраПауэр» и «Дженерал электрик хитати ньюклар энерджи» анонсировали новую усовершенствованную гибридную технологию Natrium (рис. А-3), объединяющую в себе быстрый реактор с натриевым теплоносителем мощностью 345 МВт (эл.) и жидкосолевою энергетическую систему, позволяющую повысить суммарную мощность до 500 МВт (эл.).



*РИС. А-3. Усовершенствованная гибридная технология Natrium, разработанная компаниями «ТерраПауэр» и «Дженерал электрик хитати ньюклар энерджи».
(Источник: компания «ТерраПауэр»)*

Тенденции

49. Практически все предлагаемые новые концепции и инновационные конструкции реакторов на быстрых нейтронах относятся к классу ММР. Наряду с хорошо развитой технологией использования натриевого теплоносителя разрабатываются новые конструкции и концепции быстрых реакторов. Помимо этого, наблюдается растущий интерес к быстрым реакторам, в которых в качестве теплоносителя используются жидкие тяжелые металлы, такие как свинец и эвтектика свинец-висмут. Еще одним альтернативным теплоносителем, рассматриваемым при разработке систем на быстрых нейтронах, является гелий. Создание систем на быстрых нейтронах связано с рядом технологических проблем, однако основным препятствием для их внедрения вплоть до настоящего времени считается их низкая экономическая конкурентоспособность. Тем не менее реакторы данного типа позволяют существенно сократить объем, токсичность и продолжительность существования радиоактивных отходов, а также более эффективно использовать ядерное топливо, что вместе с новыми концепциями продолжает стимулировать развитие таких технологий.

А.4.4. Неэлектрические применения ядерной энергии

Текущее состояние

50. В целях, не связанных с производством электроэнергии, использовались 64 действующих ядерных энергетических реактора: было произведено 3396,4 гигавайт-часа (ГВт·ч) тепловой мощности в электрическом эквиваленте. При этом 56 реакторов обеспечивали централизованное теплоснабжение и производили технологическое тепло для промышленных целей и 8 обеспечивали опреснение морской воды.

64 действующий ядерный
энергетический реактор
произвел **3396,4** ГВт·ч



тепловой мощности в электрическом эквиваленте
в рамках проектов ядерной когенерации для целей,
не связанных с производством электроэнергии



56

обеспечивали централизованное
теплоснабжение и производили
технологическое тепло для промышленных целей



8

обеспечивали опреснение морской воды

Производство водорода

51. Крупные успехи были достигнуты в сфере производства водорода с использованием ядерной энергии.

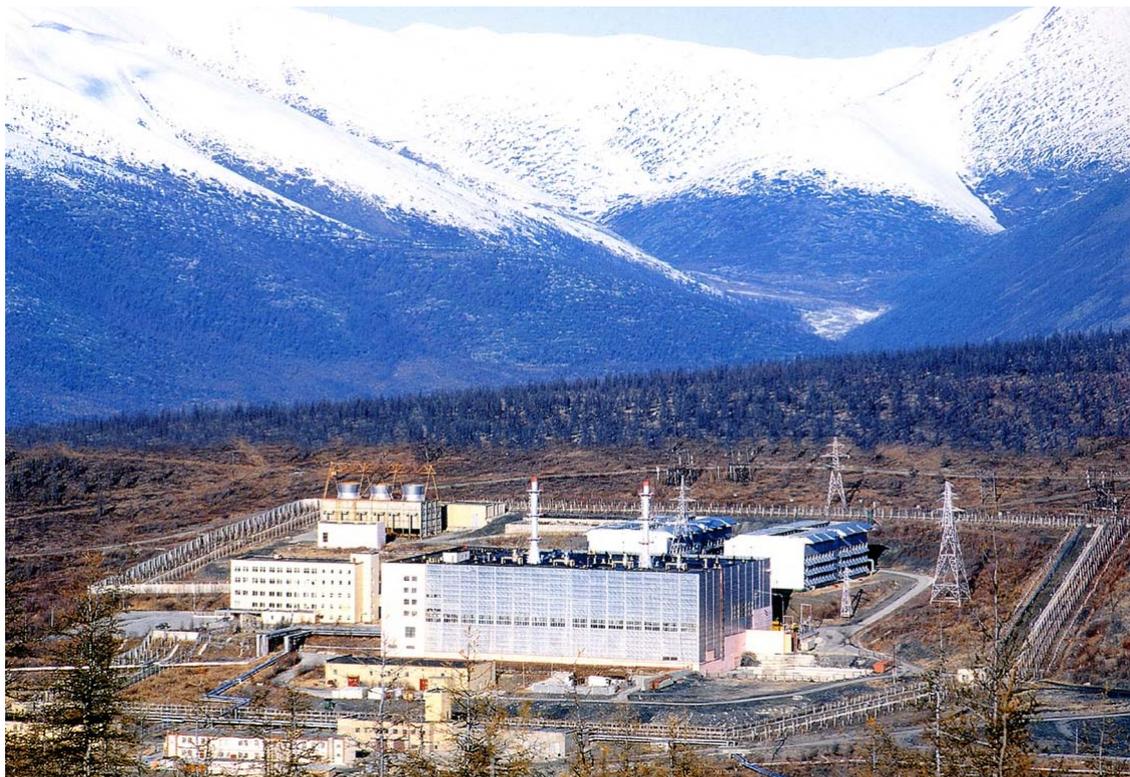
52. В области производства водорода несколько государств-членов сосредоточили свои усилия на использовании для этой цели электроэнергии, вырабатываемой легководными реакторами во внепиковый период. Министерство энергетики США заключило с энергетическими компаниями «Энерджи харбор», «Эксел энерджи» и «Аризона паблик сервис» договоры, согласно которым компании должны продемонстрировать производство водорода на трех АЭС в 2020 и 2021 годах в рамках проектов с участием нескольких национальных лабораторий. В Соединенном Королевстве компания «ЭДФ энерджи» ведет проект «Водород для Хейшема (H2H)», направленный на производство низкоуглеродного водорода с использованием ядерной энергии.

53. В Китае успешно проводятся НИОКР в сфере производства водорода с использованием ядерной энергии. Шанхайский институт прикладной физики завершил долгосрочные испытания стабильно работающей батареи твердооксидных электролитических ячеек (SOEC) мощностью 5 киловатт (кВт) и построил установку производства водорода мощностью 20 кВт, в основе которой лежит технология электролиза высокотемпературного пара. Далее планируется наладить производство указанных ячеек и батарей, а также построить демонстрационные установки мощностью 200 кВт и 1 МВт, получающие электропитание от ториевого ЖСР, что позволит производить водород в большом объеме.

54. Ядерные лаборатории Канады продолжали разработку гибридной термохимической медно-хлорной технологии для производства водорода с использованием ядерной энергии. Планируется создать демонстрационную комплексную систему лабораторного масштаба, а в дальнейшем приступить к созданию прототипа установки. В Японии было создано автоматизированное непрерывное производство водорода с замкнутым циклом с использованием термохимического процесса расщепления воды мощностью до 30 литров в час в течение до 150 часов, что в будущем позволит производить водород с использованием тепла при температуре более 900 градусов Цельсия, получаемого в высокотемпературных газоохлаждаемых реакторах. При этом были получены важные данные, необходимые для изучения рабочих характеристик и надежности материалов и компонентов, а также совершенствования технологий управления жидкостью и реакцией. Все это позволит в дальнейшем увеличить продолжительность функционирования производства.



55. В сфере центрального теплоснабжения от АЭС прорывных успехов добилась Российская Федерация, введя в эксплуатацию плавучую АЭС «Академик Ломоносов». Эта АЭС может снабжать электроэнергией нефтяные платформы, расположенные у арктического побережья Российской Федерации, обеспечивать энергией установку опреснения морской воды, а также производить тепло для центрального теплоснабжения. АЭС «Академик Ломоносов» постепенно заменит Билибинскую АЭС (рис. А-4), срок эксплуатации которой был продлен на пять лет. Билибинская АЭС, являющаяся одним из старейших в мире когенерирующих ядерных объектов, снабжает электричеством и теплом город Билибино. Другие страны, в частности, Китай и Республика Корея, также сообщили о планах строительства плавучих АЭС.



*РИС. А-4. Билибинская АЭС в Российской Федерации, используемая для когенерации тепла и электричества.
(Фото: Росэнергоатом)*

Тенденции

56. Использование ядерной энергии для целей, не связанных с производством электроэнергии, растет в мире беспрецедентными темпами. Помимо декарбонизации конечного потребления, например, в таких секторах, как транспорт, промышленность и ЖКХ, ядерная когенерация все чаще рассматривается как аргумент экономического характера против досрочного вывода из эксплуатации убыточных АЭС, особенно с учетом растущей доли возобновляемых источников энергии с переменным характером генерации в электросетях. Ожидается, что интерес к производству водорода с использованием ядерной энергии от водоохлаждаемых реакторов со временем позволит наладить такое производство на коммерческой основе, особенно в случае успеха демонстрационных проектов.

57. Однако вначале должны быть решены инфраструктурные проблемы, связанные с хранением и транспортировкой водорода. Ожидается, что опыт, извлеченный из текущих проектов, осуществляемых разными странами, будет способствовать расширению производства водорода с использованием ядерной энергии с помощью традиционных технологий электролиза. Разработка высокоэффективных технологий производства водорода с использованием ядерной энергии также, по всей видимости, продолжится. Использование ядерной энергии для целей, не связанных с производством электроэнергии, в виде автономных установок, установок когенерации и в составе многоцелевых комплексных энергосистем с возобновляемыми источниками энергии, судя по всему, станет тенденцией ближайших лет. Среди таких применений можно отметить опреснение воды, производство топливного водорода, централизованное теплоснабжение и кондиционирование жилых и коммерческих зданий, а также обслуживание множества других отраслей, включая металлургию, нефтехимию и производство синтетического топлива.

58. Агентство разработало Программу экономической оценки водорода и Калькулятор водорода, а также Инструментарий МАГАТЭ для производства водорода с использованием ядерной энергии, призванные помочь государствам-членам в проведении технико-экономической оценки проектов производства водорода с использованием ядерной энергии в сравнении с альтернативными вариантами.

А.4.5. Исследования и развитие технологий в области термоядерного синтеза с перспективой применения в энергетике

Текущее состояние

59. Сообщество, занимающееся вопросами термоядерного синтеза, отметило начало сборки и подключения установки ИТЭР (рис. А-5 и А-6) после более чем десяти лет сложного строительства, включая подготовку площадки, а также проектирование и производство основных систем и компонентов. К концу 2020 года программа подготовки к первому эксперименту с термоядерной плазмой, намеченному на декабрь 2025 года, была выполнена примерно на 70%. Эксплуатация ИТЭР позволит создать научную и технологическую основу для разработки и проектирования будущих термоядерных энергетических реакторов.



РИС. А-5. Основание криостата массой 1250 тонн стало первым крупногабаритным компонентом, установленным в нижней части шахты токамака глубиной 30 метров. (Фото: Организация ИТЭР)



РИС. А-6. После установки основания криостата в шахту был спущен его нижний цилиндр массой 375 тонн. Затем цилиндр был приварен к основанию. (Фото: Организация ИТЭР)

60. На объединенном европейском торе (JET), токамаке с увеличенной мощностью разогрева и стенкой, аналогичной стенке ИТЭР, ведется подготовка к серии экспериментов с тритием в рамках испытаний и подготовки к последующим экспериментам со смесью равных долей дейтерия (D) и трития (T). Серия экспериментов с дейтерием и тритием, начало которой запланировано на лето 2021 года, обеспечит уникальную физическую и технологическую базу для эксплуатации ИТЭР. При этом одной из основных целей является производство 15 МВт тепловой энергии в течение приблизительно пяти секунд в стабильном режиме. Это позволит изучить важнейшие физические аспекты производства энергии в процессе термоядерного синтеза.

61. В сфере ядерного синтеза с инерционным удержанием плазмы с использованием лазеров высокой мощности в Соединенных Штатах Америки на Национальной установке по термоядерному зажиганию продолжается совершенствование методики эксперимента путем увеличения эффективности передачи энергии от лазеров к топливной капсуле, выявления нескольких причин утечки энергии, а также разработки технологий смягчения. Увеличение эффективности передачи энергии является шагом вперед с точки зрения перспектив производства энергии.

Тенденции

62. Продолжается рост государственных и частных инвестиций в исследования термоядерного синтеза и разработку соответствующих технологий. На данный момент за счет государственных средств функционируют, строятся или запланированы более 90 термоядерных устройств (рис. А-7). Помимо этого, более 20 частных компаний занимаются научными исследованиями и разработками, связанными с различными термоядерными устройствами малой мощности и направлениями, базирующимися на различных видах топлива, альтернативных геометрических формах систем удержания плазмы и новых технологиях, таких как высокотемпературные сверхпроводящие магниты.

63. В Министерстве энергетики США Комиссия по ядерному регулированию и Ассоциация участников освоения термоядерного синтеза провели виртуальный общественный форум, посвященный вопросам регулирующей основы для термоядерного синтеза. Перед форумом стояла задача начать диалог по вопросам регулирующей основы с американскими и другими национальными регулирующими органами в связи с планируемыми в будущем разработкой и созданием термоядерных энергетических реакторов с использованием государственного или частного финансирования.

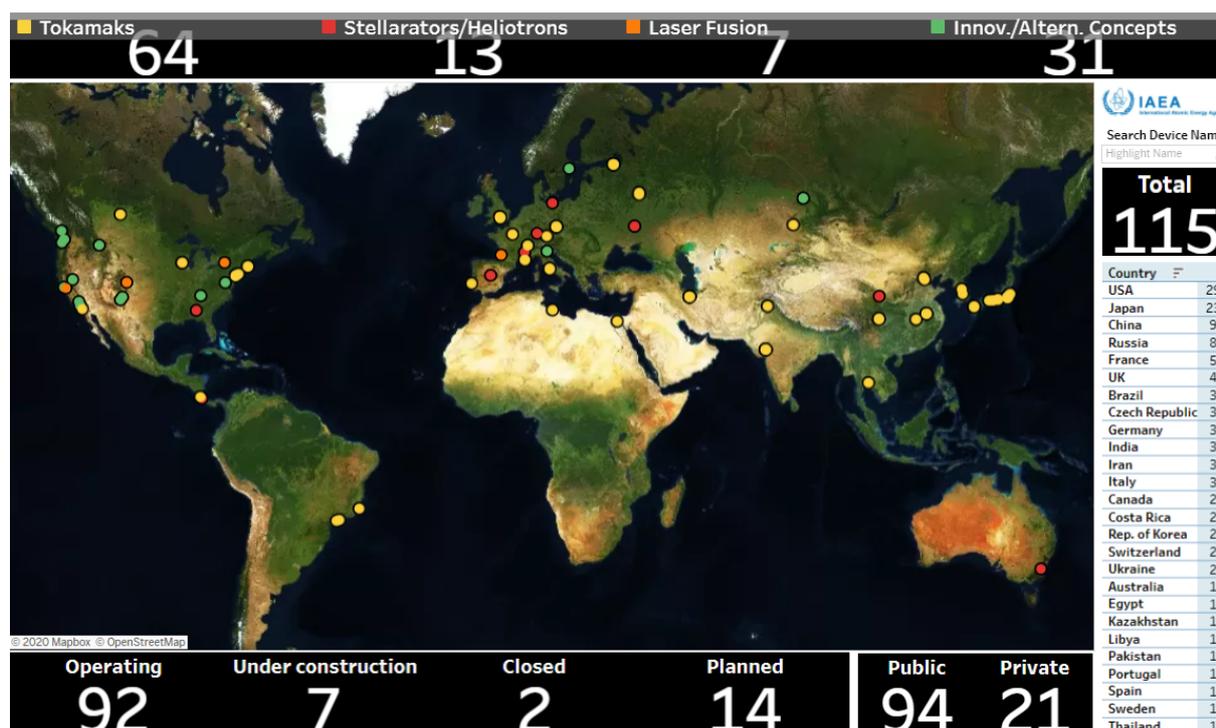


РИС. А-7. На данный момент функционируют, строятся или запланированы более 100 термоядерных устройств (государственных и частных). (Источник: [Информационная система по термоядерным устройствам](#))

64. В рамках программ исследования недавно разработанных материалов и технологий, таких как «Эксперимент по воздействию плазмы на материалы» в Окриджской национальной лаборатории в Соединенных Штатах Америки и программа EUROfusion «MAT» в Европе проводятся некоторые специфические эксперименты, посвященные вопросам поведения материалов в условиях воздействия плазмы, а также вопросам коррозии. Помимо этого, в отсутствие специальных облучательных установок для исследования материалов для термоядерного синтеза ценные результаты дают эксперименты по облучению, проводимые на исследовательских реакторах, таких как высокопоточный реактор для производства изотопов в Окриджской национальной лаборатории, в рамках сотрудничества между Европейским союзом и Соединенными Штатами Америки.

65. Бюро по научным исследованиям в области термоядерной энергии Министерства энергетики США выделило 18 млн долл. США на финансирование работ на лазерных установках с высокой интенсивностью излучения в Соединенных Штатах Америки и Канаде и обеспечение связанной с этими работами технической поддержки. Средства были выделены в рамках реализуемой с 2018 года инициативы LaserNetUS для облегчения доступа научных работников университетов и национальных лабораторий к установкам данного типа. В Японии Стратегический комитет по лазерному термоядерному синтезу, состоящий из примерно 40 представителей 20 институтов, рассматривает вопрос разработки лазерной системы с высокой частотой повторения импульсов. Данная система позволит выполнить анализ термоядерных плазм, базирующийся на полученных с ее помощью данных, а также провести испытания конструкции реактора лазерного синтеза с использованием источника нейтронов на основе термоядерного синтеза. В Канаде компания «Дженерал фьюжн» в течение последних десяти лет разрабатывает технологию термоядерного синтеза с намагниченной мишенью и публично заявила о планах создания демонстрационной установки. Компания «Дженерал фьюжн» обратилась в КЯБК с просьбой о проведении предлицензионных мероприятий, чтобы понять, как будет проходить процесс лицензирования. КЯБК также ведет предлицензионные переговоры со стартапами, которые стремятся проводить исследования и разработки в области термоядерного синтеза в рамках развития технологий.

В. Ядерный топливный цикл

В.1. Начальная стадия топливного цикла

Текущее состояние

66. По причинам, обусловленным глобальной пандемией COVID-19, несколько крупных производителей урана приостановили работу либо существенно снизили объемы производства. Более 90% мирового уранового производства приходится на Австралию, Казахстан, Канаду, Намибию (рис. В-1), Нигер, Российскую Федерацию и Узбекистан. В связи с сокращением мирового производства урана недопоставки, вызвавшие дефицит, скомпенсированный вторичными поставками, привели в первом квартале 2020 года к росту спотовой цены на 41%. Однако этого все еще недостаточно для возобновления добычи на простаивающих рудниках и разработки новых. В третьем квартале 2020 года спотовая цена урана снизилась примерно на 15% по причине возобновления в сентябре добычи на канадском урановом руднике «Сигар Лейк» (крупнейшем мировом производителе) после пяти месяцев простоя, вызванного глобальной пандемией.



РИС. В-1. Вид сверху на карьер открытого уранового рудника «Хусаб», Намибия.
(Фото: компания «Свакоп Ураниум»)

67. Для некоторых видов разрабатываемого в Европе, Российской Федерации, Соединенных Штатах Америки и Японии устойчивого к авариям топлива и инновационного топлива необходим уран-235 более высокой степени обогащения, позволяющей компенсировать меньшую нейтронную прозрачность оболочки. В связи с этим в настоящее время проводятся испытания видов топлива на основе высокообъемного низкообогащенного урана (HALEU) со степенью обогащения выше 5%, но ниже 20%.

68. В США в реактор впервые были загружены устойчивые к авариям топливные сборки производства компании «Глобал ньюклар фьюэл». Эти опытно-испытательные сборки, в конструкции которых использовались разработанная компанией циркониевая оболочка с покрытием ARMOR и решения IronClad в области устойчивого к авариям топлива, были установлены на АЭС «Клинтон» компании «Экселон» в Соединенных Штатах Америки.

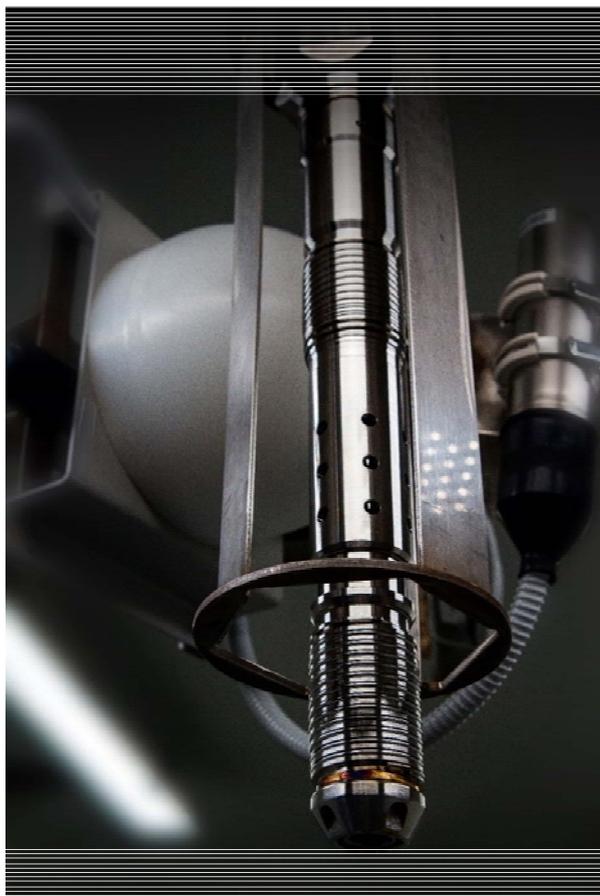
69. Первые российские топливные сборки для коммерческих реакторов с экспериментальными устойчивыми к авариям топливными стержнями были произведены и прошли приемочный контроль на Новосибирском заводе химконцентратов — производственном объекте Топливной компании «ТВЭЛ», являющейся дочерним предприятием «Росатома». Топливные стержни были загружены в один из реакторов ВВЭР-1000 на Ростовской АЭС в Российской Федерации.

70. В начале 2018 года опытно-испытательные сборки с устойчивым к авариям топливом, установленные на первом энергоблоке АЭС «Эдвин И. Хатч» компании «Саузерн ньюклар», завершили 24-месячный топливный цикл. Далее планируется изучить образцы опытно-испытательных стержней. Уже завершена их первоначальная инспекция. В дальнейшем характеристики материалов и оболочки стержней будут изучаться в Окриджской национальной лаборатории Министерства энергетики США.

71. Опытно-испытательные сборки с устойчивым к авариям топливом EnCore были установлены на четвертом энергоблоке АЭС «Дул» компании «ЭНЖИ Электрабель» в Бельгии. Реактор этого энергоблока стал вторым в мире и первым в Европе коммерческим реактором, в который были установлены данные сборки.

72. Компания «ТерраПауэр» сообщила о планах по совместной работе с поставщиком ядерного топлива и сопутствующих услуг компанией «Сентрус энерджи» с целью создания местных производственных мощностей промышленного масштаба для производства высокообъемного низкообогащенного урана. Данное топливо будет использоваться во множестве реакторов следующего поколения, включая недавно представленные реакторы с системой аккумулирования энергии Sodium, созданные компаниями «ТерраПауэр» и «Дженерал электрик хитати ньюклар энерджи».

73. Горно-химический комбинат в Железногорске, Российская Федерация, завершил производство первой полной партии перезагрузки ураново-плутониевого смешанного оксидного топлива (МОКС) (рис. В-2) для четвертого энергоблока Белоярской АЭС в Российской Федерации. «Росэнергоатом», являющийся компанией-оператором указанной АЭС, и его уполномоченный представитель АО ВПО «ЗАЭС» произвели приемку 169 топливныхборок.



*РИС. В-2. Топливная сборка с МОКС-топливом для быстрого реактора БН-800.
(Фото: Горно-химический комбинат, Российская Федерация)*

74. Ядерные лаборатории Канады заключила четыре соглашения о сотрудничестве с разработчиками технологии ММР в рамках Канадской инициативы ядерных исследований. Первое — с USNC-Power, дочерним предприятием USNC, в сфере научных исследований,

связанных с MMR корпорации USNC. Проект будет включать исследования, связанные с производством USNC полностью керамического микрокапсулированного топлива. Второе соглашение — с компанией Великобритании «Молтекс энерджи», которое включает работы по поддержке ряда аспектов программы этой компании в сфере разработки ядерного топлива для ее стабильного солевого реактора типа MMR мощностью 300 МВт (эл.). Третье — с американской компанией «Кейрос пауэр» по исследованию и проектированию технологий для более эффективного разделения, анализа и хранения трития, образующегося при работе предлагаемой этой компанией конструкции MMR. Четвертое соглашение заключается с компанией «Террестриал энерджи» на разработку и испытание методов отслеживания поведения предлагаемого жидкого топлива, которое будет использоваться в проекте интегрального реактора на солевых расплавах этой компании.

75. Компания «Холтек интернэшнл» выбрала компанию «Фраматом» поставщиком ядерного топлива для своего реактора SMR-160. Компании заключили соглашение, предусматривающее выполнение всех необходимых инженерно-технических работ для обеспечения реактора SMR-160 коммерчески доступными и успешно используемыми топливными сборками 17x17 GAIA компании «Фраматом».

76. В исследовательском реакторе Лаборатории ядерных исследований Массачусетского технологического института было начато облучение топлива с трехструктурным изотропным покрытием (TRISO) компании «Экс-энерджи», получившего название TRISO-X. Результаты испытания под облучением будут использованы в процессе лицензирования реактора Хе-100 и других реакторов компании «Экс-энерджи», использующих топливо TRISO.

77. Корпорация USNC построила в Солт-Лейк-Сити, штат Юта, Соединенные Штаты Америки, новый объект, на котором будет разрабатываться проприетарное полностью керамическое микроинкапсулированное топливо, представляющее собой следующее поколение микросферического топлива TRISO из оксикарида урана, которое должно заменить собой используемую уже 50 лет графитовую матрицу с традиционным топливом TRISO с оболочкой из карбида кремния. Материалы, разработанные на новом заводе, будут использоваться в MMR корпорации USNC и в других ядерных реакторах, в том числе газоохлаждаемых, легководных, типа CANDU и жидкосолевых.

78. Был подписан договор с «Чайна ньюклар энерджи индастри корпорейшн» (CNEIC), регулирующий транспортировку низкообогащенного урана (НОУ) и оборудования, необходимых для работы Банка НОУ МАГАТЭ. Данный договор открывает второй путь транспортировки урана в Банк и из него. Банк НОУ МАГАТЭ находится в Казахстане и функционирует с октября 2019 года. Другие механизмы гарантированных поставок изложены в «Обзоре ядерных технологий — 2012» (документ GC(56)/INF/3).

Тенденции

79. В 2020 году общий объем поставок первичного урана снизился. Согласно прогнозам, объем добытого за год урана составит 46 500 тонн. Это приблизительно 69% мирового спроса, в связи с чем возрастает значимость вторичного урана для удовлетворения потребностей в ядерном топливе.

80. Для обеспечения стабильных поставок ядерного топлива на действующие и будущие АЭС во всем мире необходимы дополнительные урановые рудники. Из прошлого опыта известно, что в силу экономических, технических, экологических и социальных ограничений лишь малая часть разведанных урановых месторождений является пригодной для разработки. В связи с этим существует необходимость в инновациях, способных сделать целесообразной разработку ныне не представляющих интереса месторождений. В 2020 году одним из примеров таких инноваций стало подземное выщелачивание — технология добычи на богатых месторождениях с несогласным залеганием.

81. Другой значимой инновацией являются ныне разрабатываемые методы биовыщелачивания. Это разновидности подземного выщелачивания, предназначенные для добычи урана на месторождениях песчаникового типа. Данная технология разрабатывается в Китае на протяжении последнего десятилетия с целью повысить эффективность добычи на месторождениях этого типа и улучшить их рекультивацию.

82. Одним из рассматриваемых путей повышения устойчивости топливного цикла является использование на действующих АЭС топлива с глубоким выгоранием, так как при увеличении выгорания выгружаемого топлива снизится годовое потребление природного урана.

В.2. Конечная стадия топливного цикла

Текущее состояние

83. Согласно отзывам, полученным с помощью сети Агентства «Опыт эксплуатации АЭС в условиях пандемии COVID-19» (COVID-19 NPP OPEX), пандемия не оказала существенного влияния на эксплуатацию хранилищ отработавшего ядерного топлива за исключением нескольких отложенных остановов для перезагрузки топлива. Скорость накопления отработавшего ядерного топлива в мировых хранилищах составляет приблизительно 7 тыс. тонн тяжелого металла (тТМ) в год, при этом в общей сложности его количество в хранилищах приближается к 300 тыс. тТМ.

84. В Японии впервые в ее истории произошло удаление отработавшего МОКС-топлива — с АЭС «Иката», а месяцем позднее — с АЭС «Такахама». Стержни с отработавшим МОКС-топливом будут временно размещены в бассейне выдержки отработавшего топлива. Правительство Японии в рамках своей энергетической политики проводит НИОКР, связанные с переработкой этого топлива.

85. В странах с давно существующими ядерными программами, реализующих стратегии открытого топливного цикла, основной проблемой является сокращение объемов пристанционных хранилищ отработавшего ядерного топлива и увеличение сроков хранения (более 100 лет).

86. В январе 2020 года в Республике Корея было одобрено расширение сухого хранилища на АЭС «Вольсон». Это стало важным решением ввиду того, что имеющийся объем хранилища был практически заполнен.

87. Комиссия по ядерному регулированию Соединенных Штатов опубликовала проект оценки воздействия на окружающую среду планируемого централизованного промежуточного хранилища в штате Нью-Мексико, Соединенные Штаты Америки.

88. Остановленная Игналинская АЭС в Литве после поставки на год раньше запланированного срока последнего защитного контейнера для отработавшего ядерного топлива располагает всем необходимым для безопасного пристанционного хранения всего отработавшего ядерного топлива двух своих реакторов РБМК-1500 и безопасного обращения с ним.

Тенденции

89. Агентство координирует исследовательскую деятельность, направленную на углубление понимания процессов, происходящих с отработавшим ядерным топливом в различных системах хранения, а также механизмов старения и деструкции этих систем. Это поможет обеспечить безопасное хранение отработавшего ядерного топлива и его безопасную транспортировку в пункты захоронения и на перерабатывающие заводы.

90. Благодаря более эффективному управлению ядерными реакторами количество производимого ими отработавшего ядерного топлива постепенно сокращается. Однако при этом растут начальное обогащение и глубина выгорания, что приводит к увеличению остаточного тепловыделения и более высоким рискам охрупчивания оболочки. В связи с этим может возникать необходимость в изменении процедур обращения с отработавшим топливом на различных этапах.

91. Новые виды топлива, внедрение которых ожидается в ближайшем будущем, отличаются большей степенью обогащения (до 8%) и использованием оболочек с покрытием. Данные особенности потенциально могут вызывать проблемы с существующими системами хранения. В связи с этим возникает необходимость в изучении долгосрочных процессов, происходящих в этих видах топлива после их отработки, с целью проведения надлежащего анализа безопасности на всех этапах обращения с ними, включая хранение, транспортировку и захоронение.

92. В некоторых странах отработавшее топливо рассматривается как ценный энергетический ресурс и ведется разработка технологий его переработки. В настоящее время на уровне демонстрационных проектов происходит освоение усовершенствованных процессов многократного рециклирования плутония в легководных реакторах (CORAIL и MIX во Франции, РЕМИКС в Российской Федерации). Такое рециклированное топливо должно позволить более эффективно использовать природные ресурсы, снизить объемы и радиотоксичность образующихся ядерных отходов, а также уменьшить риски распространения.

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

С.1. Вывод из эксплуатации

Текущее состояние

93. В 2020 году были окончательно остановлены шесть ядерных энергетических реакторов: первый и второй энергоблоки АЭС «Фессенхайм» во Франции; второй энергоблок Ленинградской АЭС в Российской Федерации; первый энергоблок АЭС «Рингхальс» (BWR мощностью 881 МВт (эл.)) в Швеции; первый энергоблок АЭС «Дуэйн-Арнольд» и второй энергоблок АЭС «Индиан-Пойнт» в Соединенных Штатах Америки. Это меньше, чем в 2019 году, когда была прекращена эксплуатация 13 реакторов. В общей сложности на конец 2020 года в мире был окончательно остановлен либо выводился из эксплуатации 171 реактор. Из них из эксплуатации были выведены 20 реакторов. Кроме того, в мире были окончательно остановлены или выводились из эксплуатации 158 установок топливного цикла и 125 исследовательских реакторов. Примерно 131 установка топливного цикла и 446 исследовательских реакторов были выведены из эксплуатации.

Энергетические
реакторы



окончательно остановлены
или выводятся из эксплуатации



выведены из
эксплуатации

Установки
топливного
цикла



окончательно остановлены
или выводятся из эксплуатации



выведены из
эксплуатации

Исследовательские
реакторы



окончательно остановлены
или выводятся из эксплуатации



выведены из
эксплуатации

94. Самые масштабные программы по выводу из эксплуатации АЭС велись в Германии, Соединенных Штатах Америки и Японии. В Германии выводились из эксплуатации 26 АЭС, а останов остальных 6 действующих АЭС планируется осуществить до конца 2022 года. После получения в 2019 году лицензии на вывод из эксплуатации начался вывод из эксплуатации энергоблока В АЭС «Гундремминген» и второго энергоблока АЭС «Филиппсбург». В результате Великого восточнояпонского землетрясения 2011 года значительная часть парка японских АЭС была окончательно остановлена. В общей сложности в 2020 году 24 из 60 коммерческих АЭС Японии были окончательно остановлены или выводились из эксплуатации. В Соединенных Штатах Америки, где за последнее десятилетие в связи с нерентабельностью было окончательно остановлено несколько реакторов, в активной фазе находилось 18 программ вывода из эксплуатации. В рамках этих программ в отношении семи установок применялась стратегия немедленного демонтажа, еще семь установок находились в режиме безопасной консервации, а остальные четыре выводились из режима безопасной консервации для немедленного демонтажа. В 2020 году запланирован окончательный останов трех АЭС США: «Ла-Кросс» (шт. Висконсин), «Гумбольдт-Бей» (шт. Калифорния) и «Зайон» (шт. Иллинойс).

95. Был достигнут существенный прогресс в реализации проектов по выводу из эксплуатации АЭС в Чернобыле и Фукусиме. В сентябре 2020 года начались «горячие» испытания в новом промежуточном хранилище отработавшего ядерного топлива (рис. С-1) рядом с Чернобыльской АЭС и началась эксплуатация установки по освобождению отходов от регулирующего контроля промышленной мощностью 10 тонн в сутки.



РИС. С-1. Первый двустенный экранированный пенал, загруженный 93 сборками отработавшего топлива, отбывает с завода по переработке отработавшего топлива для размещения на столетнее хранение. (Фото: Государственное специализированное предприятие «Чернобыльская АЭС»)

96. Япония сообщила, что к августу 2020 года будет полностью очищена вода с пониженным содержанием стронция, ранее находившаяся в резервуарах в ожидании обработки с помощью усовершенствованной системы водоочистки (ALPS), и что эти резервуары будут использоваться повторно для хранения очищенной таким образом воды. Правительство Японии по-прежнему рассматривает несколько вариантов утилизации очищенной с помощью ALPS воды, включая выброс пара или сброс в море, но окончательное решение еще не принято.

97. Во Франции на площадке в Ла-Аг продолжался вывод из эксплуатации перерабатывающего завода UR2-400 компании «Орано» (рис. С-2) и велись работы по его демонтажу. Одновременно с этими работами на основном объекте рабочие группы приступили к извлечению хранящихся в бетонных бункерах 600 тонн отходов прошлой деятельности — графита и магния, используя для навигации систему сортировки на основе технологии искусственного интеллекта. Завершен демонтаж сухих перчаточных камер цеха аффинажа плутония. Начались другие работы по демонтажу второго диссольвера в бывшем здании цеха растворения и экстракции, а также механических горячих камер в бывшем цехе по изготовлению цезиевых источников. Химические камеры этого цеха были демонтированы в течение предыдущих трех лет с помощью дистанционно управляемого оборудования.



*РИС. С-2. Вид сверху на площадку компании «Орано» в Ла-Аг (Нормандия, Франция).
(Фото: «Орано»)*

98. Компания «Электрисите де Франс» начала сооружение демонстрационной установки для применения в целях вывода из эксплуатации графитовых реакторов. Эта установка (начало эксплуатации ожидается в 2022 году) упростит процесс испытания технологий демонтажа реакторов с графитовым замедлителем. В Российской Федерации «Росатом» для целей вывода из эксплуатации своих ранних уран-графитовых реакторов планировал применять в исключительных случаях стратегию изоляции и теперь сооружает демонстрационный центр для испытания такого подхода. Центр предполагается ввести в эксплуатацию в 2021 году.

99. «Согин» — итальянская государственная компания, отвечающая за вывод из эксплуатации, начала предварительные мероприятия по выводу из эксплуатации исследовательского реактора «ИСПРА-1» на площадке Объединенного исследовательского центра Европейской комиссии.

Тенденции

100. В прошлые десятилетия собственники установок в качестве стратегии вывода из эксплуатации в основном выбирали отсроченный демонтаж, однако сейчас все большее распространение получает подход, предполагающий немедленный демонтаж. Более того, окончательный демонтаж выведенных из эксплуатации станций начинается все раньше, и ряд стратегий предусматривает замену отсроченного демонтажа на немедленный. Это изменение обусловлено желанием уменьшить неопределенность в отношении расходов на вывод из эксплуатации.

101. Все чаще привлекаются консорциумы, которые специализируются на выводе из эксплуатации и обращении с отходами и которые заинтересованы в том, чтобы осуществлять целые проекты по выводу из эксплуатации. Например, недавно в Соединенных Штатах Америки были случаи, когда энергопредприятие передавало ответственность по лицензии и средства на вывод из эксплуатации в полном объеме консорциуму, который занимается выводом из эксплуатации и в свою очередь берет на себя полную ответственность за осуществление проекта.

102. Другая тенденция — более широкое использование цифровизации, робототехники и автоматизации, в том числе для планирования и имитационного моделирования, управления конфигурацией станции и знаниями, а также для содействия в извлечении отходов, характеризации и демонтаже.

103. Во многих случаях вывод из эксплуатации затруднен из-за отсутствия решения об окончательном захоронении отработавшего ядерного топлива или отсутствия хранилища радиоактивных отходов. В результате на площадках подлежащих выводу из эксплуатации установок или рядом с ними возводятся хранилища отработавшего топлива и радиоактивных отходов — данная мера получила широкое распространение, поскольку она позволяет выводить объект из эксплуатации даже при отсутствии места постоянного захоронения этих материалов. Так, в Германии компания БГЦ, занимающаяся промежуточным хранением, берет на себя полную ответственность за долгосрочное хранение отработавшего топлива и радиоактивных отходов, чтобы демонтажные работы можно было начинать как можно скорее.

С.2. Восстановление окружающей среды

Текущее состояние

104. В 2020 году в связи с пандемией COVID-19 деятельность по восстановлению окружающей среды велась в ограниченном объеме. Тем не менее она продолжалась на тех площадках, где присутствовал значительный риск для людей или окружающей среды или где была возможность экономически оправданного повторного использования этих площадок.

105. На объекте Шекафтар в Кыргызстане началось восстановление окружающей среды после закрытия шести шахт и перемещения пяти площадок с отвалами пустой породы в более удаленное место, где уже есть площадка для хранения пустой породы. Будет изъято примерно 700 000 кубометров отходов горнодобывающей деятельности, которые находятся в окрестностях местной деревни и которые будут затем стабилизированы в новом месте для защиты людей и охраны окружающей среды. Эта работа финансировалась по линии Счета экологической реабилитации в Центральной Азии Европейского банка реконструкции и развития и является частью более широкого Стратегического мастер-плана восстановления окружающей среды на площадках уранового наследия в Центральной Азии. В течение 2020 года осуществление проектов по рекультивации в Кыргызстане (объект Мин-Куш) и Таджикистане (Желтый курган и хвостохранилища 1-4 на Истиклоле), осуществляемых в рамках межправительственной программы Содружества Независимых Государств по рекультивации, продолжалось в соответствии с планом.

106. В Соединенных Штатах Америки завершено удаление оставшихся строительных плит на территории бывшего Окриджского газодиффузионного завода (рис. С-3), что позволило регулирующим органам начать процесс выдачи разрешений на передачу площадки местной общественности для ее экономического развития. По завершении работ станет возможна передача свыше 500 гектаров земли для использования в новых целях в составе национального исторического парка «Манхэттенский проект».



РИС. С-3. Ход выполнения работ по восстановлению окружающей среды на территории бывшего Окриджского газодиффузионного завода в Ок-Ридже (шт. Теннесси, Соединенные Штаты Америки). (Фото: Министерство энергетики США)

Тенденции

107. На многих площадках переходу к долгосрочному обращению и управлению как решению по оптимизации способствовал упор на технологии характеристики и мониторинга.

108. В 2020 году наблюдалась основная тенденция: более частое применение концепции безотходной экономики к обращению с остаточными веществами, содержащими радиоактивный материал природного происхождения (РМПП). При этом для экономии первичных ресурсов основное внимание уделяется вторичным ресурсам, которые могут использоваться неоднократно. Наглядным примером этой тенденции служит недавнее разрешение Управления по охране окружающей среды США на использование фосфогипса в государственных проектах дорожного строительства. Для более широкого применения аналогичных подходов потребуются конструктивные партнерские отношения, которые могут привести к появлению новаторских решений, затрагивающих также социальные и нормативные аспекты.

109. В рамках проекта «Развитие гамма-спектрометрии с использованием беспилотных летательных аппаратов для изучения и мониторинга бывших урановых объектов (ДУБ-ГЕМ)» состоялся первый испытательный полет. Цель этого исследовательского проекта, который финансируется Федеральным министерством образования и научных исследований Германии, — оказывать помощь в характеристике бывших урановых объектов в Центральной Азии. Как правило с помощью относительно небольших гамма-спектрометров, устанавливаемых на беспилотных летательных аппаратах малого размера, исследуются сильно загрязненные территории, однако сейчас изучается возможность использования такой компоновки для изучения территорий с низкими уровнями радиоактивного загрязнения. В рамках новых систем будет изучаться возможность использования более крупных детекторов, беспилотных летательных аппаратов с увеличенным взлетным весом (до 25 кг) и новых материалов — сцинтилляционных кристаллов, например, бромида церия. Разработка данной технологии позволит ускорить обследование участков радиоактивного загрязнения в труднодоступных и труднопреодолимых горных районах или на больших территориях.

110. Имеющийся в ядерной отрасли опыт обращения с загрязненными материалами активно используется в других отраслях, в которых ведутся работы с РМПП. Например, вывод из эксплуатации нефтегазовых платформ — важное событие в сфере промышленной деятельности, связанной с РМПП. На внешнем континентальном шельфе Соединенных Штатов Америки действуют примерно 1885 добывающих платформ, и возраст более 60% из них превышает 25 лет. По оценкам, с 2016 по 2021 год в мире будет выведено из эксплуатации около 600 морских объектов.

С.3. Обращение с радиоактивными отходами

Текущее состояние

111. Были достигнуты новые крупные успехи в создании пунктов глубокого геологического захоронения высокоактивных отходов и отработавшего топлива, заявленного как отходы. Сюда относятся более точная оценка и заблаговременное планирование необходимых ресурсов, в том числе разработка и реализация подходов к выбору площадки с использованием научно-технических достижений, взаимодействие с заинтересованными сторонами, а также последовательное выделение соответствующих ресурсов.

112. В Объединенных Арабских Эмиратах создан целевой фонд, предназначенный для финансирования будущих обязательств в сфере обращения с отходами; это первый пример страны, в которой подобные механизмы финансирования созданы еще до подключения первой АЭС к электросети.

113. Правительство Австралии объявило о создании Австралийского агентства по обращению с радиоактивными отходами (АРВА), что представляет собой следующий важный шаг в развитии возможностей Австралии по обращению с радиоактивными отходами. АРВА будет работать с такими заинтересованными сторонами, как промышленность, общественность и государственные органы, с тем чтобы оптимальным образом организовать обращение с радиоактивными отходами. Комитет по законодательству Сената Австралии рекомендовал парламенту Австралии принять законопроект 2020 года, содержащий поправку о национальном обращении с радиоактивными отходами (спецификация площадки, общественный фонд и другие меры). В проекте предлагается разместить установку для обращения с отходами низкого и среднего уровней активности в городе Напанди, штат Южная Австралия.

114. Агентство по радиоактивным отходам и обогащенным делящимся материалам Бельгии провело консультации с общественностью по предлагаемому национальному плану окончательного захоронения высокоактивных и/или долгоживущих радиоактивных отходов, в котором рекомендуется геологическое захоронение.

115. Управление по радиационной и ядерной безопасности Финляндии уведомило компетентные органы стран, поставляющих уран на финские АЭС, что в середине 2020-х годов Финляндия намерена приступить к окончательному захоронению отработавшего ядерного топлива. Поскольку после окончательного захоронения обычные инспекции ядерных материалов невозможны, необходимо уточнить процедуры, связанные с такими инспекциями, до начала окончательного захоронения. В 2024 году планируется начать процесс захоронения в хранилище «Онкало» в Финляндии, которое строится на глубине более 400 метров ниже уровня земли (рис. С-4). Франция и Швеция участвуют в процессе лицензирования своих объектов глубокого геологического захоронения на выделенных площадках. Ряд других стран, в том числе Соединенное Королевство, Соединенные Штаты Америки, Франция, Швейцария и Япония, постепенно продвигаются вперед в реализации своих проектов по глубокому геологическому захоронению.



РИС. С-4. Процесс захоронения в хранилище «Онкало» в Финляндии планируется начать в 2024 году. В ноябре 2020 года «Онкало» посетил Генеральный директор МАГАТЭ Рафаэль Мариано Гросси. (Фото: TVO/Тапани Карьянлахти)

116. В Соединенном Королевстве Управление по выводу из эксплуатации ядерных объектов (УВЭ) опубликовало проект стратегии обращения с радиоактивными отходами, вывода из эксплуатации и восстановления окружающей среды на бывших объектах. В ходе консультаций с населением, которые длились более 12 недель, всем заинтересованным сторонам было предложено представить замечания, вопросы и отзывы о проекте документа. УВЭ объявило также о создании рабочей группы в Коупленде (графство Камбрия), которая в качестве первого шага многолетнего консенсусного процесса выбора площадки для пункта геологического захоронения будет обсуждать с местным населением соответствующие события и возможности. Кроме того, началось строительство установки с изменяемой конфигурацией на площадке «Традебе Инутек» в Винфрите для обращения с отходами низкого и пограничного среднего уровней активности.

117. Национальное объединение по захоронению радиоактивных отходов Швейцарии («Награ») рекомендовало построить установку по герметизации отработавшего топлива или в будущем национальном хранилище, или в пункте промежуточного хранения компании «Цвилаг» в Вюренлингене («Цвилаг») (рис. С-5).



РИС. С-5. В контейнерном хранилище компании «Цвилаг» в Швейцарии хранятся остеклованные высокоактивные отходы, поступающие с заводов по переработке, и отработавшие твэлы, поступающие с швейцарских АЭС. (Фото: «Цвилаг»)

118. В Соединенных Штатах Америки Министерство энергетики разрешило начало эксплуатации установки по переработке солевых отходов на площадке «Саванна-Ривер» для переработки высокоактивных жидких отходов, хранящихся в емкостях.

119. В Германии в ходе первого этапа национального процесса выбора площадки опубликован перечень районов, потенциально пригодных для захоронения высокоактивных отходов. С использованием этого перечня и по результатам отбора, проведенного Федеральной компанией по захоронению радиоактивных отходов, определено 90 районов, покрывающих 54% территории страны, которые потенциально пригодны для геологического захоронения согласно критериям выбора площадки и научному подходу, применяемому в соответствии с немецким законодательством с 2017 года.

120. Организация по обращению с ядерными отходами Японии инициировала исследование печатных источников в двух муниципалитетах, расположенных на Хоккайдо, в городе Суццу и деревне Камэнай, чтобы оценить, есть ли в них площадки, потенциально подходящие для глубинного геологического хранилища, в качестве первого шага в процессе выбора площадки для такого объекта. Город Суццу принял решение подать заявку на проведение исследования печатных источников, а деревня Камэнай приняла предложение правительства страны о проведении исследования.

121. Канадская организации по обращению с ядерными отходами получила в распоряжение свыше 600 га земли для проведения исследований в муниципалитете Саут-Брюс, Онтарио — одной из двух общин потенциального размещения глубинного геологического хранилища отработавшего ядерного топлива Канады. Федеральное правительство также инициировало процесс широкого участия в модернизации политики Канады в области радиоактивных отходов.

Тенденции

122. В международном сотрудничестве все больше внимания уделяется научно-исследовательским, опытно-конструкторским и демонстрационным работам (НИОКДР), касающимся вопросов обращения с радиоактивными отходами. Прогресс, наблюдавшийся во многих странах Европейского союза, был обусловлен их обязательством соблюдать рамочную директиву «Об отходах».

123. «Технологическая платформа для осуществления геологического захоронения радиоактивных отходов», самофинансируемый консорциум организаций, которые занимаются обращением с радиоактивными отходами и сотрудничают по вопросам НИОКДР, представляющим общий интерес, опубликовал свою обновленную программу стратегических исследований с акцентом на эффективность и промышленное освоение будущего строительства глубоководных геологических хранилищ, а также на разработку дополнительных конструктивных решений для захоронения радиоактивных отходов меньшего объема.

124. Европейская совместная программа обращения с радиоактивными отходами (ЕВРАД) представила заинтересованным конечным пользователям свою комплексную «дорожную карту». В ней отражен структурированный подход к обращению с радиоактивными отходами в конечных пунктах, предусматривающий анализ пробелов и дальнейших потребностей в сфере НИОКДР, проведение стратегических исследований, в рамках которых особое внимание уделяется обращению с радиоактивными отходами небольшого объема, и управление знаниями, а также подчеркивается важность подготовки кадров и передачи знаний.

125. Европейский союз приступил к реализации проекта ПРЕДИС («Обращение с радиоактивными отходами перед их захоронением»), ориентированного на проведение НИОКДР, которые необходимы для обращения с потоками радиоактивных отходов (помимо ядерного топлива и высокоактивных радиоактивных отходов) и их кондиционирования перед захоронением.

126. Рабочая группа Европейской организации по созданию пунктов захоронения (ЕОСПЗ) приступила к реализации проекта по сотрудничеству, в котором участвуют Дания, Нидерланды, Норвегия, Словения и Хорватия, чтобы координировать усилия по оценке применимости скважинного захоронения запасов высокоактивных отходов.

127. Обнадеживающей тенденцией является растущее число успешных примеров в сфере обращения с отходами. В Швеции муниципальный совет Эстхаммара проголосовал за строительство планируемого хранилища отработавшего ядерного топлива в Форсмарке (рис. С-6) Шведской компанией по обращению с ядерным топливом и отходами (СКБ). Окончательное решение по одобрению проекта будет приниматься правительством Швеции.

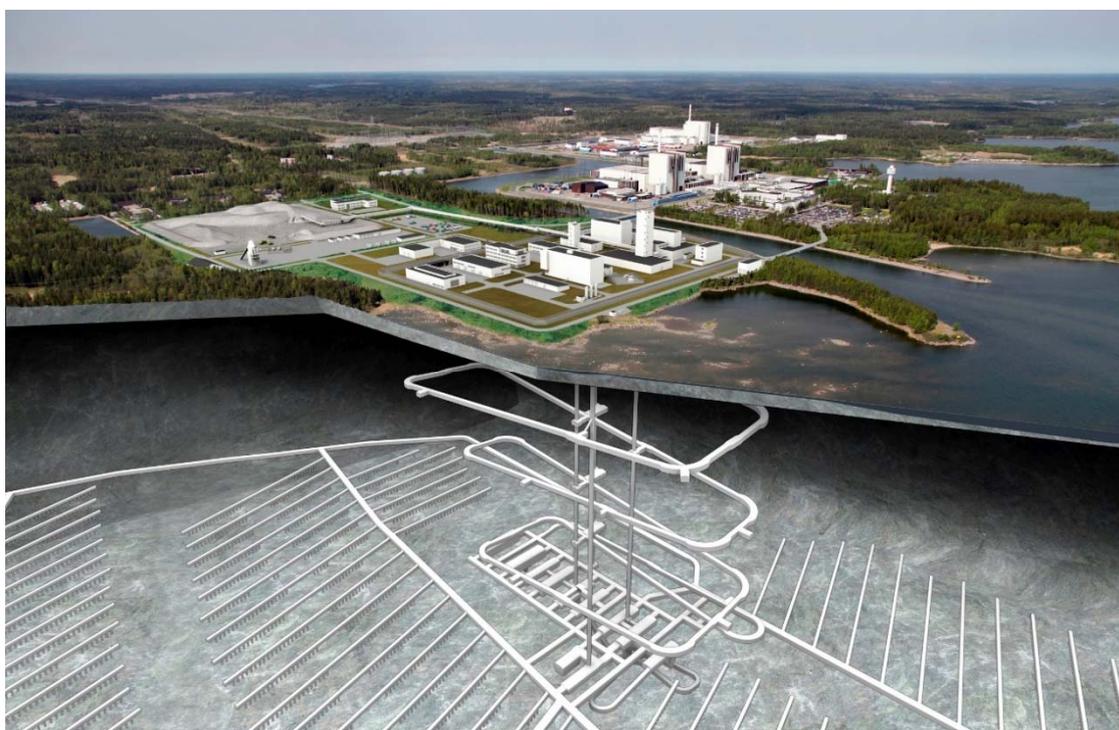


РИС. С-6. Художественное изображение пункта подземного захоронения в Форсмарке.
(Источник: СКБ)

128. Во Франции была выдана лицензия на эксплуатацию установки по кондиционированию и хранению активированных отходов ИСЕДА, что позволило «Электрисите де Франс» заниматься кондиционированием и хранением радиоактивных отходов в рамках подготовки к их дальнейшему захоронению одним из многих способов, применяемых в стране.

129. К концу 2020 года в общей сложности 42 государства-члена назначили странового координатора Информационной системы по вопросам обращения с отработавшим топливом и радиоактивными отходами, а 83 государства-члена выступили договаривающимися сторонами Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами.

D. Исследовательские реакторы и ускорители частиц

D.1. Исследовательские реакторы

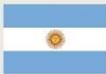
Текущее состояние

130. Во время пандемии COVID-19 для того, чтобы свести последствия связанных с ней ограничений к минимуму, исследовательские реакторы, которые производят медицинские радиоизотопы, поставляемые по всему миру, были признаны оказывающими важнейшие услуги. Все организации — операторы реакторов приняли упреждающие меры по обеспечению безопасности установок и персонала. Некоторые исследовательские институты и университеты, в которых эксплуатируются исследовательские реакторы, предназначенные для ведения учебно-образовательной и научной работы, временно остановили свои установки и поддерживали их в состоянии безопасного останова. На фоне ограничений, связанных с COVID-19, усложнилась транспортировка радиоизотопов, о чем свидетельствует проведенное Агентством обследование основных производителей медицинских радиоизотопов, использующих реакторы, в ходе которого оценивалось влияние пандемии на непрерывность цепи поставок. Секретариат организовал для государств-членов неофициальный технический брифинг по производству радиоизотопов в исследовательских реакторах, использованию медицинских циклотронов, транспортировке и производству радиофармацевтических препаратов, а также спросу на радиофармацевтические препараты по время пандемии COVID-19.

131. Одиннадцать новых исследовательских реакторов сооружаются в восьми странах: Аргентине, Бразилии, Индии, Республике Корея, Российской Федерации, Саудовской Аравии, Украине (электроядерная система) и Франции. Ряд государств-членов приняли официальные планы по строительству новых исследовательских реакторов, включая Бангладеш, Беларусь, Бельгию, Боливию, Вьетнам, Замбию, Китай, Нигерию, Нидерланды, Соединенные Штаты Америки, Таджикистан (завершение строительства реактора «Аргус-ФТИ») и Таиланд. Другие страны, в частности Азербайджан, Гана, Кения, Малайзия, Монголия, Мьянма, Нигер, Объединенная Республика Танзания, Сенегал, Судан, Тунис, Филиппины, Эфиопия и Южная Африка, рассматривают вопрос о строительстве новых установок.

Проекты по созданию новых исследовательских реакторов

11 новых исследовательских реакторов (ИР)
строятся в **8** странах

	Аргентина		Республика Корея
	Бразилия		Российская Федерация
	Франция		Саудовская Аравия
	Индия		Украина

имеют официальные планы
по строительству новых ИР

	Бангладеш		Нигерия
	Беларусь		Таджикистан
	Бельгия		Таиланд
	Боливия		Соединенные Штаты
	Китай		Вьетнам
	Нидерланды		Замбия

рассматривают
возможность строительства ИР

	Азербайджан		Нигер
	Эфиопия		Филиппины
	Гана		Сенегал
	Кения		Южная Африка
	Малайзия		Судан
	Монголия		Тунис
	Мьянма		Танзания

132. Без исследовательских реакторов по-прежнему невозможно производство радиоизотопов для медицины и промышленности, генерирование пучков нейтронов для исследований материалов и неразрушающих испытаний, оказание частному и государственному секторам услуг по анализу данных и облучению, а также проведение исследований в сфере культурного наследия и окружающей среды. Они вносят стратегический вклад в образование и подготовку кадров (рис. D-1). В таблице D-1 в приложении указаны наиболее распространенные виды применения исследовательских реакторов.



*РИС. D-1. Исследовательские реакторы могут использоваться в целом ряде областей — от образования и подготовки кадров до промышленности, медицины и других применений.
(Фото: МАГАТЭ)*

133. Цифровая нейтронная визуализация обычно проводится с применением высокоинтенсивных источников нейтронов, однако теперь в широко распространенных областях применения нейтронной визуализации, например, в радиографии и компьютерной томографии (КТ), могут использоваться источники нейтронов более низкой интенсивности, в которых плотность нейтронного потока в активной зоне составляет около $10^{12} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$. Этого удалось достичь благодаря недавно достигнутому прогрессу в астрономических камерах, приведшему к разработке сравнительно простых недорогих цифровых систем нейтронной визуализации. В стандартных областях применения качество изображений находится на конкурентном уровне, и его достаточно примерно в 80% всех случаев применения (рис. D-2). Благодаря этому в ядерной визуализации смогут шире использоваться источники нейтронов более низкой интенсивности на основе как реакторов, так и ускорителей. В 2020 году Агентство запустило электронный учебный курс по нейтронной визуализации, в котором учитывается такое расширение использования.

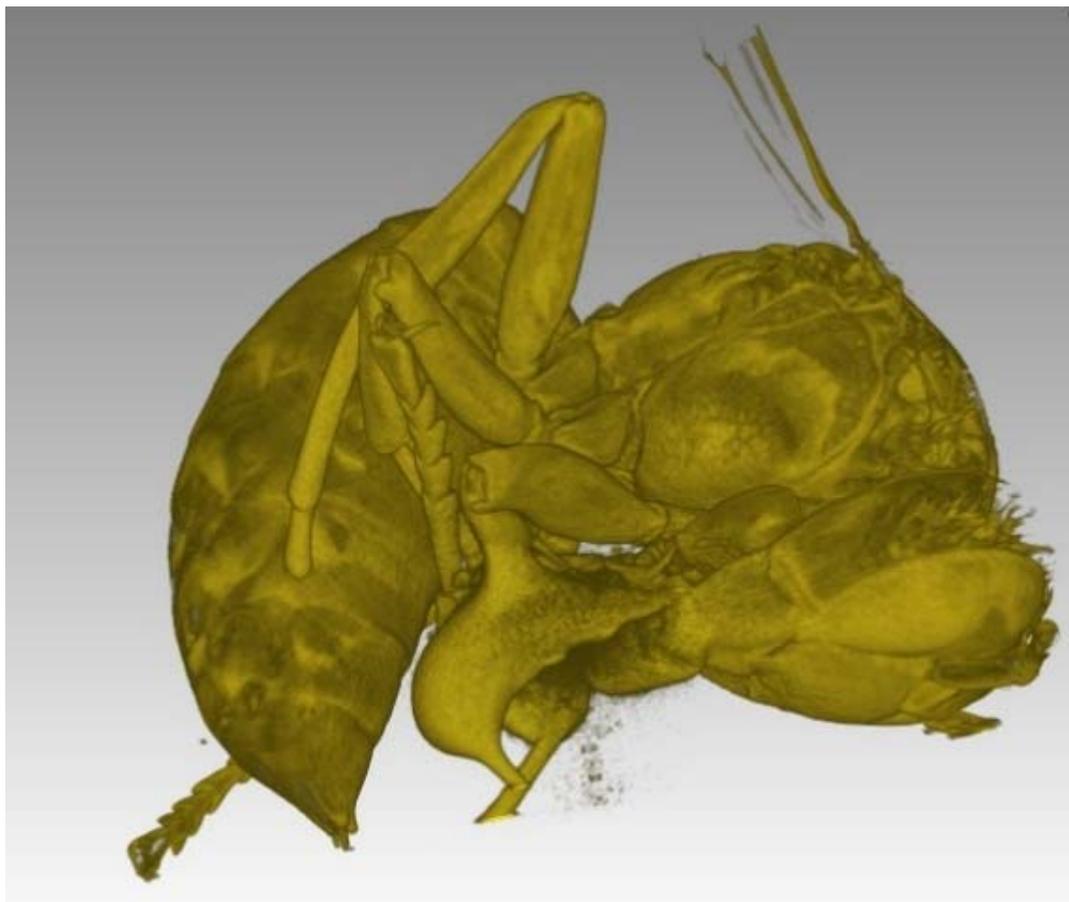


РИС. D-2. Трехмерная компьютерная томограмма шерсти в высоком разрешении (Фото: Буркхард Шиллингер, Мюнхенский технический университет, Германия)

134. На сегодняшний день 107 исследовательских реакторов и четыре установки по производству медицинских изотопов были переведены с использования высокообогащенного урана (ВОУ) на НОУ, или же было подтверждено их закрытие. В 2020 году Казахстан устранил последний имевшийся необлученный ВОУ путем снижения степени его обогащения ниже 20% и продолжил подготовку к удалению и утилизации облученного ВОУ-топлива. Всего по линии международных программ было произведено удаление и подтверждена утилизация приблизительно 6815 кг ВОУ из Китая, России, США и других стран.

135. Продолжали предприниматься международные усилия, направленные на то, чтобы производители медицинских изотопов использовали НОУ-мишени вместо ВОУ-мишеней. В Бельгии Национальный институт радиоэлементов приступил к коммерческим поставкам молибдена-99, произведенного с помощью НОУ, наряду с другими мировыми лидерами — производителями этого радиоизотопа, крайне востребованного в медицине, и планирует увеличить производство Мо-99, получаемого без ВОУ, и полностью перейти на использование НОУ к 2022 году.

Тенденции

136. Во всем мире продолжился рост интереса к исследовательским реакторам. Многие страны пользуются возможностями, позволяющими получить доступ к существующим исследовательским реакторам, в том числе по линии региональных курсов Агентства по исследовательским реакторам для создания потенциала, а также в рамках концепции международного центра МАГАТЭ на базе исследовательского реактора (ИСЕРР). В 2020 году соответствующий статус был присвоен Институту ядерных исследований в Питешти, Румыния, а французский Комиссариат по атомной энергии и альтернативным источникам энергии получил его повторно на пять лет. Выросла значимость инструментов электронного обучения и наращивания потенциала, таких как реакторная интернет-лаборатория Агентства: усилились интерес и поддержка со стороны как Секретариата, так и государств-членов.

137. Возраст более 60% действующих исследовательских реакторов во всем мире превышает 40 лет. Их жизненный цикл может достигать или превышать 60 лет, однако в этой связи первостепенное значение имеет своевременная реализация надлежащих программ по управлению их старением, ремонту и модернизации. Ввиду общей тенденции к сокращению финансирования таких установок, а также недостаточного планирования замещения мощностей большую важность приобретают рациональные системы управления, эксплуатация и техническое обслуживание и программы управления жизненным циклом, благодаря чему исследовательские реакторы могут выполнять свою задачу экономически эффективным образом.

D.2. Ускорители частиц и контрольно-измерительные приборы

Текущее состояние

138. В последнее десятилетие многие государства-члены проявляли растущий интерес к разработке компактных источников нейтронов на базе ускорителей (КИНУ) в качестве альтернативы стареющему парку исследовательских реакторов малой и средней мощности: осуществлялось более 50 таких проектов примерно в 20 странах по всему миру. КИНУ включают различные классы ускорителей, цель которых — обеспечивать поток нейтронов в диапазоне от 10^{11} до $10^{13} \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ для использования в различных целях. В 2020 году Центр им. Гельмгольца в Юлихе (Германия) закончил концептуальный проект компактного источника нейтронов на базе сверхточного линейного ускорителя протонов, который будет выполнять функцию национальной установки по рассеянию нейтронов. Такой относительно недорогой и компактный источник нейтронов, который не нуждается в значительной инфраструктуре, может использоваться в различных приборах для решения аналитических задач и будет пригоден для университетов и частного сектора, благодаря чему нейтронно-пучковые методы могут стать более доступными и распространенными.

139. На рис. D-3 приведен другой пример высокоинтенсивного нового сверхпроводящего линейного ускорителя и помещений для проведения экспериментов. На этой установке под названием SPIRAL2, которая в настоящее время вводится в эксплуатацию в Национальном исследовательском центре большого ускорителя тяжелых ионов (GANIL) во Франции, будут испытываться короткоживущие тяжелые ядра и изучаться применения в сфере ядерного деления, термоядерного синтеза и материаловедения с помощью пучков заряженных частиц и нейтронов. Создаваемые линейным ускорителем пучки легких ионов, в том числе альфа-частицы и литий-6 или литий-7, которые сталкиваются с мишенями из свинца и висмута, будут использоваться также для анализа более эффективных методов производства некоторых радиоизотопов для лечения рака.

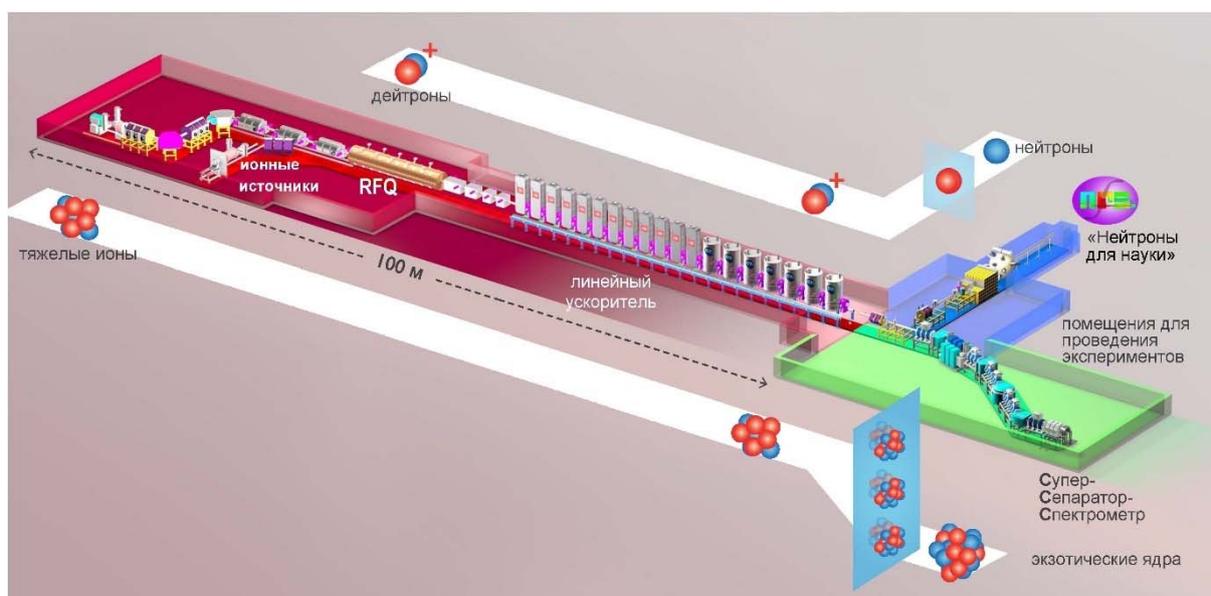


РИС. D-3. Установка SPIRAL2 на основе сверхпроводящего линейного ускорителя высокой мощности (200 кВт). Тракт пучка «Нейтроны для науки» позволит создавать пучки нейтронов не достигавшейся ранее интенсивности в энергетическом диапазоне от 1 до 40 МэВ — это вплоть до двух порядков выше, чем на других аналогичных установках.
(Изображение: Алахари Навен, GANIL, Франция)

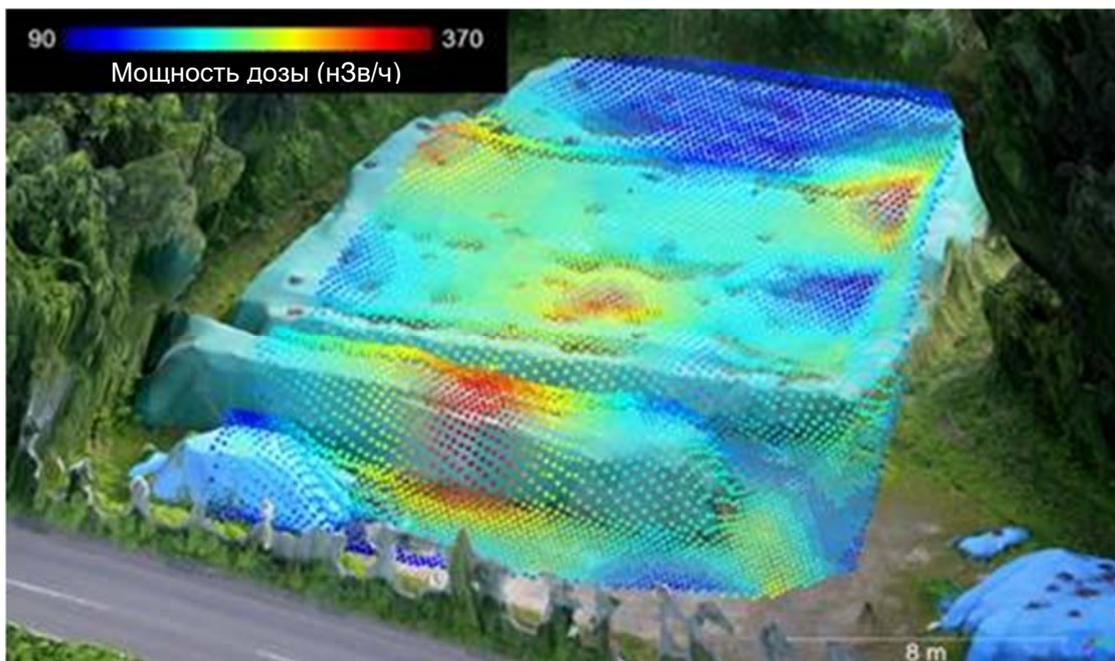
140. На рис. D-4 показан другой проект с использованием сверхпроводящего линейного ускорителя протонов/дейтронов высокой мощности (200 кВт), в котором начинается второй этап: повышение энергии с 5 до 40 МэВ с ожидаемой интенсивностью источников нейтронов до 10^{15} н/с, которые могут применяться в различных областях, в том числе в фундаментальных исследованиях с использованием нейтронов.



РИС. D-4. Сверхпроводящий линейный ускоритель протонов/дейтронов высокой мощности (200 кВт) (слева), в котором используется инновационная технология производства нейтронов с помощью мишеней с жидким литиевым слоем (справа).
(Изображение: Дэн Берковиц, Центр ядерных исследований «Сорек», Израиль)

141. В Финляндии Университетская больница Хельсинки завершает этап ввода в эксплуатацию компактного источника нейтронов на основе ускорителя протонов (электростатический ускоритель на 2,6 МВ, рассчитанный на работу при 30 мА) для применения в медицинских целях, в первую очередь для начала испытаний бор-нейтронзахватной терапии и впоследствии для лечения пациентов. Нейтроны производятся на вращающейся литиевой мишени.

142. Произошло важное изменение, касающееся датчиков излучения, используемых на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА). Все чаще вместо простых счетчиков Гейгера–Мюллера используются гамма-спектрометрические системы с детекторами-сцинтилляторами, например, на основе бромида лантана (III) (LaBr_3) или бромида церия (III) (CeBr_3). Недавно был достигнут успех в области детектирования излучения для радиологического картирования с помощью БПЛА: на рынке появились сцинтилляционные детекторы на основе кремниевых фотоумножителей со встроенным генератором напряжения смещения с температурной компенсацией и предусилителем. Это обеспечивает быструю обработку цифрового сигнала детектора и обработку всех измеряемых данных в реальном времени с географической привязкой посредством высокоточных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) для получения карт уровней излучения высокого разрешения (рис. D-5) и идентификации радиоизотопов.



*РИС. D-5. Радиологическая карта высокого разрешения (красный цвет свидетельствует о повышенной мощности дозы) в сочетании с трехмерной аэрофотограмметрией. Карта была получена с помощью одного БПЛА, совершившего два полета.
(Изображение: МАГАТЭ)*

Тенденции

143. Активнее ведутся разработки в области систем радиационного мониторинга на основе БПЛА/дронов, главным образом благодаря повышению доступности технологий БПЛА и разработке миниатюрных детекторов излучения в сочетании с ГНСС и быстрыми алгоритмами обработки данных. Растущие требования к гибкости и функциональности мобильных систем мониторинга ведут к тому, что приоритетное внимание уделяется решениям на основе БПЛА для радиологического картирования в опасных или недоступных для человека районах, поиска источников излучения, а также оперативного реагирования в случае радиационных инцидентов или аварий. Повышается устойчивость БПЛА к различным условиям эксплуатации, например, к воздействию температуры и влажности, а также их водо- и/или пыленепроницаемость. Кроме того, растет их автономность благодаря наличию более подходящих вариантов для обеспечения длительного времени полета, замерам параметров окружающей среды, более совершенным возможностям картирования, а также алгоритмам обработки данных, улучшенным с помощью искусственного интеллекта.

144. Подходы, основанные на машинном обучении, могут принести большую пользу в деле развития ядерной науки и применений в ряде областей, таких как стадирование рака в ядерной медицине и лечение рака с помощью лучевой терапии; ускорения прогресса в исследовании термоядерного синтеза; а также защиты окружающей среды (в частности, глобальных водных ресурсов) от чрезмерной эксплуатации и загрязнения. Совсем недавно был неоднократно продемонстрирован потенциал сбора криминалистически значимой информации в создании технологических решений для борьбы с преступностью в различных странах. Ключевым аспектом криминалистической экспертизы является трасология. В криминалистике все чаще применяются алгоритмы машинного обучения, помогающие дать ответы на вопросы, ранее остававшиеся неразрешенными. Методы машинного обучения могут также использоваться в качестве средства выявления закономерностей и классификации различных образцов, становясь ценным инструментом решения таких вопросов.

145. Например, при криминалистическом анализе стекла обычно сопоставляется элементарная интенсивность его образцов. Если фрагменты битого стекла достаточно большие, криминалисты могут восстановить их изначальную форму и происхождение, однако в отношении малых фрагментов традиционными методами этого достичь невозможно. В таких случаях можно доказать факт присутствия подозреваемого на месте преступления, используя такие ядерные аналитические методы, как индуцированное протонами рентгеновское излучение и нейтронно-активационный анализ в сочетании с инструментами машинного обучения и базами данных (инвентарной ведомостью) по производству стекла (рис. D-6).

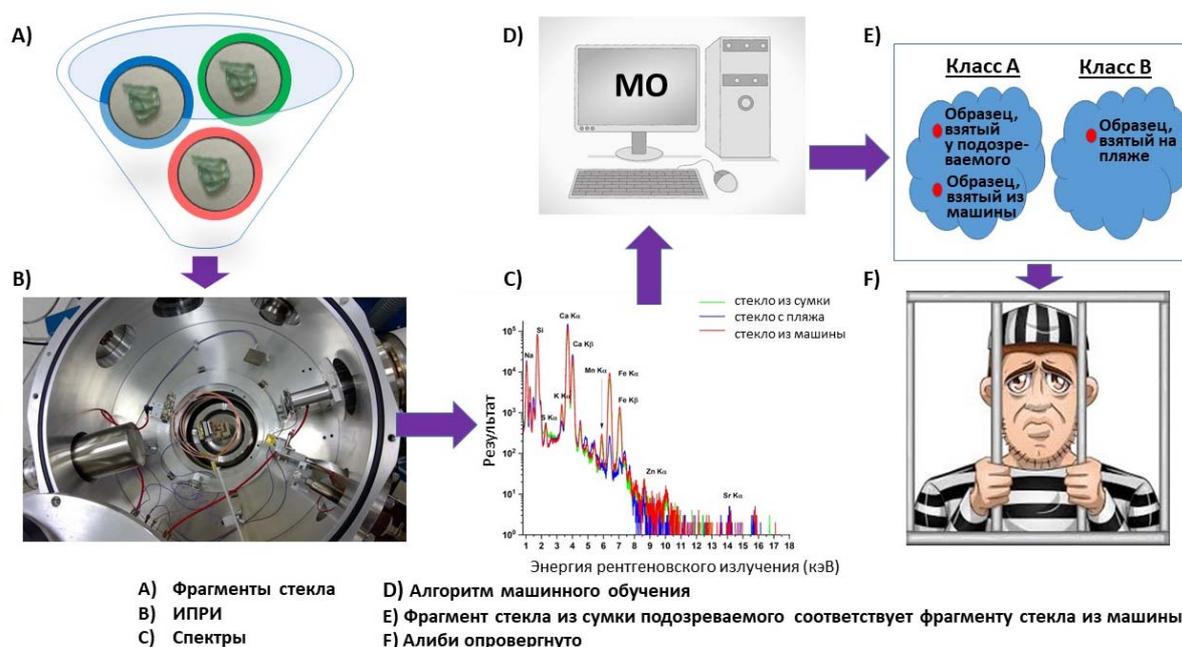


РИС. D-6. Принцип работы с использованием машинного обучения. Сначала образцы собираются на месте преступления (А) и направляются на элементарный анализ посредством ИПРИ (В). Результаты измерений анализируются и затем (С) передаются в модели машинного обучения (D), создающие классификации образцов (Е). На основании этой информации полицейские следователи могут подтвердить или опровергнуть алиби. На (Е) рассматривается случай, когда водитель сбил человека и скрылся с места преступления: фрагмент, обнаруженный на подозреваемом, и фрагмент сбитой человека машины отнесены к одному классу, а фрагмент с пляжа — к другому, что указывает на наличие связи между подозреваемым и сбитой человека машиной. (Изображение: Университет им. Бар-Илана и Институт нанотехнологий и современных материалов при университете, Израиль)

Е. Продовольствие и сельское хозяйство

Е.1. Использование изотопного мечения и инновационных ядерных методов для измерения содержания остатков вредных веществ в пищевых продуктах: удовлетворение потребностей в сфере общественного здравоохранения и торговли

Положение дел

146. В процессе производства продовольствия во всем мире используются различные химические вещества, такие как ветеринарные препараты и пестициды, включая гербициды, однако присутствие в пище остатков этих химических веществ представляет угрозу для здоровья населения и для торговли, следовательно, должно быть предметом регулирования с помощью норм, известных как максимально допустимые уровни (МДУ), определяющие наибольшую разрешенную концентрацию остатков в пище или на ее поверхности. МДУ влияют на торговлю, а уровни, установленные Комиссией «Кодекс Алиментариус», учитываются в Соглашении по применению санитарных и фитосанитарных мер Всемирной торговой организации. Согласованные МДУ выгодны правительствам, сельхозпроизводителям, коммерсантам и общественности. При отсутствии договоренностей по МДУ возникают существенные препятствия для торговли⁶. По ряду веществ, используемых при производстве продовольствия, МДУ в настоящее время отсутствуют.

147. Чтобы определить МДУ для ветеринарных препаратов и тем самым устранить пробелы в продовольственных стандартах, требуется информация по результатам исследований, посвященных метаболизму у животных (элиминации остаточных веществ), с использованием материалов, меченных радиоизотопами. Ядерные методы, среди прочего, могут обеспечивать необходимую для исследований в области метаболизма степень прослеживаемости и точности измерений.

148. Лекарственные препараты или соответствующие соединения, меченные такими радиоизотопами, как углерод-14, сера-35, фосфор-32 и водород-3, вводятся исследуемым сельскохозяйственным животным и используются для отслеживания локализации таких препаратов в организме и расщепления их на остаточные вещества и основные метаболиты, особенно в тканях, которые пригодны к употреблению в пищу (например, мышцы, печень, почки и жир). Исследования с использованием радиоизотопных меток, считающиеся «золотым стандартом» исследований метаболизма, находят применение в клинической и ветеринарной фармакологии и в агрохимии и позволяют получить данные, которые упрощают проведение оценки безопасности и тем самым способствуют защите потребителей. Для определения уровня радиоактивности в настоящее время животные ткани сжигаются и переводятся в растворимое состояние, что требует надежных и точных методов измерения, с помощью которых можно установить тип и концентрацию остаточных веществ.

Тенденции

149. Во всем мире происходят изменения в вопросе использования химических препаратов в сфере производства продовольствия. Каждый год разрабатываются новые лекарственные средства/химические препараты для решения новых проблем. Соответственно, увеличивается потребность в нормативном регулировании этих химических препаратов, для чего требуются радиоизотопные исследования, которые в данном случае являются безальтернативными. Ведущая роль отводится меченым радиоизотопами соединениям, которые позволяют отслеживать и изучать все остаточные химические вещества в различных тканях.

150. Для анализа и характеристики меченных радиоизотопами соединений в животных тканях в рамках исследований метаболизма необходимы такие инструменты и методы, как спектроскопия ядерного магнитного резонанса для выявления водорода-3 и углерода-13,

⁶ Коалиция Международной агропродовольственной сети за расширение Кодекса, сайт доступен по ссылке: <https://agrifood.net/iafn-codex-coalition>.

жидкостно-сцинтилляционная спектрометрия и радиорецепторный/радиоиммунный анализ. Для получения точных данных также требуются инновационные и экономически эффективные ядерно-аналитические технологии/методы, такие как сравнительный радиорецепторный анализ и другие, поддерживаемые масс-спектрометрией высокого разрешения. Дополнительным диагностическим инструментом все чаще становятся также новые технологии в области автордиографии, которые облегчают количественный анализ и визуализацию распределения радиоактивных веществ в тканях и органах без их повреждения.

151. В последнее время сообщается о том, что введение ветеринарных препаратов животным, выращиваемым в продовольственных целях, может приводить к накоплению в тканях некоторых остаточных веществ, которые с трудом поддаются экстракции и поэтому не обнаруживаются при лабораторном анализе пищевых продуктов, предназначенных для потребления людьми. Эти остаточные вещества могут оказывать токсическое воздействие на потребителей. Соответственно, требуется разработать инновационные методы анализа для выявления таких «скрытых» угроз.

152. Еще одним новым фактором, вызывающим озабоченность с точки зрения безопасности пищевых продуктов в некоторых регионах, является потребность в научных данных, облегчающих задачу установления норм и МДУ для пищевых продуктов, которые могут иметь значимость в контексте местного или регионального потребления, например, субпродуктов (внутренних органов животных). Такие типы пищевых продуктов будут являться предметом новых исследований метаболизма животных с использованием радиоизотопных меток. В настоящее время при проведении исследований животных с помощью изотопного мечения изучается только один лекарственный препарат и/или химическое вещество, хотя в производстве продовольствия используются различные сочетания лекарственных препаратов. Соответственно, информация, собранная в рамках исследований по использованию одного препарата, является неполной. Поэтому отныне будут проводиться исследования с помощью изотопного мечения, предусматривающие комбинированное введение химических веществ.

153. Одной из представляющих интерес новых смежных областей, в которую в дальнейшем могут внести свой вклад исследования с помощью изотопного мечения, является согласование в глобальном масштабе, при участии специалистов по управлению рисками, норм и МДУ для соединений, применяемых как в животноводстве, так и в растениеводстве, — в противовес сложившейся практике, при которой нормы для пищевых продуктов животного и растительного происхождения устанавливаются отдельно, что не позволяет получить четкое представление об уровнях содержания опасных веществ в потребляемых продуктах.

154. В развивающихся странах, учитывая, что отсутствие МДУ сказывается на их экономике и на удовлетворении потребностей потребителей, отмечается повышенный интерес к участию в исследованиях животных с помощью изотопного мечения и к сбору научных данных для установления соответствующих норм. В этой связи Агентство недавно инициировало новый проект координированных исследований (ПКИ), посвященный элиминации ветеринарных лекарственных препаратов и связанных с ними веществ, используемых в животноводстве; интерес к данному проекту проявили несколько государств-членов. Планируемые исследования будут охватывать такие виды животных, как крупный рогатый скот, лошади, рыба, козы и овцы (рис. Е-2), с возможностью расширения области исследования на отдельные виды сельскохозяйственных культур, особенно в связи с вопросами загрязнения кормов. Ожидается, что этот ПКИ будет способствовать снижению зависимости развивающихся стран от сторонних центров и учреждений в области проведения исследований с использованием радиоизотопных меток для сбора данных об оценке рисков и установления МДУ в целях содействия торговле и защиты потребителей.



РИС. Е-1. Некоторые из животных, которые станут объектом проводимых в Судане исследований с помощью изотопного мечения, посвященных элиминации. (Фото: МАГАТЭ)

Г. Здоровье человека

Г.1. Достижения в области микродозиметрии и нанодозиметрии

Положение дел

155. Микродозиметрия — это специализированное направление в радиационной физике, которое занимается системным изучением пространственного распределения поглощаемой энергии в микроскопических структурах облучаемого вещества. Хотя как отдельное направление микродозиметрия появилась более 60 лет назад, она все еще вызывает значительный научный интерес у специалистов в области радиационной медицины, радиационной защиты, радиационной биологии и в других областях, таких как космические исследования.

156. В области радиационной медицины микродозиметрия особенно актуальна для ионно-пучковой терапии — передового метода, который предполагает использование для лечения некоторых видов опухолей пучков протонов и ионов углерода вместо обычного фотонного облучения, чтобы минимизировать повреждение здоровых тканей. При таком варианте применения стандартного измерения поглощенной дозы для понимания последствий облучения будет недостаточно, так как в зависимости от пути распространения в теле человека лечебного пучка ионов его радиобиологическая эффективность будет варьироваться.

157. Таким образом, в области радиационной защиты и при некоторых тактиках лечения методами радиационной медицины к поглощенной дозе применяются микроскопические весовые множители, позволяющие учесть биологическую эффективность излучения определенного качества (сравнительное количество частиц в зависимости от типа и энергии излучения, достигших конкретных участков в материале мишени). В качестве примеров можно назвать пучки протонов и ионов, нейтронное излучение и киловольтное рентгеновское излучение, которые находят применение в брахитерапии. Методы микродозиметрии и нанодозиметрии (также называемой структурной микродозиметрией) дают дозы излучения,

позволяющие зафиксировать влияние радиационного взаимодействия определенной природы и, следовательно, характеристики воздействия различных доз излучения, определяющие их биологическую эффективность.

158. Микродозиметрия представляет собой широкую междисциплинарную область. Ее задачи варьируются от имитационного и расчетного моделирования до разработки специализированных детекторов и измерительных приборов, а также клинических и прочих применений.

159. Ни один микродозиметр не способен должным образом определить характеристики всех разных ионизирующих излучений, поэтому проводимые по всему миру в последнее время исследования направлены на разработку детекторов для специализированных применений. В случае используемых в терапевтических целях ионных пучков с большой силой тока необходимо уменьшить детектор до субмиллиметровых размеров, а в сфере радиационной защиты и космических исследований разрабатываются микродозиметры с большой площадью чувствительного элемента.

Тенденции

160. Прежде чем микродозиметрия может стать стандартом оценки биологического эффекта в разных сценариях применения радиационных технологий, все еще необходимо найти решение ряда проблем. Одним из фундаментальных шагов является стандартизация микродозиметрических данных, к области которой относится анализ баланса погрешностей.

161. Первый шаг будет заключаться в разработке общих методологий и механизмов представления данных микродозиметрии. Необходимо проделать определенную работу по сопоставлению микродозиметров, имеющих различные параметры объема, формы и материала чувствительного элемента, в целях получения однозначных и не зависящих от детектора результатов. Более того, необходимо проанализировать микродозиметрические данные в целях предсказания параметров, принимаемых для конкретного сценария использования детекторов: линейной передачи энергии применительно к ионной лучевой терапии (рис. F-1), относительной биологической эффективности применительно к радиобиологии и коэффициента качества применительно к радиационной защите.



РИС. F-1. В число областей, в которые микродозиметрия может внести ценный вклад, входит планирование и проведение ионно-пучковой терапии. На рисунке показан кабинет облучения в центре ионно-пучковой терапии MedAustron в Винер-Нойштадте, Австрия, где пациенты с опухолями проходят лечение с использованием пучков протонов и ионов углерода. Закрепленная на потолке роботизированная рука-кронштейн удерживает кушетку; для позиционирования пациента используется кольцевое устройство для рентгеновской визуализации. (Источник: MedAustron, Австрия. Автор: Kästenbauer/Ettl.)

162. Агентство может сыграть стратегическую роль в обеспечении необходимых для этой области условий и междисциплинарных знаний. На организованном Агентством в октябре 2020 года техническом совещании по новым тенденциям и достижениям в области микродозиметрии и ее применения были определены направления дальнейших исследований, включая такие основные темы, как использование пучков ионов, аспекты радиационной защиты, моделирование биологических процессов и нанодозиметрия. Эти направления станут ориентирами для соответствующих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ Агентства в предстоящие программные циклы.

G. Радиоизотопы и радиационные технологии

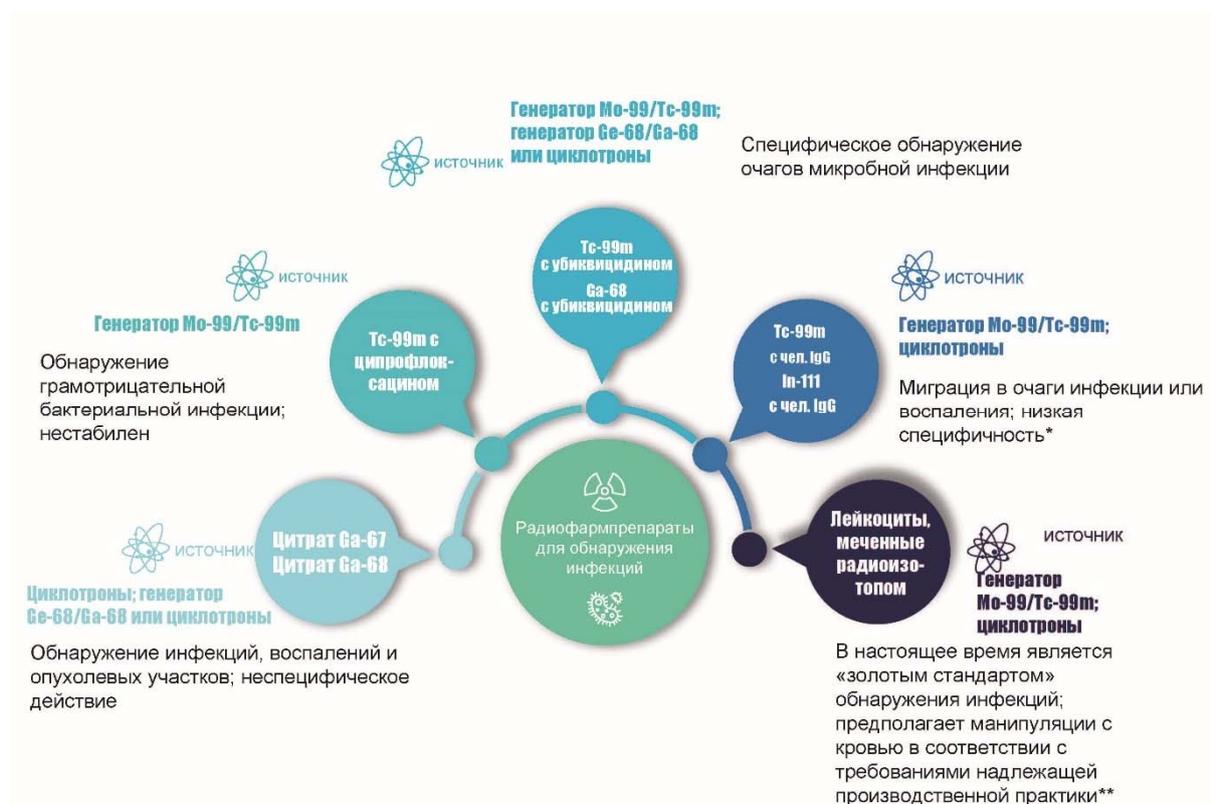
G.1. Роль радиофармацевтических препаратов в обнаружении, диагностике и лечении инфекционных заболеваний

Положение дел

163. Текущая пандемия COVID-19 свидетельствует о том, что инфекционные заболевания представляют угрозу человечеству. В то время как в рамках всех научных дисциплин предпринимаются усилия к получению более полного представления о таких заболеваниях с использованием передовых технологий, в области разработки радиофармпрепаратов достигнут этап, когда становится возможной неинвазивная визуализация клеточных и биохимических процессов, что открывает путь к схемам диагностики и потенциального лечения инфекционных заболеваний человека с использованием радиофармпрепаратов.

164. Нельзя преуменьшить значение раннего обнаружения и лечения инфекционных заболеваний как основного фактора ограничения и снижения заболеваемости и смертности среди пациентов. Иммунный ответ на инфекцию — это сложное явление, и идеальный радиофармацевтический препарат должен позволять проводить различие между живыми инфицирующими организмами и непатогенными микроорганизмами, другими инфекциями и воспалениями. Для обеспечения точной диагностики и оценки ответной реакции на лечение он должен характеризоваться способностью количественного накопления и/или достаточного удержания только лишь в пораженных тканях.

165. В применении неинвазивных методов обнаружения инфекций в клинических условиях существенное место занимают несколько радиофармпрепаратов. Тем не менее ни один из этих препаратов не способен четко обозначить конкретную причину инфекции либо разные виды инфекций.



* «Development of kits for Tc-99m radiopharmaceuticals for infection imaging» («Разработка комплектов для применения радиофармпрепаратов на основе технеция-99m для визуализации инфекционных процессов») (IAEA-TECDOC-1414)

** «Radiolabelled Autologous Cells: Methods and Standardization for Clinical Use» («Меченные радиоактивными изотопами аутологические клетки: методы и стандартизация для клинического применения») (IAEA Human Health Series No. 5)

Тенденции

166. В настоящее время, учитывая все большую сложность ситуации с инфекционными заболеваниями, в том числе представляющими угрозу для жизни вирусными инфекциями, которые получили распространение в последние десятилетия (например, вирус иммунодефицита человека (ВИЧ), тяжелый острый респираторный синдром, птичий грипп, Эбола и COVID-19), определен ряд перспективных действующих веществ, которые могут использоваться для обнаружения и диагностики конкретной инфекции в организме человека или во взятых у людей пробах.

167. На протяжении более 20 лет МАГАТЭ в партнерстве с ФАО занимается подготовкой и оснащением экспертов со всего мира, чтобы они могли использовать ядерные и смежные иммунологические технологии (такие как радиоиммуноанализ (РИА) и твердофазный иммуноферментный анализ (ТИФА)) и молекулярные технологии (полимеразная цепная реакция (ПЦР)). Эти точные специфические технологии и их применения все чаще используются для раннего и оперативного обнаружения, характеристики и отслеживания трансграничных болезней животных и зоонозных заболеваний, а также борьбы с ними. В последнее время эти методы использовались для диагностики инфекционных заболеваний, способных привести к пандемии, в том числе африканской чумы свиней, ящура, лихорадки Эбола, лихорадки Зика, птичьего гриппа, БВРС и ТОРС, а совсем недавно и COVID-19. Лаборатории Агентства в Зайберсдорфе предоставляли экспертные рекомендации и услуги, обеспечивали наличие стандартных рабочих процедур (СРП) и обучали использованию средств индивидуальной защиты (СИЗ), а также занимались созданием технического потенциала и обучением применению процедур тестирования; кроме того, оказывая содействие в борьбе с COVID-19, Агентство предоставило более чем 120 государствам-членам комплекты оборудования/реагентов/расходных материалов.

168. Со времени открытия в 1973 году моноклональных антител (МКАТ) произошли значительные изменения, и теперь такие антитела могут производиться в специализированных лабораториях в больших количествах и использоваться для новых методов макромолекулярной биотерапии. Используемые для лечения опухолей МКАТ могут прикрепляться к опухолеспецифическим антигенам и служат средством доставки радионуклидов к конкретному месту локализации опухоли. Этот новый метод появился в связи с применением изотопно-меченных МКАТ, которые содержат излучающие фотоны радиоизотопы и после введения в организм человека могут использоваться для диагностики онкологических заболеваний. Он получил название «радиоиммуносцинтиграфия» (РИС).

169. В дальнейшем учеными были получены изотопно-меченные МКАТ, содержащие бета-излучающие радиоизотопы, которые могут использоваться для выявления опухолевых клеток и целевого воздействия на них: производится «бомбардировка» опухоли высокоэнергетическими бета-частицами с целью уничтожения раковых клеток. Этот метод получил название «радиоиммунотерапия» (РИТ).

170. Было установлено, что молекулы, соответствующие структурам на поверхности посторонних микроорганизмов, могут спровоцировать выработку в организме-хозяине воздействующих на конкретные микроорганизмы МКАТ, в связи с чем появляется возможность применять РИС и РИТ для выявления целого ряда инфекционных заболеваний, в том числе грибкового, вирусного или бактериального происхождения, и потенциального применения в терапии. Базы данных клинических испытаний свидетельствуют о наличии не менее 88 исследований в рамках клинических испытаний по применению МКАТ к пациентам с COVID-19. В рамках предварительных исследований также изучается использование РИС для диагностики COVID-19 на основе специфических вирусных поверхностных антигенов. Например, в настоящее время признано в качестве терапевтического агента и потенциально может применяться в диагностике COVID-19 рекомбинантное антитело «Anti-SARS-CoV-2 Spike Glycoprotein S1» («Антитело к спайковому S1-гликопротеину SARS-CoV-2») (CR3022), которое в промышленном масштабе изначально было разработано для проведения исследований *ex vivo*, в частности для твердофазного иммуноферментного анализа (рис. G-1). Для изучения механизмов связывания и проверки обоснованности концепции МКАТ было успешно помечено иодом-131, что подтверждает возможность терапевтического применения изотопно-меченной версии CR3022.

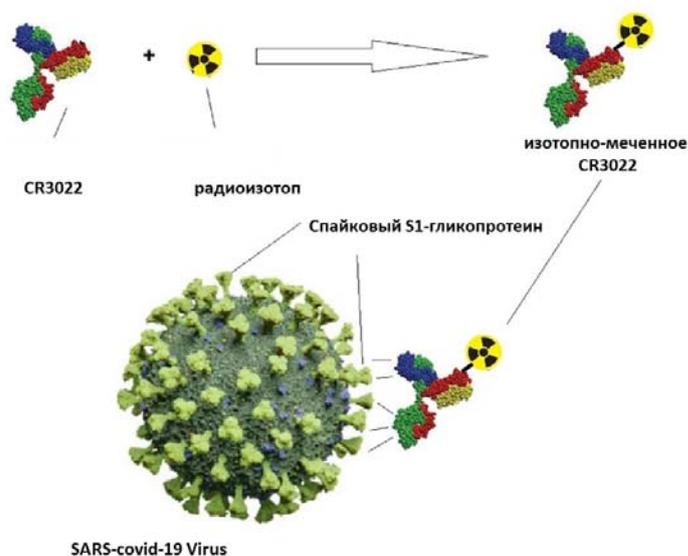


РИС. G-1. Схема потенциальной разработки терапевтического изотопно-меченного моноклонального антитела CR3022, применяемого для диагностики вызванного коронавирусом-2 тяжелого острого респираторного синдрома (SARS-CoV-2). (Источник: МАГАТЭ)

171. Тем не менее многие вопросы остаются без ответа, например, вопрос о том, как на эффективность этого метода могут повлиять мутации в геноме вируса.

172. Согласно одному из исследований⁷, с помощью терапевтического радиофармпрепарата Bi-213 anti-HIV-1 gp41 удалось успешно уничтожить инфицированные ВИЧ мононуклеарные клетки периферической крови в организме человека без нарушения гематоэнцефалического барьера, что потенциально открывает путь к лечению ВИЧ-инфекции.

173. Эти обнадеживающие последние разработки, связанные с новыми радиофармацевтическими препаратами, изготовленными с использованием воздействующих на конкретные микроорганизмы МКАТ, демонстрируют потенциал в плане диагностики и лечения инфекционных заболеваний, и изучение возможностей их использования является актуальным и своевременным для всех государств-членов.

⁷ Ekaterina Dadachova, Scott G. Kitchen, Gregory Bristol, Gayle Cocita Baldwin, Ekaterina Revskaya, Cyril Empig, George B. Thornton, Mirosław K. Gorny, Susan Zolla-Pazner, Arturo Casadevall, Pre-Clinical Evaluation of a ²¹³Bi-Labeled 2556 Antibody to HIV-1 gp41 Glycoprotein in HIV-1 Mouse Models as a Reagent for HIV Eradication, PLoS One. 2012; 7(3): e31866.

Н. Окружающая среда

Н.1. Применение ядерных и смежных методов для расширения знаний о голубом углероде в глобальном масштабе и решения проблем, связанных с воздействием изменения климата

Положение дел

174. Наблюдаемое с конца XIX века резкое увеличение концентрации в атмосфере парниковых газов, таких как двуокись углерода (CO₂), метан (CH₄) и закись азота (N₂O), привело к усилению глобального потепления, главными факторами которого являются выбросы CO₂ в результате сжигания ископаемого топлива, производства цемента, а также антропогенных изменений и изменений в области землепользования. Главную роль в регулировании глобальных климатических процессов играет мировой океан, который забирает и аккумулирует CO₂ из атмосферы, выполняя функции чистого поглотителя CO₂ антропогенного происхождения и весьма существенно снижая темпы глобального потепления.

175. Двумя основными механизмами, которые обеспечивают захват океаном CO₂ из атмосферы, являются так называемые «насос растворимости» (поглощение CO₂ в результате газообмена и нисходящий перенос обогащенных CO₂ масс воды в глубинные слои океана) и «биологический насос» (вертикальный отвод с поверхностных вод в глубинные слои океана выделяемого в процессе фотосинтеза органического углерода в виде частиц).

Тенденции

176. Захватываемый и удерживаемый океаном органический углерод (ОУ) называется «голубым углеродом». Большие запасы ОУ накапливаются и хранятся в отложениях, формируемых растительными прибрежными экосистемами, такими как морские луга, приливно-отливные болота и мангровые леса. Хотя общемировая площадь этих экосистем намного меньше, чем у наземных лесных экосистем, они обладают значительным потенциалом секвестрации ОУ в глобальном масштабе, и поэтому им следует уделять существенное внимание в рамках глобальных стратегий адаптации к изменению климата на основе природных механизмов (рис. Н-1). Те же самые данные об отложениях, датированных с помощью короткоживущих радиоизотопов, могут использоваться для определения остаточного загрязнения пластиком (рис. Н-2). Лаборатории окружающей среды МАГАТЭ разрабатывают геохронологические модели, анализируя образцы керн донных отложений, собранные в прибрежных мангровых лесах. Для этого в качестве короткоживущих радиоиндикаторов используются, к примеру, избыточные изотопы ²¹⁰Pb, ⁷Be, ²³⁴Th и ¹³⁷Cs.

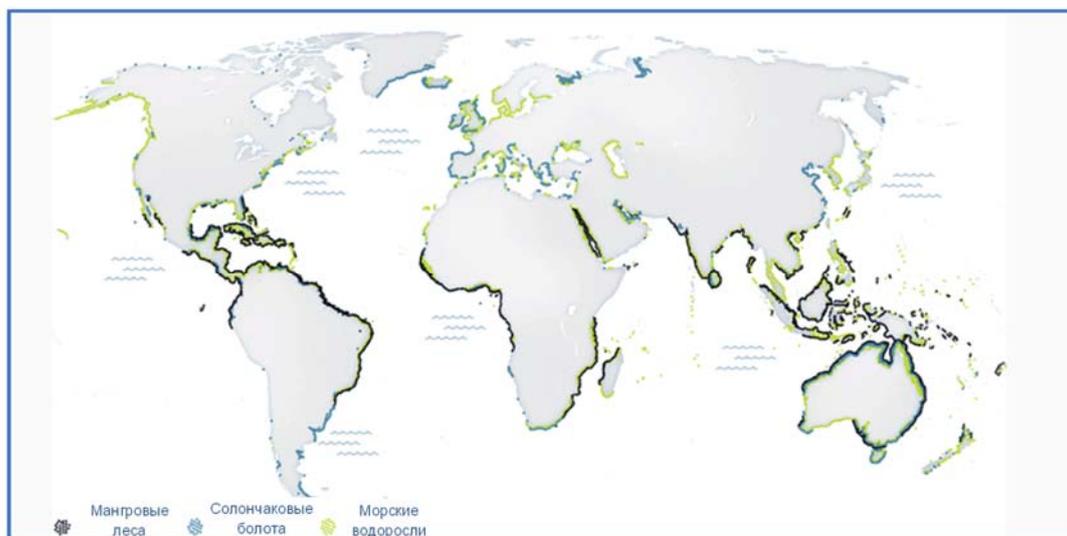


РИС. Н-1. Глобальное распространение прибрежных экосистем, являющихся резервуарами голубого углерода.
(На основе данных с сайта <https://thebluecarboninitiative.org>)

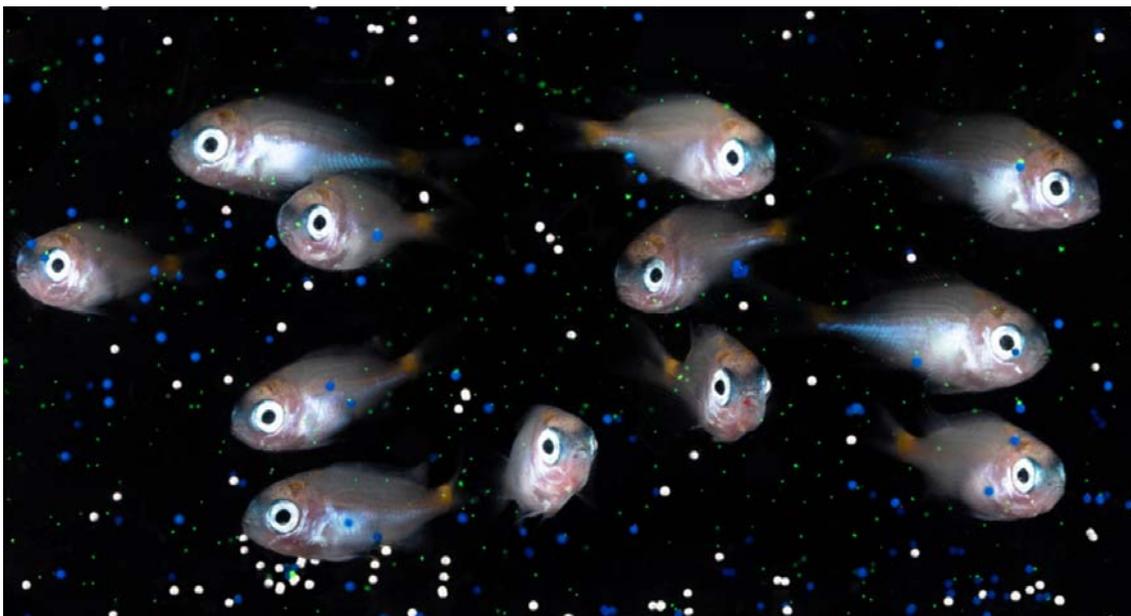


РИС. Н-2. Рыба, подвергшаяся воздействию микропластика в рамках НИОКР, проводимых в Лабораториях окружающей среды МАГАТЭ в Монако. (Фото: МАГАТЭ)

177. Кроме того, учитывая текущую величину потерь содержащегося в отложениях углерода в результате широко распространяющейся деградации среды обитания, необходимо принимать координированные меры, направленные на создание и восстановление условий среды обитания, а также реализовывать новаторские решения в области экоинженерии.

178. Для того чтобы прибрежные экосистемы, которые выполняют роль резервуаров голубого углерода за счет механизмов секвестрации углерода и компенсации выбросов парниковых газов, были включены в существующие стратегии смягчения последствий изменения климата, необходимо провести количественную оценку истинной динамики секвестрации ОУ, которая в настоящее время возможна лишь в ограниченных пределах и связана со значительной неопределенностью. Рассчитать динамику секвестрации ОУ в масштабе тысячелетий можно на основе углерода-14, в то время как оценка в масштабе десятилетий/столетий может быть проведена с использованием радионуклидов, которые присутствуют в окружающей среде, например, свинца-210, цезия-137 и изотопов плутония. Такой масштаб данных укладывается во временные рамки, соответствующие мерам регулирования в контексте целей Организации Объединенных Наций в области устойчивого развития и Десятилетия Организации Объединенных Наций, посвященного науке об океане в интересах устойчивого развития, что позволяет рассчитать динамику секвестрации ОУ и ее колебания с течением времени вследствие естественных и антропогенных изменений.

179. Радионуклиды могут также предоставить уникальный материал для оценки на предмет того, способны ли нарушения естественного или антропогенного характера привести к потере углерода, например, в связи с повторным подъемом отложений и эрозийными процессами. Использование более короткоживущих радионуклидов, таких как торий-228, торий-234 и бериллий-7, а также изотопных индикаторов динамики образования отложений в масштабе недель, месяцев и даже нескольких лет согласуется с созданием директивных механизмов в отношении голубого углерода, которые предусматривают количественную оценку и финансирование сокращения углеродосодержащих выбросов.

180. Хотя в последнее десятилетие был проведен ряд исследований на тему аккумуляции голубого углерода в богатых растительностью прибрежных районах (рис. Н-3), многие вопросы по-прежнему остаются без ответа. Эти вопросы охватывают такие аспекты, как оценка глобальных «очагов аккумуляции», во многом остающихся недостаточно изученными (например, зарослей морских водорослей и мангровых деревьев в Бразилии и Азии); будущее

воздействие изменения климата и других нарушений на накопление голубого углерода в растительных прибрежных экосистемах; роль макроводорослей; а также оптимальные меры регулирования для поддержания и расширения процессов секвестрации углерода в прибрежных средах обитания, являющихся резервуарами голубого углерода. Ядерные и смежные методы вносят важный вклад в оценку роли карбонатов и макроводорослей в рамках углеродного цикла, определение происхождения углерода, понимание факторов, влияющих на секвестрацию в средах обитания — резервуарах голубого углерода, и их соответствующего углеродного баланса, а также принятие управленческих мер для содействия осуществлению стратегий в области голубого углерода.



РИС. Н-3. Отбор образцов керна донных отложений в Занзибаре, Объединенная Республика Танзания, для оценки запасов и коэффициента отложения органического углерода в качестве способа измерения потенциала секвестрации углерода.

(Фото: Глория Сальгадо, Университет им. Эдит Коуэн, Перт, Австралия)

181. В ближайшее десятилетие Агентство намерено изучать ряд аспектов науки о голубом углероде и передавать соответствующие ядерные технологии. В настоящее время Агентство через посредство Лаборатории окружающей среды МАГАТЭ участвует в проектах, связанных с голубым углеродом, в Австралии, Бразилии, Дании, Индии, Мьянме, Новой Зеландии, Объединенной Республике Танзания и Соединенных Штатах Америки и Франции. Агентство также участвует в координируемом фондом «Океаны-2050» инновационном проекте по оценке потенциала секвестрации углерода, которым обладают фермы морских водорослей по всему миру. Разрабатываются национальные и региональные проекты технического сотрудничества, целью которых является оценка значимости секвестрации углерода в водных системах для основанных на природных механизмах стратегий адаптации к изменению климата, для охраны окружающей среды и для получения социально-экономических выгод.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица А-1. Действующие и строящиеся ядерные энергетические реакторы в мире (по состоянию на 31 декабря 2020 года)^а

СТРАНА	Действующие реакторы		Строящиеся реакторы		Электроэнергия, произведенная на АЭС в 2020 году		Суммарный опыт эксплуатации на конец 2020 года	
	Число энергоблоков	Общая мощность, МВт (эл.)	Число энергоблоков	Общая мощность, МВт (эл.)	ТВт ч	% от общего объема производства	Годы	Месяцы
АРГЕНТИНА	3	1641	1	25	10,0	7,5	91	2
АРМЕНИЯ	1	415			2,6	34,5	46	8
БАНГЛАДЕШ			2	2160				
БЕЛАРУСЬ	1	1110	1	1110	0,3	1,0	0	2
БЕЛЬГИЯ	7	5942			32,8	39,1	310	7
БОЛГАРИЯ	2	1884	1	1340	13,2	2,1	59	3
БРАЗИЛИЯ	2	2006			15,9	40,8	169	3
ВЕНГРИЯ	19	13624			92,2	14,6	788	6
ГЕРМАНИЯ	50	47528	13	12565	344,7	4,9	418	8
ИНДИЯ	6	3934			28,4	37,3	176	10
ИРАН, ИСЛАМСКАЯ РЕСПУБЛИКА	4	2794	1	1600	22,4	33,9	167	4
ИСПАНИЯ	56	61370	1	1630	338,7	70,6	2337	0
КАЗАХСТАН	6	8113			60,9	11,3	852	7
КАНАДА	4	1902			15,2	48,0	142	2
КИТАЙ	22	6255	7	4824	40,4	3,3	548	11
КОРЕЯ, РЕСПУБЛИКА	1	915	1	974	5,8	1,7	9	4
МЕКСИКА	33	31679	2	2653	43,1	5,1	1932	6
НИДЕРЛАНДЫ							25	10
ОБЪЕДИНЕННЫЕ АРАБСКИЕ ЭМИРАТЫ	24	23150	4	5360	152,6	29,6	596	2
ПАКИСТАН	2	1552			10,9	4,9	57	11
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ	1	482			3,9	3,3	76	0
РУМЫНИЯ	5	1318	2	2028	9,6	7,1	87	5
СЛОВАКИЯ	2	1300			10,6	19,9	37	11
СЛОВЕНИЯ	38	28578	3	3459	201,8	20,6	1372	5
СОЕДИНЕННОЕ КОРОЛЕВСТВО	4	1837	2	880	14,4	53,1	176	7
СОЕДИНЕННЫЕ ШТАТЫ АМЕРИКИ	1	688			6,0	37,8	39	3
ТУРЦИЯ	2	1860			11,6	5,9	72	3
УКРАИНА	7	7121			55,8	22,2	350	1
ФИНЛЯНДИЯ	6	6882			47,4	29,8	474	0
ФРАНЦИЯ	4	2960			23,0	32,9	228	11
ЧЕШСКАЯ РЕСПУБЛИКА			2	2228	NA	NA		
ШВЕЙЦАРИЯ	15	13107	2	2070	71,5	51,2	533	6
ШВЕЦИЯ	1	1345	3	4035	1,6	1,1	0	5
ЮЖНАЯ АФРИКА	15	8923	2	3260	45,7	14,5	1634	7
ЯПОНИЯ	94	96553	2	2234	789,9	19,7	4600	10
Итого ^{b,c}:	442	392612	52	54435	2553,2		18772	10

а. Источник: Информационная система Агентства по энергетическим реакторам (ПРИС) (www.iaea.org/pris) по состоянию на 1 июня 2021 года.

б. Суммарные показатели включают следующие данные по Тайваню, Китай: 4 энергоблока мощностью 3844 МВт (эл.) в эксплуатации.

с. Суммарный опыт эксплуатации включает также данные по остановленным станциям в Италии (80 лет, 8 месяцев), Казахстане (25 лет, 10 месяцев), Литве (43 года, 6 месяцев), а также по остановленным и действующим станциям на Тайване, Китай (232 года, 8 месяцев).

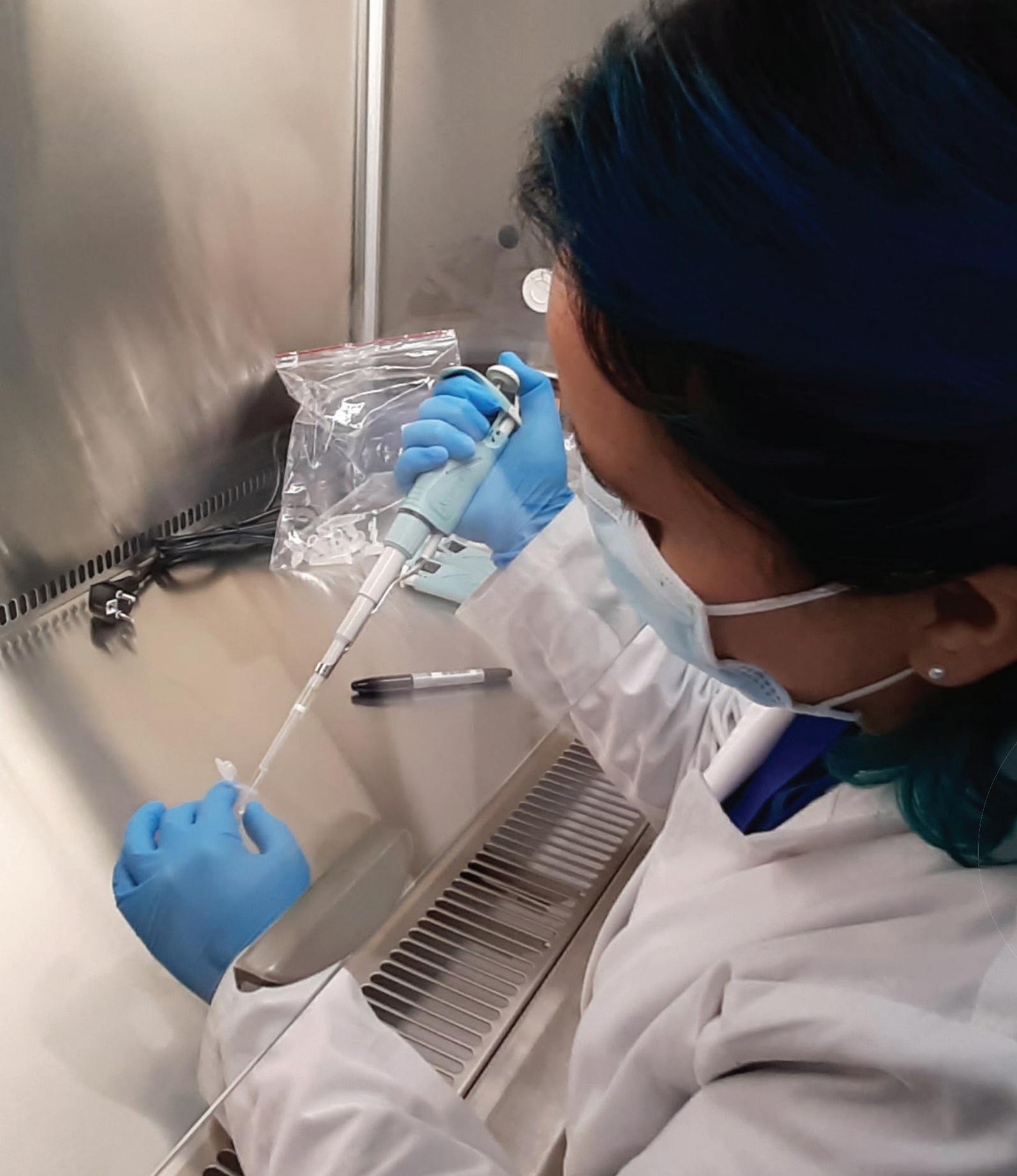
**Таблица D-1. Распространенные виды применения
исследовательских реакторов во всем мире**

Вид применения ^a	Число соответствующих исследовательских реакторов ^b	Число государств-членов, в которых имеются такие установки
Обучение/подготовка кадров	161	50
Нейтронно-активационный анализ	116	49
Производство радиоизотопов	82	41
Нейтронная радиография	70	37
Облучение материалов/топлива	67	26
Рассеяние нейтронов	44	28
Геохронология	23	20
Трансмутация (легирование кремния)	22	15
Трансмутация (драгоценные камни)	19	12
Нейтронная терапия, в основном НИОКР	15	12
Измерение ядерных данных	14	7
Другие применения ^c	117	34

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

^b Из 236 учтенных исследовательских реакторов (по состоянию на ноябрь 2020 года 221 эксплуатировался, 15 были временно остановлены).

^c Другие применения включают калибровку и тестирование контрольно-измерительных приборов, эксперименты с защитным экраном, создание позитронных источников и исследования по сжиганию ядерных отходов.



IAEA

Международное агентство по атомной энергии
Атом для мира и развития

Международное агентство по атомной энергии
Венский международный центр, а/я 100
1400 Вена, Австрия
Телефон: (+43-1) 2600-0
Факс: (+43-1) 2600-7
Эл. почта: Official.Mail@iaea.org
www.iaea.org