

An underwater photograph showing a variety of marine life, including several striped fish, swimming amidst significant plastic pollution. Large pieces of white plastic, a clear plastic bottle, and other debris are visible, illustrating the impact of environmental issues.

Обзор ядерных технологий ■ 2022

Доклад Генерального директора



IAEA

Международное агентство по атомной энергии

Атом для мира и развития

GC(65)/INF/4

Обзор ядерных технологий — 2022

Доклад Генерального директора

GC(66)/INF/4

Отпечатано МАГАТЭ в Австрии
Сентябрь 2022 года
IAEA/NTR/2022

Содержание

Предисловие	5
Предисловие Генерального директора	6
Резюме.....	7
A. Ядерная энергетика.....	12
A.1. Прогнозы развития ядерной энергетики.....	12
A.2. Действующие атомные электростанции	13
A.3. Новые и расширяющиеся ядерно-энергетические программы.....	17
A.4. Развитие ядерно-энергетических технологий	20
A.4.1. Усовершенствованные водоохлаждаемые реакторы	22
A.4.2. Реакторы малой и средней мощности и модульные реакторы, в том числе высокотемпературные реакторы	23
A.4.3. Быстрые реакторы	26
A.4.4. Неэлектрические применения ядерной энергетики	27
A.4.5. Исследования и развитие технологий в области термоядерного синтеза с перспективой применения в энергетике	29
B. Ядерный топливный цикл	33
B.1. Начальная стадия топливного цикла	33
B.2. Конечная стадия топливного цикла.....	35
C. Вывод из эксплуатации, восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами	37
C.1. Вывод из эксплуатации.....	37
C.2. Восстановление окружающей среды.....	40
C.3. Обращение с радиоактивными отходами	41
D. Исследовательские реакторы и ускорители частиц.....	44
D.1. Исследовательские реакторы	44
D.2. Ускорители частиц и контрольно-измерительные приборы.....	48
E. Атомные и ядерные данные	50
F. Окружающая среда	51
F.1. Радиационные технологии для борьбы с загрязнением пластиком.....	51
F.2. Ядерные и изотопные методы для борьбы с загрязнением морской среды пластиком....	53
G. Продовольствие и сельское хозяйство	57
G.1. Новые методы анализа профиля изотопов для оценки и смягчения эффектов, связанных с сохраняемостью и переносом антибиотиков, а также их влияния на устойчивость к противомикробным препаратам	57
G.2. Вызванная воздействием космической среды генетическая изменчивость, селекция растений и астробиология как вклад в борьбу с изменением климата.....	60
H. Здоровье человека	63

Н.1	Тераностика: путь к развитию персонализированных услуг онкологической помощи....	63
Н.2	Достижения в области науки о питании: как точные данные помогают странам бороться с эпидемией ожирения.....	64
I.	Радиоизотопы и радиационная технология.....	67
I.1.	Новые способы производства медицинских радиоизотопов.....	67
J.	Искусственный интеллект для ядерно-физических наук и применений.....	69
	Приложение.....	73

Предисловие

- В ответ на просьбы государств-членов Секретариат ежегодно подготавливает всеобъемлющий обзор ядерных технологий. Ниже прилагается доклад нынешнего года, в котором освещаются заметные события, происшедшие в 2021 году.
- В «Обзоре ядерных технологий — 2022» 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, атомные и ядерные данные, окружающая среда, продовольствие и сельское хозяйство, здоровье человека, радиоизотопы и радиационные технологии, а также искусственный интеллект для ядерных наук и применений.
- Проект «Обзора» был представлен Совету управляющих на его сессии в марте 2022 года в документе GOV/2022/2. Окончательный вариант был подготовлен с учетом обсуждения, состоявшегося в Совете управляющих, а также сделанных государствами-членами замечаний.

Предисловие Генерального директора

В число многочисленных глобальных проблем, с которыми сталкивается мировое сообщество, входят изменение климата, загрязнение воздуха, энергетическая безопасность, продовольственная безопасность, загрязнение пластиком, рак и ожирение.

Для решения всех этих проблем мы должны использовать все имеющиеся у нас средства.

Ядерные технологии в сочетании с другими технологиями помогают государствам-членам принимать обоснованные решения о дальнейших действиях в различных областях, будь то использование искусственного интеллекта во всех сферах, имеющих отношение к ядерной отрасли, генерация надежной и низкоуглеродной энергии, помощь в изучении загрязнения пластиком и борьбе с ним или спасение жизней людей благодаря более эффективному лечению рака и более качественному питанию.

На Конференции сторон Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (КС-26) 2021 года, проходившей в Глазго, Соединенное Королевство, Агентство участвовало в дискуссиях, продемонстрировав в рамках своего уникального научно-фактологического подхода чрезвычайную важность ядерных технологий как для борьбы с климатическим кризисом, так и для успешного преодоления его все более тяжелых последствий. Учитывая растущую роль ядерных технологий, Агентство продолжит участвовать в диалоге на высоком уровне по вопросам ядерной энергии, ядерных методов и применений на КС-27, которая пройдет в Шарм-эш-Шейхе, Египет.

В «Обзоре ядерных технологий — 2022» резюмируется положение дел в некоторых ключевых областях ядерных технологий и освещаются соответствующие новые перспективные разработки.



*РИС. Пред-1. Рафаэль Мариано Гросси, Генеральный директор МАГАТЭ, посетил АЭС «Адмирал Алвару Алберту».
(Шоссе Рио-Сантус — Итаорна, Ангра-дус-Рейс, Бразилия)*

Резюме

1. Впервые после произошедшей десять лет назад аварии на атомной электростанции (АЭС) «Фукусима-дайити» Агентство сделало более оптимистичный прогноз в отношении потенциального роста ядерно-энергетических мощностей для выработки электроэнергии в предстоящие десятилетия. В целом в последнее десятилетие объем ядерно-энергетических мощностей постепенно увеличивался, в частности, подключение новых энергоблоков к сети и увеличение производительности существующих реакторов обеспечило прирост мощности порядка 20,7 ГВт (эл.).
2. В конце 2021 года 437 действующих ядерных энергетических реактора в 32 странах вырабатывали в общей сложности 389,5 ГВт (эл.). В течение года к сети было подключено более 5,2 ГВт (эл.) новых ядерных мощностей от четырех новых реакторов с водой под давлением в Китае, Объединенных Арабских Эмиратах и Пакистане, одного корпусного тяжеловодного реактора в Индии и одного высокотемпературного газоохлаждаемого реактора в Китае. За этот же период было окончательно выведено из эксплуатации 8,7 ГВт (эл.) ядерных мощностей.
3. На разных этапах подготовки своей национальной инфраструктуры к реализации новой ядерно-энергетической программы находились в общей сложности 26 государств-членов: ожидается, что к 2035 году ядерную энергетику внедрят у себя 10–12 стран-новичков, в результате чего число стран, эксплуатирующих АЭС, вырастет на треть. Одним из важных технологических достижений, привлекающих внимание специалистов по энергетическому планированию и лиц, отвечающих за выработку политики, является ожидаемое к 2030 году появление и начало эксплуатации нескольких первых в своем роде реакторов малой и средней мощности и модульных реакторов (ММР). В результате несколько стран-новичков включили ММР в свои оценки технологий, несмотря на то что в ближайшие три десятилетия, как ожидается, основную часть новых мощностей будут составлять усовершенствованные водоохлаждаемые реакторы большой мощности. Национальная ядерно-энергетическая инфраструктура закладывает почву для того, чтобы вопросам ядерной безопасности, физической ядерной безопасности и выполнения требований гарантий как в случае усовершенствованных реакторов большой мощности, так и ММР уделялось одинаково пристальное внимание.
4. Во время пандемии COVID-19 продолжалась надежная эксплуатация атомных электростанций по всему миру благодаря внедрению инновационных подходов к эксплуатации и специальных мер защиты работников. Парк АЭС вновь продемонстрировал, что он способен работать устойчивым и надежным образом, адаптируясь к изменениям в столь непростые времена.
5. Для перехода на низкоуглеродную энергетику и сокращения до нуля выбросов углекислого газа по-прежнему чрезвычайно важны программы долгосрочной эксплуатации, которые позволяют также выиграть время для строительства новых низкоуглеродных генерирующих мощностей, включая новые АЭС.

6. Многие государства-члены достигли заметного прогресса в разработке технологий малых модульных реакторов (ММР), которые планируется внедрить в краткосрочной перспективе. В дополнение к плавучей АЭС «Академик Ломоносов» в Российской Федерации, промышленная эксплуатация которой ведется с мая 2020 года, Китай начал сооружение реактора АСР мощностью 125 МВт (эл.). В настоящее время разрабатывается более 70 конструкций ММР для электрических и неэлектрических применений. Кроме того, некоторые страны начали активнее разрабатывать микрореакторы — подвид ММР, который считается оптимальным решением для когенерации тепла и электроэнергии в удаленных районах или на малых островах и/или для замены дизельных генераторов. Чтобы помочь государствам-членам прийти к общему пониманию их потребностей и характерных особенностей, связанных с ММР, Агентство инициировало создание новой рамочной основы для разработки типовых пользовательских требований и критериев в отношении конструкций и технологий ММР.

7. Использование ядерной энергии для целей, не связанных с производством электроэнергии, растет в мире беспрецедентными темпами. В течение 2021 года для неэлектрических применений (опреснение, централизованное теплоснабжение и технологический нагрев) использовались в общей сложности 61 действующий ядерный реактор (5 из которых использовались для опреснения), вырабатывавших для ядерной когенерации около 2167 ГВт·ч теплового эквивалента электрической энергии.

8. Наблюдался устойчивый прогресс в сборке оборудования и установок в рамках проекта ИТЭР, несмотря на беспрецедентное давление из-за пандемии и трудности, возникшие при изготовлении некоторых уникальных компонентов ИТЭР. Существенный прогресс был достигнут в сборке и интеграции оборудования ИТЭР. Началась реализация ряда инициатив по созданию специальной регулирующей основы для термоядерного синтеза, которая является одним из ключевых элементов развития термоядерного синтеза в качестве коммерчески целесообразного источника энергии на национальном уровне.

9. Из-за стабилизации цен на уран на низком уровне нескольким производителям первичного урана пришлось снизить объемы добычи. Это побудило ряд инвесторов, фондов, продавцов и производителей первичного урана закупить закись-окись урана (U_3O_8) на рынке в ответ на прогнозируемый сдвиг в структуре спроса и предложения U_3O_8 . В результате сокращения запасов и активизации торговли U_3O_8 в 2021 году спотовая цена в конце года значительно увеличилась по сравнению с первым кварталом 2021 года. Недавнее повышение рыночных цен на уран в 2021 году стало стимулом к некоторым инвестициям, возобновлению в определенных объемах деятельности по разведке и добыче, а также определенному восстановлению первичного производства.

10. По всей видимости, многие из проблем, приведших к останову ядерных установок за последнее десятилетие, — политико-экономические факторы, расходы на техническое обслуживание и/или переоснащение, конъюнктура рынка электроэнергии — сохранятся и в будущем, а темпы останова, возможно, увеличатся в связи с возрастными характеристиками нынешнего парка, пусть и отчасти компенсируемыми продлением сроков службы. В течение следующих трех десятилетий может быть снято с эксплуатации значительное большинство из приблизительно 300 ядерных энергетических реакторов, функционирующих 30 и более лет. Такого же развития событий следует ожидать и в отношении исследовательских реакторов, парк которых имеет в целом схожую возрастную структуру. По всей видимости, согласно последним тенденциям, предпочтение чаще отдается немедленному демонтажу, тогда как в прошлом предпочитался отсроченный демонтаж.

11. В 2021 году ряд государств-членов значительно продвинулись на пути к заключительным стадиям размещения своих низкоактивных отходов в пунктах захоронения. Что касается программ создания глубинных геологических хранилищ (ГГХ) для высокоактивных отходов, то в 2021 году финская организация «Посива», занимающаяся обращением с отходами, начала раскопку первого туннеля для захоронения на площадке ГГХ «Онкало». Продолжает расширяться международное сотрудничество в области обращения с радиоактивными отходами, особенно в части программ глубинного геологического захоронения. В 2021 году серьезно продвинулась также работа по обращению с изъятymi из употребления закрытыми радиоактивными источниками, в частности в плане извлечения и кондиционирования.

12. Во всем мире продолжился рост интереса к исследовательским реакторам. В дополнение к 235 действующим исследовательским реакторам в 2021 году соорудились еще одиннадцать. Многие страны используют возможности доступа к исследовательским реакторам по линии инициатив международного и регионального сотрудничества. Две реакторные интернет-лаборатории с базовыми реакторами в Республике Корея и Чешской Республике приступили к трансляции экспериментов для студентов в других странах.

13. С появлением мощных вычислительных средств и инструментов анализа данных в ядерной отрасли начали внедряться методы искусственного интеллекта, машинного обучения и глубокого обучения для широкого спектра видов деятельности, которые могут изменить то, как проектируются, лицензируются и эксплуатируются ядерные системы. Искусственный интеллект способен улучшить интеграцию вычислений и экспериментальных данных, собранных в ходе маломасштабных экспериментов или с датчиков во время эксплуатации. Очевидной тенденцией, которая будет также оказывать значительное влияние на развитие ядерной физики и библиотек ядерных данных, является стремительное внедрение искусственного интеллекта/машинного обучения в различные сферы.

14. Искусственный интеллект обладает также огромным потенциалом для ускорения технологического развития во многих ядерных областях: от здоровья человека до термоядерного синтеза и ядерной науки. Искусственный интеллект позволяет экспертам быстро анализировать огромные объемы изотопных данных о воде, хранящихся в глобальных сетях, и таким образом помогает ученым понять влияние изменения климата и роста населения на водные ресурсы. Это может способствовать борьбе с раком и повышению готовности к будущим вспышкам зоонозных заболеваний. Чтобы обеспечить более широкое использование искусственного интеллекта в рамках ядерных наук и применений, необходимы прочные отношения с международными партнерами и межотраслевое сотрудничество для разработки руководящих материалов по регулированию, этическим вопросам и обучению и подготовке кадров, а также для обмена опытом, знаниями и положительной практикой.

15. Ускорительная масс-спектрометрия (УМС) — это сверхвысокоточный метод, обладающий большим потенциалом для аналитических применений, актуальных для современного общества. В настоящее время УМС используется в археологии, биомедицине, исследованиях изменения климата, гидрологии, океанографии и многих других областях, вызывающих все большую социально-экономическую озабоченность. Благодаря последним техническим достижениям была также расширена сфера применения метода УМС: с его помощью можно изучать широкий спектр объектов культурного и природного наследия, а также выявлять подделки и факты незаконной торговли изделиями.

16. Инновационные радиационные технологии переработки отходов и методы мониторинга океанической среды с помощью изотопных индикаторов помогают бороться с загрязнением пластиком — одной из самых острых глобальных экологических проблем и прямой угрозой устойчивому развитию. Инициатива по использованию ядерных технологий для борьбы с

загрязнением пластиком (НУТЕК пластикс), реализация которой началась в 2021 году, опирается на усилия Агентства по решению проблемы загрязнения пластиком путем его переработки с использованием радиационных технологий и мониторинга морской среды с помощью методов изотопных индикаторов.

17. Инновационное применение пучков гамма-частиц и электронов может обеспечить эффективную сортировку пластиковых отходов для их последующей переработки. Наряду с моделированием циркуляции и дисперсии пластика в океане ядерные и изотопные методы способствуют отслеживанию источников попадания пластика в океан и его дальнейшей судьбы. Они помогают ученым реконструировать прошлые тенденции загрязнения морской среды пластиком и лучше понимать процессы старения микропластика после его перехода в донные отложения.

18. Неправильное и чрезмерное применение противомикробных веществ, таких как антибиотики, противовирусные, противогрибковые и противопаразитарные препараты, которые используются для профилактики и лечения инфекций у людей, животных и растений, представляет собой глобальную угрозу общественному здравоохранению и в настоящее время уносит жизни 700 000 человек каждый год. Мощным инструментом для оценки содержания противомикробных веществ являются технологии анализа и исследования компонентно-специфических стабильных изотопов. Предполагается, что комбинирование этих изотопных методов с передовыми молекулярными методами поможет лучше понять миграцию и динамику накопления антибиотиков в навозе, применяемом в качестве удобрения, и влияние этих процессов на появление в окружающей среде микроорганизмов, устойчивых к антибиотикам.

19. Растет интерес к изучению влияния космической среды на возникновение мутаций в геномах растений и к возможностям модификации физиологических характеристик растений, что позволит улучшать способность растений выдерживать неблагоприятные условия произрастания на Земле, в том числе в связи с изменением климата. Учитывая постоянный интерес к изучению биологии растений в условиях космоса, как с точки зрения питания космонавтов, так и для использования ценных мутаций, полученных под воздействием космических условий, в целях выведения устойчивых сортов сельскохозяйственных культур, следует ожидать стремительный прогресс в этой области.

20. В лечении рака тераностика, основанная на применении изотопов, предполагает сочетание методов диагностики и терапии, что дает возможность медицинским работникам действовать исходя из конкретных потребностей каждого пациента. По сравнению с традиционными методами лучевой терапии, тераностический подход обеспечивает более специфическое лечение, делая мишенью для облучения конкретную опухоль и щадя при этом окружающие здоровые ткани, что способствует повышению как эффективности, так и безопасности лечения. В настоящее время он применяется в основном для лечения нейроэндокринных опухолей, лимфомы, раковых заболеваний простаты, молочной железы, легких и щитовидной железы. Растет потребность в более широком международном сотрудничестве и стандартизации в сфере профессиональной подготовки медицинских и научных экспертов и создания специализированной медицинской инфраструктуры.

21. Заболевания, связанные с ожирением, достигли во всем мире масштабов эпидемии: ежегодно из-за избыточного веса или ожирения умирают по меньшей мере 2,8 миллиона человек. По оценкам, к 2025 году экономическое бремя заболеваний, связанных с ожирением, будет составлять 1,2 триллиона долл. США в год. Данные об энергозатратах, полученные методом воды с двойной меткой (ВДМ) с использованием стабильных изотопов, чрезвычайно важны и будут учитываться при выработке более эффективной политики в области питания и здравоохранения для борьбы с растущей эпидемией ожирения во всем мире. Однако необходимо

больше данных из стран с низким и средним уровнем дохода, чтобы сделать исследования более репрезентативными в глобальном масштабе и предоставить в распоряжение лиц, отвечающих за выработку политики, фактические данные для определения приоритетности основных мер в области питания и борьбы с эпидемией ожирения.

22. Радиоизотопы и радиофармацевтические препараты используются как для диагностики, так и для лечения рака и других хронических заболеваний, спасая жизни людей. Важнейшей задачей является обеспечение бесперебойных поставок основных радиоизотопов. Два новых способа производства — с использованием линейных ускорителей и атомных электростанций — открывают возможности для укрепления и расширения глобальной цепи поставок молибдена-99, наиболее широко используемого медицинского радиоизотопа в мире. Уже началось промышленное производство молибдена-99 с использованием высокоэнергетических электронных пучков.

23. Производство радиоизотопов в ядерных реакторах основано на реакциях захвата нейтронов в материале мишени. Как правило, для производства радиоизотопов для терапевтических применений в ядерной медицине используются исследовательские реакторы. Обычным способом получения радиоизотопов, таких как кобальт-60, используемых в промышленности и брахитерапии, является облучение мишеней на атомных электростанциях. В 2021 году регулирующий орган выдал разрешение на производство молибдена-99 в коммерческом реакторе типа CANDU. В настоящее время изучается возможность производства и других важных короткоживущих медицинских радиоизотопов, включая лютеций-177 и гольмий-166. Это может открыть перед разработчиками новые перспективы, связанные с использованием энергетических реакторов для производства радиоизотопов.

А. Ядерная энергетика

А.1. Прогнозы развития ядерной энергетики

Текущее состояние

1. Впервые после произошедшей десять лет назад аварии на АЭС «Фукусима-дайити» Агентство сделало более оптимистичный прогноз в отношении потенциального роста ядерно-энергетических мощностей для выработки электроэнергии в предстоящие десятилетия. Такое изменение в ежегодном прогнозе Агентства относительно этого низкоуглеродного источника энергии пока не свидетельствует о новой тенденции, однако в нем учитывается стремление мира отказаться от ископаемых видов топлива в рамках борьбы с изменением климата. Многие страны рассматривают возможность внедрения ядерной энергетики для увеличения производства надежной и экологически чистой энергии. На состоявшейся в ноябре 2021 года в Глазго, Соединенное Королевство, 26-й Конференции сторон Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (КС-26) были проведены позитивные дискуссии на высоком уровне, посвященные использованию ядерной энергетики, что было сделано на КС впервые за многие годы (рис. А.1).

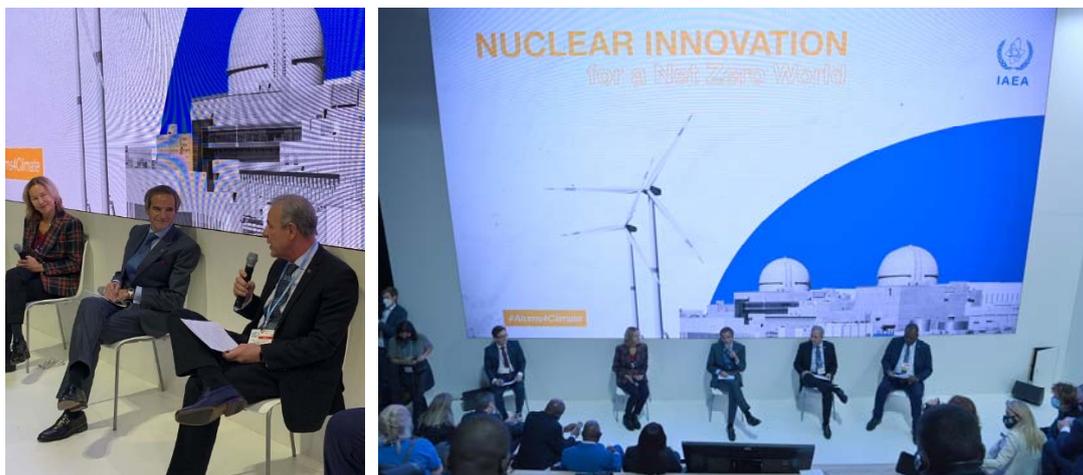


РИС. А-1. Беседа на высоком уровне по ядерной тематике на КС-26 между Генеральным директором Гросси, министром Албукерке из Бразилии, министром Премпе из Ганы и Исполнительным секретарем ЕЭК ООН Альгаеровой.

2. В 2020 году глобальная установленная мощность составила 392 ГВт (эл.) и на нее пришлось 10,2% выработки электроэнергии. Согласно пессимистической оценке, в 2050 году глобальная мощность АЭС останется практически неизменной и составит 394 ГВт (эл.), а ее доля в мировом производстве электроэнергии снизится до 6,3%. Однако в соответствии с оптимистической оценкой прогнозируется более чем двукратное увеличение установленной мощности до 792 ГВт, а доля в выработке электроэнергии должна увеличиться до 12,3% (рис. А.2).



РИС. А-2. Динамика оптимистических и пессимистических прогнозов мощности АЭС в 2050 году исходя из данных, приведенных в изданиях RDS-1 за период 2010–2021 годов.

3. Для реализации оптимистического прогноза необходимы как дальнейшая долгосрочная эксплуатация (ДСЭ) существующего парка ядерных энергетических реакторов (как правило, на протяжении срока, превышающего 40 лет), так и значительные усилия, направленные на строительство в течение трех десятилетий 550 ГВт (эл.) новых мощностей. Чтобы достичь этой цели, в ближайшие десятилетия необходимо как минимум удвоить темпы подключения новых реакторов, а также ускорить демонстрацию и внедрение инновационных реакторных технологий.

Тенденции

4. К инновационным реакторным технологиям, включая реакторы малой и средней мощности и модульные реакторы (ММР), проявляется значительный и растущий интерес. В то же время ожидается, что в ближайшие три десятилетия рост мощностей будет происходить в основном за счет усовершенствованных водоохлаждаемых реакторов большой мощности, используемых для производства низкоуглеродной энергии в рамках борьбы с изменением климата. Перед ядерной отраслью будет по-прежнему стоять ряд задач, в том числе снижение затрат и обеспечение большей стандартизации для повышения конкурентоспособности.

5. С учетом вклада ядерной энергетики в создание устойчивых и надежных низкоуглеродных энергосистем будет необходима решительная политическая поддержка, включая доступ к финансированию на равных условиях с другими низкоуглеродными источниками энергии. Расширение возможностей, позволяющих использовать ядерную энергию для декарбонизации других энергетических секторов, в том числе путем производства чистого водорода, также может сделать ядерную энергетику более привлекательной для инвесторов.

А.2. Действующие атомные электростанции

Текущее состояние

6. К концу 2021 года общая мощность мировой ядерной энергетики составила 389,5 ГВт (эл.), которые вырабатывают 437 действующих ядерных энергетических реактора в 32 странах (см. таблицу А-1). Страны продолжили адаптироваться к пандемии COVID-19, принимая эффективные меры для обеспечения безопасной и надежной эксплуатации с минимальными

рисками для персонала, что свидетельствует о развитой организационной культуре. В течение 2021 года Агентство через посредство сети «Опыт эксплуатации АЭС в условиях пандемии COVID-19» продолжало распространять информацию о мерах, принятых для смягчения последствий пандемии и ее воздействия на эксплуатацию атомных электростанций (АЭС). Ни одна из 32 стран с действующими атомными электростанциями не сообщила о вызванных пандемией эксплуатационных событиях, повлиявших на безопасность и надежность эксплуатации АЭС.



7. Ядерная энергетика, будучи экологически чистым, надежным, устойчивым и современным источником энергии, вносит значительный вклад в сокращение выбросов парниковых газов во всем мире, удовлетворяя растущие мировые потребности в энергии и поддерживая устойчивое развитие и восстановление после пандемии COVID-19. К сети было подключено более 5,2 ГВт (эл.) новых ядерных мощностей, представленных шестью энергетическими реакторами. В их число входят четыре новых реактора с водой под давлением (PWR) — пятый энергоблок АЭС «Хунъяньхэ» (1061 МВт (эл.)) и шестой энергоблок АЭС «Тяньвань» (1000 МВт (эл.)) в Китае, второй энергоблок АЭС «Карачи» (1017 МВт (эл.)) в Пакистане и второй энергоблок АЭС «Барака» (1310 МВт (эл.)) в Объединенных Арабских Эмиратах, один корпусной тяжеловодный реактор (PHWR) — третий энергоблок АЭС «Какрапар» (630 МВт (эл.)) в Индии, а также один высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (HTGR) на первом энергоблоке АЭС «Шидаовань» в Китае (рис. А.3) .

Подключение новых ядерных мощностей в МВт (эл)

5,2 ГВт (эл.) новых генерирующих мощностей было подключено к сети от четырех новых реакторов с водой под давлением, одного корпусного тяжеловодного реактора и одного высокотемпературного газоохлаждаемого реактора



РИС. А-3. В декабре 2021 года Генеральный директор Рафаэль Мариано Гросси посетил АЭС «Барака» в Объединенных Арабских Эмиратах и встретился с молодыми специалистами в ядерной области.

8. Во всем мире, особенно в Северной Америке и Европе, растет число ядерных энергетических реакторов, охваченных программами ДСЭ и управления старением. Комиссия по ядерному регулированию Соединенных Штатов (КЯР) одобрила поданную компанией Dominion Energy заявку на продление на 20 лет лицензий на эксплуатацию первого и второго энергоблоков АЭС «Сарри» на юго-востоке Вирджинии. В результате срок службы этих двух энергетических реакторов будет продлен до 80 лет, что позволит эксплуатировать их до 2052 и 2053 годов, соответственно. Управление по ядерной безопасности (АСН) Франции объявило о завершении рассмотрения плана компании «Электрисите де Франс» (ЭДФ) по продлению срока службы 32 реакторов мощностью 900 МВт (эл.) еще на десять лет. АСН пришло к выводу о том, что меры, запланированные ЭДФ, в сочетании с мерами, предписанными АСН, открывают возможность для продления эксплуатации этих реакторов еще на десять лет после проведения четвертого периодического рассмотрения их безопасности. Обновленные проектные исследования и замена оборудования, необходимые для продления эксплуатации первого

энергоблока АЭС «Трикастен» и второго энергоблока АЭС «Бюже», уже завершены, что позволяет эксплуатировать эти реакторы до 2031 года.

9. В течение 2021 года было окончательно выведено из эксплуатации 8,7 ГВт (эл.) ядерных мощностей (десять реакторов). Потеря половины этих мощностей была вызвана остановкой трех АЭС в Германии: «Брокдорф» (PWR, 1410 МВт (эл.)), «Гронде» (PWR, 1360 МВт (эл.)) и блока С на АЭС «Гундремминген» (BWR, 1288 МВт (эл.)). В Соединенном Королевстве были выведены из эксплуатации три энергоблока с газоохлаждаемыми реакторами — первый блок АЭС «Данджнесс» (545 МВт (эл.)), второй блок АЭС «Данджнесс» (545 МВт (эл.)) и первый блок АЭС «Хантерстон» (490 МВт (эл.)). Были остановлены еще три энергоблока: первый блок АЭС «Карачи» (PHWR, 90 МВт (эл.)) в Пакистане, первый блок Курской АЭС (легководный реактор с графитовым замедлителем мощностью 925 МВт (эл.)) в Российской Федерации, и третий энергоблок АЭС «Индиан-Пойнт» (PWR, 1030 МВт (эл.)) в Соединенных Штатах Америки. Также был оставлен первый энергоблок АЭС «Гошэн» (BWR, 985 МВт (эл.)) на Тайване, Китай.

Тенденции

10. В целом в последнее десятилетие объем ядерной генерации постепенно увеличивался: прирост мощности за счет подключения новых энергоблоков к сети и увеличения производительности существующих реакторов составил около 20,7 ГВт (эл.) (рис. А.4).



РИС. А-4. Рафаэль Мариано Гросси, Генеральный директор МАГАТЭ, посетил АЭС «Адмирал Алвару Алберту» в Бразилии и наблюдал за строительством реактора «Ангра III».

11. 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 одни 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. Кроме того, имеются проблемы с существующими цепями

поставок, что может сказаться на текущей эксплуатации, реализации проектов и планировании отключений. Тем не менее в странах, приступающих к развитию ядерной энергетики, возникают новые цепи поставок, что может способствовать появлению в отрасли новых субъектов.

А.3. Новые и расширяющиеся ядерно-энергетические программы

Текущее состояние

12. Из 50 государств-членов, выразивших заинтересованность в использовании ядерной энергетики, 24 находятся на этапе подготовки к принятию решения и занимаются планированием. Остальные 26 стран работают над внедрением ядерной энергетики и делятся на две группы:

- 16 находятся на этапе принятия решения. Это страны, которые рассматривают возможность внедрения ядерной энергетики, в том числе те страны, которые проводят предварительные технико-экономические обоснования или активно готовят инфраструктуру, не приняв при этом решения (Алжир, Замбия, Индонезия, Казахстан, Марокко, Нигер, Сальвадор, Сенегал, Судан, Таиланд, Тунис, Уганда, Филиппины, Шри-Ланка, Эстония, Эфиопия).
- 10 находятся на этапе после принятия решения. Это страны, которые приняли решение и создают инфраструктуру или подписали контракт и начнут строительство в ближайшем будущем (Бангладеш, Гана, Египет, Иордания, Кения, Нигерия, Польша, Саудовская Аравия, Турция, Узбекистан).



13. В Бангладеш продолжается строительство первой АЭС, и начало коммерческой эксплуатации двух энергоблоков запланировано на 2024 и 2025 годы, соответственно. В Турции в 2021 году продолжилось строительство четырех энергоблоков АЭС «Аккую». Ввод в эксплуатацию четырех энергоблоков ожидается в 2023–2026 годах. В Египте в июле 2021 года Управление по атомным электростанциям (УАЭС) подало заявку на получение лицензии на строительство первого и второго энергоблоков АЭС «Эд-Дабаа». Продолжается подготовка площадки к строительству. Обе ключевые организации (УАЭС и Управление ядерного и радиологического регулирования Египта) проходят реструктуризацию с учетом потребностей программы. В Польше в марте 2021 года государственное казначейство полностью выкупило компанию PGE EJ 1, которая была переименована в PEJ. Компания PEJ выступит в качестве инвестора проекта по строительству реакторов PWR с общей установленной мощностью 6000–9000 МВт (эл.) к 2042 году. Строительство первых двух АЭС планируется начать в 2026 и 2032 годах, и в 2033 году первый энергоблок должен быть введен в эксплуатацию. В Аргентине на площадке, прилегающей к первому энергоблоку АЭС «Атуча», на продвинутом этапе строительства находится реактор CAREM, который представляет собой прототипную модель, рассчитанную на мощность 32 МВт (эл.).

14. В Саудовской Аравии в настоящее время разрабатывается тендерная спецификация для закупки первых двух энергоблоков АЭС мощностью 1000–1600 МВт (эл.). Иордания решила осуществлять свою ядерно-энергетическую программу двумя параллельными путями: один из них предусматривает строительство крупной АЭС (мощностью 1000 МВт (эл.), по принципу «строительство — владение — эксплуатация — передача»), а другой — приоритетный — ММР. Была подготовлена тендерная документация для проекта ММР, и ожидается, что к началу 2022 года она будет окончательно доработана и опубликована. Гана продолжила работу по развитию национальной инфраструктуры для ядерно-энергетической программы, включая дальнейшее развитие потенциала ключевых организаций. Министерство энергетики опубликовало заявку для потенциальных поставщиков на строительство АЭС мощностью около 1000 МВт (эл.). Начало строительства первой АЭС запланировано на 2023 год, а ввод в эксплуатацию — на 2029 год. Кения объявила, что рассмотрит возможность строительства как исследовательского реактора, так и крупной АЭС, а также изучит возможность использования ММР. Нигерия возобновила работы в рамках своей ядерно-энергетической программы после задержек, вызванных организационными изменениями в ключевых организациях и пандемией COVID-19, в том числе обновила предварительные и окончательные технико-экономические обоснования для переоценки экономической целесообразности проекта АЭС. Для многих из этих стран включение ядерной энергетики в энергобаланс позволит внести значительный вклад в достижение их целей по смягчению последствий изменения климата. Некоторые из них (Египет, Иордания, Турция) включили ядерную энергетику в свои определяемые на национальном уровне вклады (ОНВ), представленные согласно РКИК ООН в рамках Парижского соглашения.

15. В 2021 году Агентство провело три миссии по комплексной оценке ядерной инфраструктуры (ИНИР): в Кении (повторная, этап 1), Уганде (этап 1) и Узбекистане (этап 2). Запланированная миссия в Шри-Ланке (этап 1) была отложена из-за COVID-19 (рис. А.5). Агентство также получило просьбы о проведении миссии ИНИР этапа 1 от Замбии и миссии ИНИР этапа 3 от Бангладеш. В настоящее время ведется их подготовка, и их предполагается провести в 2022 и 2023 годах, соответственно.



РИС. А-5. МАГАТЭ провело оценку развития ядерно-энергетической инфраструктуры в Уганде.

16. Кроме того, 15 государств-членов осуществляют комплексные планы работы (КПР). Из-за последствий COVID-19 КПР рассматривались в полном объеме или в порядке среднесрочного обзора на виртуальных совещаниях с основными группами.

Миссии по комплексной оценке ядерной инфраструктуры



Тенденции

17. К 2035 году число стран, эксплуатирующих АЭС, может увеличиться примерно на 30%: к нынешним 32 странам могут присоединиться 10–12 стран-новичков. Для столь значительного роста требуется дальнейшее повышение готовности инфраструктуры этих стран при поддержке Агентства, что позволит обеспечить ответственное внедрение ядерной энергетики.

К 2035 году



число стран, эксплуатирующих АЭС, может увеличиться примерно на **+30%** *

благодаря **10–12** новым странам, эксплуатирующим АЭС

18. Одним из важных технологических достижений, привлекающих внимание тех, кто планирует энергетику и определяет политику, является ожидаемое к 2030 году появление и начало эксплуатации нескольких первых в своем роде конструкций ММР. В результате несколько стран, приступающих к развитию ядерной энергетики, обеспечили учет ММР в рамках своих технологических соображений или продолжили следить за развитием событий в этой области. К ним относятся такие страны-новички, как Гана, Замбия, Кения, Индонезия, Иордания, Польша, Саудовская Аравия, Судан, Филиппины и Эстония, и страны, расширяющие свои ядерно-энергетические программы, — Болгария, Румыния, Чешская Республика и Южная Африка. Это обусловлено достижениями в технологиях ММР и преимуществами, которые могут иметь ММР по сравнению с крупными АЭС, а именно меньшими начальными капитальными затратами, совместимостью с небольшими электросетями, неэлектрическими применениями и возможностью добавления новых модулей.

19. Следует подчеркнуть, что независимо от того, основана ли та или иная программа на крупных АЭС или на ММР, в рамках национальной ядерно-энергетической инфраструктуры одинаково строгое и постоянное внимание должно уделяться соблюдению требований ядерной безопасности, физической ядерной безопасности и гарантий.

20. В то же время десять государств-членов, приступающих к разработке своих ядерно-энергетических программ на основе эволюционных АЭС, проявляют неизменный интерес к атомным электростанциям большой мощности. Государства-члены сообщают о своей цели использовать типовой проект в эксплуатации и воспользоваться опытом, накопленным регулирующими органами и операторами в стране происхождения.

А.4. Развитие ядерно-энергетических технологий

Текущее состояние

21. Во многих частях мира уже весьма хорошо зарекомендовали себя эволюционные ядерные энергетические реакторы, т. е. конструкции, предусматривающие лишь умеренные модификации или усовершенствования по сравнению с существующим парком АЭС. Усовершенствованные водоохлаждаемые реакторы уже эксплуатируются в Беларуси, Китае, ОАЭ, Российской Федерации и Японии. В других странах, таких как Аргентина, Соединенное Королевство, США, Финляндия и Франция, усовершенствованные водоохлаждаемые реакторы различной мощности находятся на продвинутом этапе строительства, а в некоторых случаях вводятся в эксплуатацию. Два быстрых реактора промышленного масштаба с натриевым теплоносителем эксплуатируются в Российской Федерации, где также начато строительство первого в своем роде быстрого реактора со свинцовым теплоносителем. Кроме того, быстрые реакторы эксплуатируются или строятся в Индии и Китае. В Китае в декабре 2021 года к сети был подключен первый модульный высокотемпературный газоохлаждаемый реактор с шаровыми твэлами.

22. Одновременно с этим растет интерес государств-членов к быстрой разработке и оперативному внедрению инновационных реакторов, т. е. усовершенствованных конструкций, предусматривающих концептуальные изменения в подходах к проектированию или в конфигурации системы по сравнению с существующей практикой. Разрабатываются инновационные концепции всех основных типов реакторов: водоохлаждаемых реакторов, высокотемпературных и сверхвысокотемпературных газоохлаждаемых реакторов, реакторов на быстрых нейтронах с натриевым и свинцовым теплоносителем, газоохлаждаемых реакторов на быстрых нейтронах, реакторов на солевых расплавах и, совсем недавно, микрореакторов. Разработка одних рассчитанных на ближайшую перспективу концепций практически завершена, в то время как в отношении других, более передовых конструкций еще предстоит проделать много работы, включая научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР), испытания в рамках технико-экономического обоснования и полноценную проработку аспектов безопасности. Во всем мире несколько конструкторских бюро и поставщиков разрабатывают ряд прототипов и демонстрационных инновационных реакторов.

23. В последнее десятилетие ядерная отрасль и все большее число государств-членов проявляют особый интерес к отдельной категории усовершенствованных реакторов — малым модульным реакторам (ММР), которые предполагается внедрить в ближайшем будущем. Многие ММР ориентированы на нишевые рынки электроэнергии или энергоснабжения, для которых усовершенствованные реакторы большой мощности не будут целесообразными. Ожидается, что ММР удовлетворят потребность в гибком производстве электроэнергии для широкого круга пользователей и применений, включая замену стареющих электростанций, работающих на ископаемом топливе, выработку электроэнергии в удаленных и не охваченных электросетями районах, когенерацию для электрических и неэлектрических применений и создание гибридных энергосистем, работающих на ядерных и возобновляемых источниках энергии.

Тенденции

24. С появлением мощных вычислительных средств и инструментов анализа данных в ядерной отрасли начали внедряться методы искусственного интеллекта, машинного обучения и глубокого обучения для широкого спектра перспективных видов деятельности, которые могут изменить то, как проектируются, лицензируются и эксплуатируются ядерные системы. Искусственный интеллект способен улучшить интеграцию вычислений и экспериментальных данных, собранных в ходе маломасштабных экспериментов или с датчиков во время эксплуатации. Такая интеграция в случае ее оптимизации позволяет ученым, специализирующимся на вычислительной науке, разрабатывать физические модели беспрецедентной точности и помогает ученым-экспериментаторам свести к минимуму стоимость и количество проверочных экспериментов для не имеющих аналогов систем. Она также позволяет операторам системы отслеживать состояния системы, которые не могут быть непосредственно измерены приборами. Методологии и инструменты искусственного интеллекта могут применяться для прогнозного анализа на основе физических законов, который может использоваться для оптимизации проектирования, производства и строительства, повышения эффективности эксплуатации, улучшения новых конструкций реакторов, обнаружения дефектов с помощью моделей и создания усовершенствованных систем контроля. Искусственный интеллект также может принести ядерной отрасли дополнительные преимущества в плане надежности, безопасности и общей эффективности.

А.4.1. Усовершенствованные водоохлаждаемые реакторы

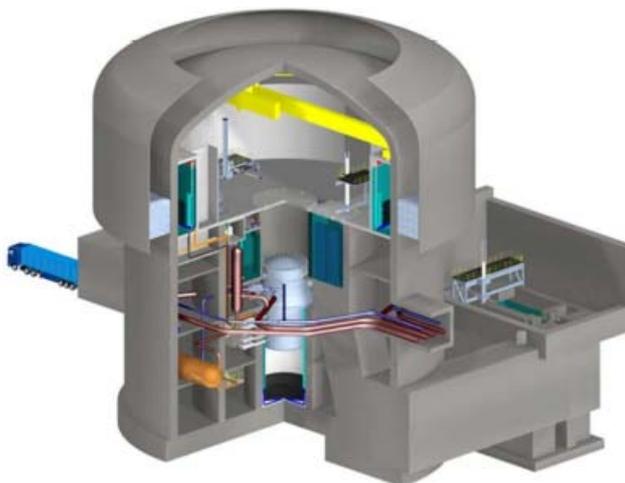
Текущее состояние

25. Водоохлаждаемые реакторы (WCR) играют значительную роль в коммерческой ядерной отрасли с момента ее создания, и в настоящее время на них приходится более 95% всех действующих гражданских энергетических реакторов в мире. По состоянию на конец 2021 года 48 из 51 строящегося ядерного реактора будут охлаждаться легкой или тяжелой водой.

26. В 2021 году в число основных событий, связанных с усовершенствованными водоохлаждаемыми реакторами, вошли начало строительства реактора HPR-1000 (третий энергоблок АЭС «Чанцзян» в Китае), реакторов ВВЭР-1200 (В-491) (седьмой энергоблок АЭС «Тяньвань» и третий энергоблок АЭС «Сюйдабао» в Китае) и ВВЭР (В-509) (третий энергоблок АЭС «Аккую» в Турции), а также подключение к сети новых мощностей: реактора APR-1400 (второй энергоблок АЭС «Барака» в Объединенных Арабских Эмиратах), реактора ACPR-1000 (пятый энергоблок АЭС «Хуньяньхэ» в Китае), реактора CNP-1000 (шестой энергоблок АЭС «Тяньвань» в Китае), реактора ACP-1000 (второй энергоблок АЭС «Карачи» в Пакистане) и реактора PHWR-700 (третий энергоблок АЭС «Какрапар» в Индии).

27. В ряде стран также все чаще рассматриваются, изучаются и строятся усовершенствованные варианты существующих водоохлаждаемых реакторов и постепенно внедряются более эффективные усовершенствованные топливные циклы.

28. Четыре страны (Канада, Китай, Российская Федерация и Япония) и Европейский союз участвуют в совместных НИОКР, связанных с концептуальными конструкциями сверхкритического водоохлаждаемого реактора (SCWR). Основной целью SCWR является эффективное, экономичное и безопасное производство электроэнергии. Большинство установок SCWR разработаны для выработки электроэнергии мощностью свыше 1000 МВт (эл.) при рабочем давлении около 25 МПа и температуре на выходе реактора от 500°C до 625°C. В результате SCWR могут генерировать электричество с тепловым КПД от 43% до 48%, что значительно выше, чем у нынешнего парка ядерных реакторных систем. Высокая температура на выходе из активной зоны SCWR создает условия, благоприятные для когенерации, включая производство водорода, теплоснабжение и производство пара. Большинство концептуальных проектов SCWR предусматривают выработку более 1000 МВт (эл.) в базовом режиме работы, что считается чрезмерным для небольших удаленных населенных пунктов, малых горнодобывающих предприятий и нефтедобывающей отрасли. Благодаря модульной конфигурации концептуальные проекты SCWR могут быть уменьшены в масштабах для удовлетворения потребностей на местах. Кроме того, начата разработка концептуальных проектов малых и очень малых SCWR. Китай разрабатывает концептуальный проект малого реактора мощностью 150 МВт (эл.) в качестве демонстрационной станции. Завершено концептуальное проектирование канадского SCWR (канального реактора с тяжеловодным замедлителем) (рис. А.6), а также китайского CSR1000.



*РИС. А-6. Канадский проект SCWR: здание реактора в разрезе.
(Изображение: Шуленберг и Люн, Канадские ядерные лаборатории)*

29. В Европе концептуальный проект высокоэффективного легководного реактора призван доказать экономическую целесообразность легководного реактора, обладающего высокой эффективностью и работающего на воде сверхкритического давления с ожидаемым КПД около 44% и целевой температурой пара на выходе в 500°C без превышения имеющихся ограничений для материала оболочки. В Российской Федерации концептуальные проекты инновационных водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) с теплоносителем под сверхкритическим давлением также предусматривают возможность использования активной зоны с быстрым спектром нейтронов.

Тенденции

30. Большинство усовершенствованных водоохлаждаемых реакторов имеют повышенную выходную мощность: у недавно построенных установок она находится в пределах 1000–1700 МВт (эл.), и в настоящее время ведется разработка еще более мощных аналогов. Кроме того, наблюдается отчетливая тенденция к размещению на одной площадке нескольких энергоблоков с реакторами одного или нескольких типов, что свидетельствует о стремлении к экономии за счет эффекта масштаба при строительстве коммерческих ядерных реакторов. Около 30 стран, в которых в настоящее время нет действующих АЭС, рассматривают возможность их строительства. Предполагается, что первыми реакторами в этих странах-новичках будут усовершенствованные водоохлаждаемые реакторы.

А.4.2. Реакторы малой и средней мощности и модульные реакторы, в том числе высокотемпературные реакторы

Текущее состояние

31. В 2021 году многие государства-члены достигли заметного прогресса в разработке технологий ММР, которые планируется внедрить в краткосрочной перспективе. В настоящее время разрабатывается более 70 конструкций ММР основных типов для различных применений.

32. В Российской Федерации с мая 2020 года ведется коммерческая эксплуатация плавучей АЭС «Академик Ломоносов» с двумя реакторными модулями КЛТ-40С. Она была подключена к сети в декабре 2019 года и обеспечивает низкоуглеродной электроэнергией и тепловой энергией порт Певек. В Китае 20 декабря 2021 года к сети был подключен высокотемпературный газоохлаждаемый модульный реактор с шаровыми твэлами (HTR-PM) (рис. А.7). Критичность в двух реакторных модулях HTR-PM была достигнута в августе и ноябре 2021 года,

соответственно. HTR-PM, представляющий собой демонстрационную установку, будет вырабатывать 210 МВт (эл.). В Аргентине на площадке АЭС «Нестор Карлос Киршнер» на продвинутом этапе строительства находится реактор CAREM-25, представляющий собой прототип интегрального реактора с водой под давлением (iPWR). В настоящее время загрузка топлива и ввод в эксплуатацию запланированы на 2024 год. Валовая мощность реактора составит 100 МВт (тепл.) и 34 МВт (эл.).



РИС. А-7. В Китае 20 декабря 2021 года к электросети был подключен реактор HTR-PM. (Фото: Университет Цинхуа, Институт ядерных и новых энергетических технологий, Китай)

33. В июле 2021 года в Китае в городе Чанцзян провинции Хайнань началось строительство реактора АСР100 мощностью 125 МВт (эл.), также известного как «Линлун-один». Этот интегральный реактор с водой под давлением спроектирован как многоцелевой реактор малой мощности. В Соединенных Штатах Америки Комиссия по ядерному регулированию (КЯР) утвердила стандартную конструкцию реактора NuScale. Энергетический модуль NuScale (NPM) представляет собой интегральный реактор с водой под давлением с естественной циркуляцией. Строительство NPM, состоящего из шести модулей мощностью 77 МВт (эл.) каждый, начнется в ближайшие три года на площадке рядом с Айдахской национальной лабораторией, и к 2029 году он должен быть введен в эксплуатацию.

34. К концу 2021 года по меньшей мере 16 государств-членов приступили к реализации национальных программ по проектированию ММП и разработке соответствующих технологий, преимущественно в рамках международного сотрудничества. В июле 2021 года Япония возобновила эксплуатацию своего высокотемпературного испытательного реактора (HTTR) с призматическими твэлами, вырабатывающего 30 МВт (тепл.). До этого 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.). Во Франции продолжается разработка интегрального ММП с водой под давлением NUWARD мощностью 340 МВт (эл.) (в составе двух реакторов мощностью 170 МВт (эл.)) с принудительной конвекцией и усовершенствованными системами безопасности. Такие реакторы предполагается сооружать в начале 2030-х годов за пределами Франции. Соединенное Королевство также продолжает разработку собственного ММП — трехконтурного реактора с водой под давлением

мощностью 470 МВт (эл.), предназначенного для сооружения в самой стране и за рубежом к 2030 году. В Российской Федерации было принято решение о начале строительства в 2024 году в Якутии РИТМ-200Н — наземного интегрального реактора с водой под давлением, который будет вырабатывать 50 МВт (эл.). Несколько реакторных блоков РИТМ-200 были установлены на атомных ледоколах. В Канаде «дорожная карта» и план действий по ММР предусматривают возможное применение ММР для замены электростанций на ископаемом и дизельном топливе, как подключенных к сети, так и работающих автономно и используемых, в частности, в нефтяной и горнодобывающей промышленности.

Тенденции

35. В 2021 году в нескольких странах, включая Канаду, Российскую Федерацию, Соединенное Королевство, Соединенные Штаты Америки, Чешскую Республику и Японию, активизировалась разработка микрореакторов, являющихся одним из видов ММР. Микрореакторы основных технических модификаций рассматриваются в качестве оптимального решения для обеспечения когенерации тепловой и электроэнергии в отдаленных районах и на небольших островах, а также для замены дизельных генераторов.

36. В большем числе стран ведется разработка реакторов морского базирования. Российская Федерация разработала четыре проекта ММР для плавучих энергоблоков и один проект под названием «ШЕЛЬФ» для подводного энергоблока (рис. А.8). В Китае имеется по меньшей мере один проект, АСРР100, предназначенный для снабжения электроэнергией морских нефтяных и газовых платформ. Республика Корея также продолжает разработку плавучего энергоблока BANDI-60 на базе реактора с водой под давлением.

37. Общей целью разработки ММР является демонстрация того, что меньшая мощность и модульный принцип позволят снизить начальные капитальные затраты благодаря экономии за счет серийного производства, а также что упрощение конструкции и сокращение сроков строительства сделают их доступными с финансовой точки зрения. Чтобы помочь государствам-членам прийти к общему пониманию их потребностей и характерных особенностей, связанных с ММР, Агентство инициировало создание новой рамочной основы для разработки типовых пользовательских требований и критериев в отношении конструкций и технологий ММР. Основным преимуществом национального документа с типовыми пользовательскими требованиями и критериями является то, что в нем содержится набор ключевых политических, технических и экономических требований, что призвано помочь странам-новичкам в проведении оценки реакторных технологий, а затем в разработке 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.



РИС. А-8. АЭС «Академик Ломоносов» с двумя реакторами КЛТ-40С находится в коммерческой эксплуатации с мая 2020 года и производит 70 МВт (эл.) в Певеке, Российская Федерация.

(Фото: Росатом, АО «ОКБМ Африкантов»)

А.4.3. Быстрые реакторы

Текущее состояние

38. Российская Федерация продолжает эксплуатировать два промышленных быстрых реактора с натриевым теплоносителем (SFR) — БН-600 и БН-800 на Белоярской АЭС — и проектирует SFR четвертого поколения БН-1200, который будет построен на той же площадке. В Дмитровграде ведется строительство многоцелевого исследовательского реактора на быстрых нейтронах. В июне 2021 года в Северске была произведена первая заливка бетона в основание первого экспериментального и демонстрационного реактора со свинцовым теплоносителем — БРЕСТ-ОД-300. В Китае в уезде Сяпу провинции Фуцзянь продолжилось строительство второго быстрого реактора с натриевым теплоносителем — CFR-600. В Индии в 2020 году ожидалось достижение первой критичности прототипа быстрого реактора-размножителя с натриевым теплоносителем мощностью 500 МВт (эл.), однако его ввод в эксплуатацию был отложен. В 2021 году компании «ТерраПауэр» и «Дженерал Электрик Хитачи Ньюклеар Энерджи» объявили о планах по строительству в штате Вайоминг, США, усовершенствованного гибридного реактора Natrium, представляющего собой SFR мощностью 345 МВт (эл.) в сочетании с энергетической системой на солевых расплавах для увеличения пиковой мощности до 500 МВт (эл.) (рис. А.9).



РИС. А-9. Билл Гейтс выступает в компании «ТерраПауэр» на фоне макета под сборки с натриевым теплоносителем. (Фото: Gates Notes)

Тенденции

39. Быстрые реакторы с натриевым теплоносителем работают на проверенных технологиях и эксплуатируются на протяжении более 400 реакторо-лет. Большинство действующих и вновь построенных ядерных энергетических систем на быстрых нейтронах относится именно к этому типу. В то же время все большее внимание привлекает технология тяжелого жидкометаллического теплоносителя, особенно применительно к ММР, несколько инновационных конструкций которых основаны на реакторах со свинцовым или свинцово-висмутовым (эвтектический сплав) теплоносителем. Несколько стран в своих инновационных концептуальных проектах также рассматривают в качестве перспективной технологии гелиевые реакторы и реакторы на солевых расплавах. В целом считается, что быстрые реакторы являются одним из ключевых компонентов будущей устойчивой ядерной энергетики, поскольку для ее масштабного развития потребуется использовать весь потенциал ресурсов природного урана и/или тория.

А.4.4. Неэлектрические применения ядерной энергетики

Текущее состояние

40. В 2021 году для неэлектрических применений (опреснение, централизованное теплоснабжение и технологический нагрев) использовался в общей сложности 61 действующий ядерный реактор, при этом за год вырабатывалось более 2167 ГВт·ч теплового эквивалента электрической энергии. Из этих реакторов 48 использовались для централизованного теплоснабжения, 3 — для выработки технологического тепла в промышленных целях, 5 — как для централизованного, так и промышленного теплоснабжения и еще 5 — для опреснения воды.

41. Во всем мире проявляется беспрецедентный интерес к использованию ядерной энергии для целей, не связанных с производством электроэнергии, в частности потому, что в результате появляется возможность производить тепло, водород или другие продукты без каких-либо выбросов углерода. Теплоснабжение за счет ядерной энергии осуществляется с помощью отработанных технологических процессов и имеет широкие рыночные перспективы и большой потенциал развития. Присоединившись к группе опытных пользователей в сфере централизованного теплоснабжения, включающей Болгарию, Венгрию, Российскую Федерацию, Румынию, Словакию, Украину, Чешскую Республику и Швейцарию, Китай в конце 2020 года начал обеспечивать централизованное теплоснабжение от АЭС «Хайян» в провинции Шаньдун. Использование тепловой энергии, вырабатываемой первым и вторым энергоблоками АЭС «Хайян» (реакторы AP1000 третьего поколения), позволило заменить угольные котлы, что

привело к сокращению выбросов углекислого газа на 180 тыс. тонн в год. Кроме того, на АЭС «Циньшань» в провинции Чжэцзян началась реализация демонстрационного проекта по централизованному теплоснабжению, цель которого — к 2025 году обеспечить теплоснабжением за счет ядерной энергии площадь в 4 млн м², охватывающую основную городскую агломерацию уезда Хайань и всю территорию города Шупу.

42. Несколько стран рассматривают возможность производства водорода с использованием либо электроэнергии, либо тепловой энергии, вырабатываемой ядерными реакторами. Согласно недавнему обзорному исследованию, основанному на проведенном Агентством моделировании, ядерная энергия может обеспечить наиболее экономичный способ производства чистого водорода, если цены на газ останутся значительно выше низких уровней, наблюдавшихся в течение последних десятилетий. Этот сдвиг произойдет, если природный газ будет стоить 10–15 долл. США за миллион британских тепловых единиц. Эта цена значительно ниже той, которая уже наблюдалась во второй половине этого года в Европейском союзе, Соединенном Королевстве и некоторых регионах Азии.

43. В октябре 2021 года Франция объявила о том, что к 2030 году она намерена приступить к сооружению одного малого модульного реактора и использовать другие АЭС для производства чистого водорода путем электролиза. Российская Федерация выбрала площадку Кольской АЭС для проведения испытаний по производству чистого водорода путем электролиза. Кроме того, в 2021 году Соединенные Штаты Америки объявили о выделении 20 млн долл. США на демонстрацию технологии производства экологически чистой водородной энергии с помощью ядерной энергетики. Это будет способствовать достижению цели инициативы Hydrogen Shot, реализация которой началась в этом году. Она предусматривает, что в течение одного десятилетия стоимость 1 кг водорода составит 1 долл. США.



Тенденции

44. Перспективные технологии, такие как ММР и микрореакторы, ориентированы на системы меньшей мощности, подходящие для применений, не связанных с электросетями, таких как низкоуглеродное централизованное теплоснабжение, технологический нагрев в промышленных целях, производство водорода и гибкая генерация электроэнергии. Микрореакторы особенно хорошо подходят для выработки экологически чистой и доступной энергии на децентрализованных автономных рынках. Особый интерес представляют концепции

усовершенствованных реакторов, способных вырабатывать тепло высокой температуры, благодаря чему могут существенно расшириться возможности по использованию тепла. В настоящее время в нескольких странах разрабатываются высокотемпературные реакторы (HTR). Значительный прогресс в этой области отмечается в Японии, а в Китае в провинции Шаньдун недавно было начато строительство первого высокотемпературного реактора с шаровыми твэлами.

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

Текущее состояние

45. Наблюдается устойчивый прогресс в сборке оборудования и установок в рамках проекта ИТЭР, несмотря на беспрецедентное давление из-за пандемии и трудности, возникшие при изготовлении некоторых уникальных компонентов ИТЭР. Был достигнут существенный прогресс в сборке и интеграции оборудования ИТЭР, включая установку цилиндрического теплового экрана нижнего криостата в шахту токамака, сварку первых двух секций криостата, установку первых двух сверхпроводящих магнитов в шахту токамака и поставку двух катушек тороидального поля (из Европы и Японии), а также первого модуля центрального соленоида (из США), который будет собран из шести независимых модулей, уложенных в конструкцию высотой 18 метров (рис. А.10).



РИС. А-10. Модуль центрального соленоида ИТЭР весом 110 тонн загружается в трюм судна общего назначения для отправки из США на площадку ИТЭР во Франции. Центральный магнит высотой в пять этажей и весом 1000 тонн будет индуцировать в плазме ИТЭР электрический ток силой 15 млн ампер для генерирования плазменных импульсов и обеспечения вертикальной стабильности плазмы. Для этого центральный соленоид будет обеспечивать напряженность магнитного поля в 13 тесла, что примерно в 280 000 раз сильнее магнитного поля Земли. (Фото: US ITER)

46. 28-я Конференция МАГАТЭ по энергии термоядерного синтеза, проведенная 10–15 мая 2021 года в виртуальном формате, свидетельствовала о качестве теоретических, экспериментальных, технологических и материаловедческих разработок, ведущихся во всем

мире, и о значительном прогрессе, достигнутом в работе ныне действующих установок, включая некоторые новые устройства, недавно введенные в эксплуатацию, а именно JT-60SA в Японии, HL-2M в Китае и MAST-U в Соединенном Королевстве.

47. Результаты экспериментов, проведенных на европейском токамаке JET в рамках подготовки к серии экспериментов с тритием и дейтерием–тритием, позволили получить важную информацию для создания системы ИТЭР по предотвращению срывов, а также ключевые данные по обращенным к плазме компонентам и по ядерным технологиям. Результаты анализа экспериментов, проведенных на оптимизированном стеллараторе Wendelstein 7-X в Германии, подтвердили, что потери энергии плазмы снижаются, что дает уверенность в том, что недостатки более ранних конструкций стеллараторов могут быть преодолены и что устройства стеллараторного типа могут также подойти для электростанций. Результаты нового эксперимента Управления по атомной энергии Соединенного Королевства (УАЭСК) на установке MAST-U в Кулхэмском центре термоядерной энергии продемонстрировали эффективность инновационной системы отвода тепла, призванной сделать компактные термоядерные электростанции коммерчески целесообразными. Новая система, получившая название «дивертор Super-X», позволит намного увеличить срок службы компонентов будущих коммерческих токамаков, делая электростанции более доступными и повышая их экономическую привлекательность. На опытном реакторе-токамаке с дивертором (ДТТ), сооружаемом на площадке Итальянского национального агентства по новым технологиям, энергетике и устойчивому экономическому развитию в коммуне Фраскати, в течение следующих десятилетий также будут испытываться диверторы с различной геометрией и сравниваться их показатели в условиях плазмы с высокой плотностью энерговыделения, максимально соответствующих реальной горячей плазме.

48. Курчатовский институт в Российской Федерации приступил к эксплуатации модернизированного токамака T-15МД (рис. А.11). Программа исследований на токамаке T-15МД будет ориентирована на решение наиболее насущных проблем ИТЭР. Эксперименты на Национальной установке по термоядерному зажиганию в Ливерморской национальной лаборатории им. Лоуренса в США позволили сделать значительный шаг в деле демонстрации производства энергии термоядерного синтеза: выработка термоядерной энергии составила более 1,3 мегаджоуля.



РИС. А-11. Токамак Т-15МД имеет водяное охлаждение и способен создавать тороидальное магнитное поле на оси плазмы 2 Т; он также будет оснащен мощными системами дополнительного нагрева плазмы с суммарной мощностью на входе в плазму до 20 МВт и окружен современной инженерно-технической инфраструктурой. Ток в плазме должен достигать силы 2,0 МА с длительностью 10 с. Токамак Т-15МД строился в течение десяти лет, и его программа экспериментов позволит внести вклад в работу ИТЭР и будущих термоядерных электростанций. (Фото: Курчатовский институт)

49. Одним из ключевых элементов развития термоядерного синтеза в качестве коммерчески целесообразного источника энергии является создание надлежащей системы безопасности и регулирующей основы для термоядерных устройств. В 2021 году в Европе, Китае, Соединенном Королевстве и США началась реализация ряда инициатив по созданию специальной регулирующей основы для термоядерного синтеза на национальном уровне. Агентство также приступило к сбору всей имеющейся информации в этой области, чтобы предоставлять рекомендации и делиться наилучшей практикой на международном уровне, при этом конечная цель заключается в содействии гармонизации регулирующей основы для термоядерного синтеза.

Тенденции

50. В последние семь лет создается все больше предприятий с участием частного капитала, занимающихся термоядерным синтезом. Новые компании появляются по всему миру, в основном в государствах-членах, участвующих в проекте ИТЭР (Европейский союз, Индия, Китай, Республика Корея, Российская Федерация, Соединенные Штаты Америки и Япония), а также в Соединенном Королевстве. Кроме того, в 2020 году в Университете Нового Южного Уэльса, Австралия, была основана стартап-компания, отделившаяся от проекта. Модель партнерства с государственно-частным финансированием, реализованная в США, оказалась весьма успешной, и другие государства-члены изучают возможность воспроизведения этой схемы. В Информационной системе по термоядерным устройствам¹ (рис. А.12) приводится

¹ <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/FusDIS.aspx>

обзор всех государственных и частных термоядерных устройств с экспериментальными и демонстрационными конструкциями, которые в настоящее время эксплуатируются, строятся или планируются.



*РИС. А-12. В настоящее время эксплуатируются, строятся или планируются более 130 экспериментальных термоядерных устройств, как государственных, так и частных, а ряд организаций рассматривают варианты конструкций демонстрационных термоядерных электростанций.
(Источник: Информационная система МАГАТЭ по термоядерным устройствам)*

51. УАЭСК выступило с амбициозной инициативой к 2040 году продемонстрировать возможность выработки электроэнергии нетто за счет термоядерного синтеза, что предусматривает строительство сферического токамака для производства энергии (STEP). Эта установка позволит получить знания и опыт в области технического обслуживания в течение всего срока эксплуатации и самообеспечения топливом. К 2024 году предполагается утвердить концептуальный проект STEP, который на первом этапе будет представлять собой сферический токамак, подключенный к национальной сети и производящий энергию нетто, но не для коммерческих целей. На начало работ по проектированию STEP было выделено 222 млн фунтов стерлингов (264 млн евро). В настоящее время в Соединенном Королевстве изучаются различные варианты расположения, и окончательное решение ожидается к концу 2022 года (рис. А.13).



РИС. А-13. Планируемое здание STEP. (Изображение: УАЭСК)

В. Ядерный топливный цикл

В.1. Начальная стадия топливного цикла

Текущее состояние

52. В первом квартале 2021 года спотовая цена на уран составляла около 26,50 долл. США за фунт U_3O_8 . Из-за стабилизации цен на столь низком уровне нескольким производителям первичного урана пришлось держать свои месторождения на консервации или сохранять сниженные объемы добычи². С 2011 года предложение на рынке урана превышает спрос; однако на фоне неизменной востребованности урана для изготовления ядерного топлива и ввиду сокращения первичного производства сохранение низких рыночных цен ведет к постепенному снижению общемировых запасов U_3O_8 . Тенденция к сокращению запасов была очевидна в 2020 и 2021 годах.

53. Устойчивый спад общемирового первичного производства в течение 2020 и 2021 годов выявил уязвимость рынка урана. Это побудило ряд инвесторов, фондов, продавцов и производителей первичного урана закупить U_3O_8 на рынке в ответ на прогнозируемый сдвиг в структуре спроса и предложения U_3O_8 . Например, в октябре 2021 года «Казатомпром» объявил о намерении участвовать в фонде физического урана (под названием «ANU Energy»), который будет заниматься хранением физического урана в качестве долгосрочной инвестиции. Ранее на рынке урана не наблюдалось, чтобы различные субъекты, не связанные с ядерной энергетикой, производили такие закупки U_3O_8 в глобальном масштабе. В результате сокращения запасов и активизации торговли U_3O_8 в 2021 году спотовая цена в конце октября 2021 года увеличилась на 74% по сравнению с первым кварталом 2021 года и составила около 46,00 долл. США за фунт U_3O_8 .

² Еще один крупный производитель урана «Казатомпром» (Казахстан) объявил о сокращении добычи на своих рудниках подземного выщелачивания на 20%, причем такое сокращение сохранялось в течение всего 2021 года.

54. Производство ядерного топлива — это отработанная технология, непрерывно совершенствуемая с течением времени благодаря автоматизации и цифровизации, сокращению количества эксплуатационных отходов, повышению уровня радиационной защиты работников, а также уменьшению числа случаев повреждения топлива в реакторах. Имеющихся в мире мощностей по изготовлению ядерного топлива достаточно для покрытия ожидаемых потребностей в ядерной энергии, и был достигнут существенный прогресс в демонстрации безопасности новых усовершенствованных типов топлива (ATF), предназначенных для облучения в ядерных энергетических реакторах нынешнего и следующего поколений, включая ММР (например, разработанная компанией «Фраматом» конструкция топливных сборок GAIA, включающая усовершенствованное устойчивое к авариям топливо PROtect; концептуальные проекты устойчивого к авариям топлива компаний «Глобал Ньюклар Фьюелз» и «Вестингауз», состоящего из циркалоевой оболочки с покрытием и легированных гранул UO₂; модель ТВС-2М компании «ТВЭЛ» с оболочкой из циркония с хромовым покрытием и хромо-никелевым сплавом; разработанное «Росатомом» РЕМИКС-топливо, предназначенное для многократного рециклирования урана и плутония в легководных реакторах (LWR); а также разрабатываемая компанией «Клин кор» технология усовершенствованного ядерного топлива для увеличения ресурса (ANEEL), направленная на значительное улучшение характеристик топлива в реакторах CANDU за счет применения смеси тория и высокообъемного низкообогащенного урана (ВНОУ)).

55. Национальная ядерная лаборатория Соединенного Королевства (НЯЛ) оценила несколько конструкций ATF с точки зрения проработанности, экономической эффективности и безопасности.

Тенденции

56. С 2012 года объем расходов на разведку урана непрерывно сокращается, что обусловлено стабильно низким уровнем цен на уран, причем с начала 2020 года дополнительное негативное воздействие оказала пандемия COVID-19. Недавнее повышение рыночных цен на уран в 2021 году стало стимулом к некоторым инвестициям, возобновлению в определенных объемах деятельности по разведке и добыче, а также определенному восстановлению первичного производства.

57. Происшедшее в 2021 году резкое увеличение спотовых цен на уран побудило некоторые компании³, чьи урановые рудники и перерабатывающие заводы были законсервированы, изучить планы восстановления деятельности. Если мировые запасы U₃O₈ будут и далее уменьшаться, а спотовая цена на уран будет стабильно расти, то у других предприятий, законсервировавших свои добывающие и перерабатывающие мощности, появится стимул возобновить их эксплуатацию и начать разработку новых проектов по производству урана для коммерческих целей или обеспечения гарантированных внутренних поставок⁴.

58. Существует необходимость в инновациях, способных сделать целесообразной разработку малоперспективных месторождений урана. В 2021 году одним из заметных примеров таких инноваций в уранодобывающей отрасли стали положительные результаты технико-экономических обоснований, связанных с разработкой рудников подземного выщелачивания на богатых месторождениях несогласного залегания. Другой значимой инновацией являются ныне

³ Например, в октябре оператор уранового рудника «Лангер-Хайнрих» в Намибии объявил, что прорабатывает системно значимые элементы, необходимые для возобновления эксплуатации его уранового рудника и перерабатывающего завода.

⁴ Например, проект «Бадрах энерджи» в Монголии: в июле было объявлено о начале пробных испытаний на месторождении Зуувч-Овоо. Кроме того, в июле Иорданская уранодобывающая компания объявила, что ее демонстрационная установка полностью введена в эксплуатацию и может перерабатывать 70 тонн руды ежегодно. По результатам этих испытаний будет оцениваться техническая, природоохранная и экономическая целесообразность освоения этих месторождений, а также их пригодность для развертывания полномасштабного производства.

разрабатываемые методы биовыщелачивания, предназначенные для подземного выщелачивания урана на месторождениях песчаникового типа.

59. С 2011 года идет международная работа по повышению безопасности и улучшению характеристик топлива, которое применяется в действующих LWR. Кроме того, новые типы топлива разрабатываются для реакторов инновационных конструкций, в частности реакторов поколения IV и ММР (в диапазоне от уменьшенных версий сборок для LWR до полностью новых конструкций топлива поколения IV), некоторые из которых уже доведены до демонстрационного масштаба (например, HTR-PM в Китае), а также в целях улучшения экономических показателей и повышения устойчивости ядерной энергетики (продления циклов облучения топлива, увеличения глубины выгорания, организации циклов бездефектной эксплуатации, применения инновационных методов изготовления топлива, внедрения новых топливных циклов и многократного рециклирования ядерных материалов из отработавшего ядерного топлива). Для изготовления многих разновидностей инновационного ядерного топлива, например ATF и топлива для ММР, требуется ВНОУ.

В.2. Конечная стадия топливного цикла

Текущее состояние

60. Скорость накопления отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в мировых хранилищах составляет приблизительно 7 тыс. тонн тяжелого металла (тТМ) в год, при этом его количество в хранилищах составляет приблизительно 300 тыс. тТМ. В странах с давно существующими ядерными программами, реализующих стратегии открытого топливного цикла, главные трудности связаны с необходимостью увеличить емкость хранилищ ОЯТ и сроки его хранения (более 100 лет).

61. По истечении периода первоначальной выдержки ОЯТ перевозят на сухое хранение. Сроки первоначальной выдержки все чаще стараются сократить, поэтому системы сухого хранения необходимо оснащать более совершенными средствами отвода тепла⁵. В Соединенных Штатах Америки и на Украине выданы лицензии на создание новых централизованных хранилищ. В рабочем порядке внедряются меры по совершенствованию перевозки ОЯТ в тех странах, где она осуществляется. Государства-члены продолжают работы по удалению и перемещению своего отработавшего ядерного топлива в рамках проектов вывода своих АЭС из эксплуатации. Исследователи из Чешской Республики разработали и запатентовали новаторскую технологию «Теплатор», которая позволяет нагревать воду теплом, выделяющимся при радиоактивном распаде⁶.

62. Предусмотрены действия по организации рециклирования: во Франции оно давно налажено в промышленном масштабе, в Японии Федерация электроэнергетических компаний (ФЭЭК) планирует к 2030 году применять МОХ-топливо как минимум на 12 энергоблоках⁷; в Российской Федерации на «Горно-химическом комбинате» в Красноярске завершается строительство опытно-демонстрационного центра для испытания новых технологий переработки

⁵ Рекордные темпы разгрузки активной зоны были продемонстрированы на АЭС «Ойстер-Крик», где последние отработавшие тепловыделяющие сборки были помещены на сухое хранение в мае, спустя 32 месяца после окончательного останова реактора. Комплекс мероприятий по загрузке контейнеров был безопасно завершён в течение 21 недели.

⁶ В апреле исследователи из Чешского технического университета в Праге и Университета Западной Богемии в Пльзене представили запатентованное инновационное решение, предусматривающее нагрев воды за счет тепла, которое выделяется вследствие радиоактивного распада в отработавших топливных стержнях.

⁷ В феврале ФЭЭК выпустила пересмотренный план мер по утилизации плутония, в основе которого лежит актуальный план эксплуатации завода по переработке в Роккасё и завода по изготовлению МОХ-топлива с учетом изменений, произошедших в отрасли за последний год.

отработавшего ядерного топлива в целях их последующего внедрения в промышленных масштабах⁸; в США компания «Окло» и Аргоннская национальная лаборатория объединили свои усилия в целях проведения НИОКР в области технологии электрохимического рафинирования, которая может применяться при переработке топлива, предназначенного для усовершенствованных ядерных энергетических установок, основанных на реакции деления⁹.

63. В ряде стран (например, в Китае, Республике Корея, Российской Федерации, Франции, Японии) в рамках проектов НИОКР продолжается изучение селективного разделения младших актинидов для их дальнейшей трансмутации в реакторах на быстрых нейтронах и/или подкритических системах, что позволит минимизировать объемы высокоактивных ядерных отходов.

64. НЯЛ Соединенного Королевства выпустила «дорожную карту», в которой показано, как наработки в области усовершенствованного топливного цикла могут помочь ядерной энергетике занять свое место в рамках низкоуглеродной энергетики будущего.

Тенденции

65. Для того чтобы и далее обеспечивать безопасное хранение ОЯТ и его последующую перевозку в пункты захоронения или на заводы по переработке, по-прежнему принципиально важно понимать, как ОЯТ ведет себя в различных системах хранения и каковы механизмы старения и деградации конструкций, систем и элементов хранилищ. Осуществляемая Агентством координация исследований в данной области позволяет обобщать эксплуатационный опыт государств-участников и стимулирует обмен информацией.

66. Благодаря более эффективному управлению ядерными реакторами количество образующегося в них ОЯТ со временем сокращается, однако в силу тенденции к росту начального обогащения и глубины выгорания увеличивается остаточное тепловыделение и повышаются риски охрупчивания оболочки; последствия этих явлений могут проявляться на различных этапах обращения с ОЯТ.

67. Необходимо будет изучить методы обращения с ОЯТ из сборок новых конструкций (например, эволюционных ATF и топлива на основе ВНОУ) с более высокой степенью обогащения по урану-235 (до 20%) и новыми оболочками, в частности в связи с увеличением тепловой нагрузки и потенциальными отклонениями в долгосрочном поведении топлива. Одним из решений на ближайшую перспективу может стать создание централизованных хранилищ для размещения отработавшего топлива из остановленных энергетических реакторов; это позволит создать условия для полного вывода площадок из эксплуатации и их реабилитации.

68. В настоящее время на стадии демонстрационных испытаний находятся усовершенствованные процессы многократного рециклирования плутония в LWR (РЕМИКС в Российской Федерации, CORAIL и MIX во Франции), внедрение которых позволит в дальнейшем перейти к стратегиям многократного рециклирования плутония в быстрых реакторах.

⁸ Кроме того, в Российской Федерации ведутся работы по созданию инфраструктуры для демонстрации замыкания ядерного топливного цикла с использованием реакторов на быстрых нейтронах, с 2017 года в Российской Федерации действует промышленное производство МОХ-топлива для реактора на быстрых нейтронах БН-800, а ядерное топливо для реакторов РБМК и ВВЭР производится с использованием регенерированного урана.

⁹ В июне Министерство энергетики США выделило Аргоннской национальной лаборатории финансирование для начала НИОКР в области технологии электрохимического рафинирования, которая может применяться при переработке топлива, предназначенного для усовершенствованных ядерных энергетических установок, основанных на реакции деления. Финансирование было предоставлено на паритетной основе компанией «Окло».

69. Растет интерес к созданию ММР различных конструкций, внедрение которых ориентировочно намечено на ближайшие десять лет. Для них необходимо будет разработать соответствующие топливные циклы, отличающиеся безопасностью, надежностью и устойчивостью.

70. Эти усилия предпринимаются в русле непрерывной деятельности по созданию усовершенствованных реакторов, для которых необходимо будет разработать соответствующие топливные циклы, отличающиеся безопасностью, надежностью и устойчивостью.

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

С.1. Вывод из эксплуатации

Текущее состояние

71. В 2021 году были окончательно остановлены пять ядерных реакторов: первый и второй энергоблоки АЭС «Данджнесс Б» в Соединенном Королевстве, третий энергоблок АЭС «Индиан-Пойнт» в США, первый энергоблок АЭС «Карачи» в Пакистане и первый энергоблок АЭС «Гошэн» на Тайване, Китай. Такие темпы в целом соответствуют динамике окончательного останова реакторов за последние десять лет, в течение которых из эксплуатации было выведено 57 реакторов (из них 18 в Японии и 12 в США). Первый и второй энергоблоки АЭС «Данджнесс Б» стали первыми в Соединенном Королевстве усовершенствованными газоохлаждаемыми реакторами, остановленными окончательно. Оставшиеся реакторы этого типа планируется остановить к концу нынешнего десятилетия. Первый энергоблок АЭС «Карачи», представляющий собой реактор типа CANDU, стал первым окончательно остановленным реактором в Пакистане.

Статус ядерных энергетических реакторов, установок топливного цикла и исследовательских реакторов



72. В ноябре 2021 года было прекращено действие лицензии на третий энергоблок АЭС «Гумбольдт-Бей» в Калифорнии, США, и было разрешено неограниченное использование площадки. Таким образом, к данному моменту из эксплуатации полностью выведен 21 ядерный

энергетический реактор, а еще 177, или приблизительно 28% мирового реакторного парка¹⁰, находятся в состоянии постоянного останова или процессе вывода из эксплуатации. Кроме того, в состоянии постоянного останова или процессе вывода из эксплуатации находятся 166 установок ядерного топливного цикла, а 133 установки полностью выведены из эксплуатации. Помимо этого, окончательно остановлены или находятся в стадии вывода из эксплуатации 123 исследовательских реактора, и полностью выведены из эксплуатации более 446 исследовательских реакторов. Самые масштабные программы вывода из эксплуатации энергетических реакторов реализуются в Германии, где в состоянии постоянного останова или процессе вывода из эксплуатации находятся 27 реакторов, Японии, где в состоянии постоянного останова или процессе вывода из эксплуатации находятся 26 реакторов, и США, где в состоянии постоянного останова или процессе вывода из эксплуатации находятся 25 реакторов.

73. Продолжаются работы на тех реакторных площадках, на которых произошли крупные аварии, включая японскую АЭС «Фукусима-дайити», пострадавшую от аварии после Великого восточнояпонского землетрясения 2011 года (рис. С.1). Плановыми темпами идет работа по удалению отработавшего топлива из бассейнов выдержки энергоблоков 1–4 АЭС «Фукусима-дайити»: сейчас деятельность ведется в блоках 1 и 2 (в блоках 3 и 4 она уже завершена). Еще одним значительным достижением стало получение в августе 2021 года лицензии на эксплуатацию нового безопасного конфайнмента на поврежденном четвертом энергоблоке Чернобыльской АЭС на Украине (рис. С.2). В декабре 2020 года вывод из эксплуатации второго энергоблока АЭС «Три-Майл-Айленд» был поручен профильному консорциуму: работы по выводу из эксплуатации поврежденной установки уже начались, завершить их планируется к 2037 году.



РИС. С-1. Обращение с отработавшим топливом на АЭС «Фукусима-дайити».

74. Что касается деятельности по выводу из эксплуатации установок топливного цикла, то перед демонтажем установки, как правило, обязательно требуется удалить отходы прежней деятельности, обычно хранящиеся в бассейнах или бетонных траншеях. Этот аспект вывода из эксплуатации по-прежнему уверенными темпами реализуется на крупных установках: в

¹⁰ Мировой реакторный парк насчитывает 442 (69%) действующих реактора, 177 (28%) реакторов в состоянии постоянного останова и 21 (3%) полностью выведенный из эксплуатации реактор.

частности, выполняется удаление шлама из бассейнов хранения ранее использовавшегося топлива в Селлафилде, Соединенное Королевство, осуществляется удаление отходов графита и магния, оставшихся от прежней деятельности и хранящихся в бетонных бункерах в Ла-Аге, Франция, производится снос зданий и удаление плит бетонного основания на территории газодиффузионного завода в Окридже, США, и выполняется снос нескольких загрязненных радиацией зданий, которые ранее использовались для нужд радиохимического завода Производственного объединения «Маяк», Российская Федерация.

75. Исследовательские реакторы, выводимые из эксплуатации, расположены главным образом в Германии, Российской Федерации, Соединенном Королевстве, США, Франции и Японии. Несколько проектов по выводу из эксплуатации исследовательских реакторов реализуются в Скандинавии. Одним из важных событий 2021 года стала перевозка облученного топлива из финского реактора FiR-1 в США. Среди других достижений можно выделить работу подведомственного Японскому агентству по атомной энергии Оарайского научно-исследовательского института в префектуре Ибараки, где в марте 2021 года был утвержден план вывода из эксплуатации Японского материаловедческого реактора (JMTR). Весь график работ по демонтажу был поделен на четыре этапа, первый этап демонтажа уже начался.



РИС. С-2. На церемонии по случаю 35-й годовщины чернобыльской ядерной аварии Генеральный директор Рафаэль Мариано Гросси произносит речь в память о жертвах аварии перед новым безопасным конфайнментом.

Тенденции

76. По всей видимости, многие из проблем, приведших к останову ядерных установок за последнее десятилетие, — политико-экономические факторы, расходы на техническое обслуживание и/или переоснащение, конъюнктура рынка электроэнергии — сохранятся и в будущем, а темпы останова, возможно, увеличатся в связи с возрастными характеристиками нынешнего парка, пусть и отчасти компенсируемыми продлением сроков службы. В течение следующих трех десятилетий может быть снято с эксплуатации значительное большинство из приблизительно 300 ядерных энергетических реакторов, функционирующих 30 и более лет. Такого же развития событий следует ожидать и в отношении исследовательских реакторов, парк которых имеет в целом схожую возрастную структуру.

77. Все чаще принимаются решения о том, чтобы приступить к демонтажу установок сразу же после их окончательного останова. Обычно выбор в пользу немедленного демонтажа обусловлен политикой правительства. Примером тому могут служить Германия и Франция, где проводится политика активного содействия таким решениям. Еще одним значимым фактором для владельцев установок может стать неясность с расходными статьями проектов в отдаленном будущем, так как многие владельцы стремятся избегать долгосрочных обязательств с высоким уровнем неопределенности. Именно этим, судя по всему, обусловлено ныне бытующее в США неприятие стратегий отсроченного демонтажа.

78. Таким стратегиям исторически отдавался приоритет в случае реакторов с графитовым замедлителем, что было связано с отсутствием общепринятых стратегий долгосрочного обращения с облученным графитом, а также со значительно большей сложностью их демонтажа, обусловленной, как правило, куда более крупными размерами по сравнению с реакторами с водным замедлителем. Однако даже в случае таких реакторов нынешний баланс, по-видимому, больше склоняется в сторону немедленного демонтажа. Так, Управление по выводу из эксплуатации ядерных объектов Соединенного Королевства решило принять стратегию вывода из эксплуатации магноксовых реакторов с учетом конкретных характеристик каждого объекта, а ранний демонтаж реакторов АЭС «Данджнесс А» и АЭС «Траусвинит» будет проводиться по принципу «обучения на опыте». Продолжается подготовка к немедленному демонтажу установки на Игналинской АЭС, включающая в себя создание хранилища, где облученный графит будет храниться до обустройства долгосрочного геологического захоронения на территории Литвы.

С.2. Восстановление окружающей среды

Текущее состояние

79. Экологическая реабилитация — это комплекс решений по нейтрализации загрязнения участков земли (почвы и грунтовых вод), которое вызвано применением в прошлом ненадлежащих методов хозяйствования. К числу бывших объектов могут относиться ядерные объекты (включая ненужные исследовательские установки и установки топливного цикла), бывшие ядерные полигоны, территории, которые были ранее затронуты добычей и переработкой урана, а также иной деятельностью, связанной с применением радиоактивных материалов природного происхождения (РМПП), и объекты, на которых происходили крупные ядерные или радиологические аварии. Следы работы ядерной отрасли (без учета объектов по добыче и переработке урана) можно найти в 31 стране.

80. В большинстве этих стран такой след довольно невелик; впрочем в некоторых странах, где давно существует ядерная отрасль, охватывающая и гражданский, и военный сектора, наряду с ядерной деятельностью, включающей выработку электроэнергии, процедуры переработки и экспериментальные процессы, существуют ставшие ненужными установки, ядерные отходы и бывшие объекты. При этом в Европе, например, доля земель, загрязненных вследствие ядерной деятельности, составляет лишь 0,1% от общей площади загрязненных земель континента. Во всем мире все шире осознается необходимость реабилитации территорий, которые были загрязнены в результате работы отраслей, связанных с РМПП.

81. В США в 2020 году начала работу Саванна-Риверская установка по переработке солевых отходов и были завершены работы по дезактивации и выводу из эксплуатации в Технологическом парке Восточного Теннесси в Окридже. Планируется, что в 2022 году Управление по природопользованию Министерства энергетики решит вопрос с загрязнением подземных вод хромом в Лос-Аламосской национальной лаборатории и завершит адресное извлечение отходов из пункта захоронения на территории Айдахской национальной лаборатории.

82. В Японии полным ходом идут работы по дезактивации после аварии на АЭС «Фукусима-дайити». Согласно плану была выполнена сплошная дезактивация в особом районе дезактивации. Также была завершена дезактивация на территории интенсивного контроля загрязнения, проводившаяся силами муниципалитетов. Это означает, что сплошная дезактивация, предусмотренная Законом о специальных мерах по ликвидации радиоактивного загрязнения, была завершена везде, кроме района ограниченного доступа. Непрерывно снижаются показатели мощности дозы в окружающем воздухе. На конец апреля 2021 года в промежуточное хранилище было перевезено приблизительно 10 730 000 м³ снятого грунта и отходов. К концу марта 2022 года в промежуточное хранилище планируется доставить практически весь объем снятого грунта.

Тенденции

83. Из-за недостатка ресурсов в некоторых странах восстановительные мероприятия не ведутся. Из этого следует, что одной из ключевых задач является обеспечение этих мероприятий финансированием. Международное сообщество под эгидой Европейского союза открыло Счет экологической реабилитации в Центральной Азии. Необходимо изыскать недостающие средства, чтобы обеспечить финансированием срочные работы по нейтрализации бывших объектов по добыче урана в регионе. По состоянию на сентябрь 2021 года объем нехватки средств оценивался в 40 млн евро. При этом для реализации всех необходимых реабилитационных мероприятий одних лишь государственных средств может быть недостаточно. Поэтому другая важная задача заключается в создании новых неординарных механизмов финансирования реабилитации: речь идет главным образом об инициативах, позволяющих мобилизовать частный капитал.

84. На фоне наметившейся тенденции к формированию инклюзивных механизмов принятия решений необходимо четко прописывать функции и обязанности действующих субъектов и повышать эффективность координации их действий, налаживать диалог с местными заинтересованными сторонами с целью точнее определить концепцию затронутой территории/группы населения, а также предусматривать использование соответствующих протоколов организации деятельности. Примером практики вовлечения общественности и ее задействования в научных исследованиях в целях наработки научных знаний можно считать гражданскую науку. Помимо прочего, такая практика позволяет людям отслеживать состояние собственных жилищ и окружающей их среды и влияет на отношения людей с государственными органами и другими ключевыми учреждениями. Национальные и международные организации должны быть готовы учитывать эти факторы в процессе формирования политики и коллективного принятия решений.

С.3. Обращение с радиоактивными отходами

Текущее состояние

85. В 2021 году правительство Австралии объявило о планах разместить в Напанди, штат Южная Австралия, национальное хранилище ядерных отходов. Этот объект будет предназначен для окончательного захоронения радиоактивных отходов низкой активности и временного хранения среднеактивных отходов. Аналогичный процесс разворачивается в Италии: там определяются территории, подходящие для размещения национального хранилища, в котором будут захоронены 78 000 м³ низкоактивных и очень низкоактивных отходов и помещены на долгосрочное промежуточное хранение приблизительно 17 000 м³ отходов среднего и высокого уровня активности. Хранилище будет представлять собой пункт приповерхностного захоронения, совмещенный с технопарком для развития исследовательской деятельности в ядерной области.

86. В 2021 году ряд государств-членов значительно продвинулись на пути к заключительным стадиям размещения своих низкоактивных отходов в пунктах захоронения. В Словакии получено разрешение на окончательную засыпку пункта захоронения отходов очень низкого уровня активности на АЭС «Моховце». В Соединенном Королевстве в этом году проведена работа по подготовке к закладке покрытия над отходами в хранилище камерного типа № 8 и в части траншей на территории хранилища низкоактивных отходов. Кроме того, рассматривается вопрос о том, можно ли использовать эту площадку для размещения пункта приповерхностного захоронения, и в настоящее время на площадке идет изучение подстилающей породы (рис. С.3).



*РИС. С-3. Подготовительные работы на площадке хранилища низкоактивных отходов (Соединенное Королевство) в преддверии окончательной засыпки части сооружений.
(Фото: Управление по выводу из эксплуатации ядерных объектов Соединенного Королевства, 2021 год)*

87. Отмечается также значительный прогресс в реализации программ, предусматривающих сооружение глубоких геологических хранилищ (ГГХ) для высокоактивных отходов. В частности, финская компания по обращению с отходами «Посива» в декабре 2021 года подала заявку на получение лицензии на эксплуатацию и планирует к середине 2023 года осуществить первое захоронение отработавшего топлива в ГГХ «Онкало». Шведская компания по обращению с ядерным топливом и отходами ожидает решения государственных органов о начале строительства и проведении подтверждающих геологических изысканий на предлагаемой для размещения ее ГГЗ площадке. Ожидается, что в 2022 году Национальное агентство по обращению с радиоактивными отходами Франции обратится за получением лицензии на строительство пункта глубокого геологического захоронения высоко- и среднеактивных отходов. Кроме того, работу по выбору площадки для пункта ГГЗ отработавшего топлива начали Национальное объединение по захоронению радиоактивных отходов Швейцарии и Организация по обращению с ядерными отходами Канады.

88. В этих государствах-членах прогресс наметился по прошествии нескольких десятилетий НИОКР, которые преимущественно проводились на подземных исследовательских установках (ПИУ). В настоящее время функционирует 13 ПИУ. В июне 2021 года в Китае началось строительство Бэйшаньской подземной исследовательской лаборатории; для

международного сотрудничества на базе будущей ПИУ, получившей статус центра сотрудничества Агентства по вопросам геологического захоронения, открыта программа исследований, разработок и демонстрации.

89. В 2021 году серьезно продвинулась работа по обращению с изъятыми из употребления закрытыми радиоактивными источниками, в частности в плане извлечения и кондиционирования. В Иордании изъятые из употребления радиоактивные источники, оставшиеся от прежней деятельности, были извлечены из подземного шахтного хранилища и кондиционированы с помещением в новые упаковки отходов (рис. С.4).



РИС. С-4. Извлечение радиоактивных источников и их кондиционирование с помещением в новые упаковки отходов на площадке хранилища отходов прежней деятельности в Иордании. (Фото: Иорданская комиссия по атомной энергии)

Тенденции

90. В последние годы значительное число государств-членов впервые или повторно приступили к разработке национальной политики и стратегий обращения с радиоактивными отходами, а в течение 2021 года в этой работе наметился существенный прогресс. На протяжении всего года правительство Канады привлекало общественность, в том числе представителей коренных народов, заинтересованных сторон и экспертов, к изучению и обновлению политики Канады в отношении радиоактивных отходов. В июле 2021 года в соответствии с новой национальной стратегией по вопросам обращения с существующими и прогнозируемыми отходами от вывода из эксплуатации, принятой Управлением по выводу из эксплуатации ядерных объектов (УВЭ) Соединенного Королевства, компания, управляющая хранилищем низкоактивных отходов, стала дочерним предприятием, напрямую подконтрольным УВЭ.

91. Все более насущной становится потребность в увеличении емкости пунктов хранения и захоронения радиоактивных отходов всех типов, и в ближайшее десятилетие эта тенденция, как ожидается, будет набирать обороты по мере появления новых планов вывода АЭС из эксплуатации. В этой связи оформляется ряд заявок на получение лицензий и ведется строительство ряда новых объектов. Например, в 2020 году Комиссия по ядерной безопасности и физической ядерной безопасности Республики Корея выдала разрешение на строительство дополнительных мощностей для промежуточного хранения отработавшего топлива на АЭС «Вольсон», поскольку емкость нынешнего хранилища отработавшего топлива близка к исчерпанию.

92. Кроме того, на протяжении последних десятилетий неуклонно увеличивался интерес к вопросам организации непрерывного и продуманного взаимодействия с общественностью. В условиях пандемии COVID-19 большой объем работы по привлечению заинтересованных сторон государства-члены проводили в виртуальной среде, что позволило увеличить охват этой

деятельности (например, проводившийся в Италии национальный семинар по вопросам выбора площадки для национального хранилища транслировался в онлайн-режиме).

93. Многие страны ведут успешную работу в сфере обращения с изъятыми из употребления закрытыми радиоактивными источниками (ИЗРИ), однако захоронение ИЗРИ по-прежнему сопряжено с трудностями, особенно в странах с менее масштабными ядерными программами. В 2022 году Малайзия планирует создать первое скважинное захоронение ИЗРИ. Растут масштабы возврата изъятых из употребления высокоактивных источников поставщикам для рециклирования и захоронения. В 2022 году планируется вывезти более 50 высокоактивных источников более чем из десятка государств-членов.

94. Продолжает расширяться международное сотрудничество в области обращения с радиоактивными отходами, особенно в части программ глубинного геологического захоронения. В рамках созданной в 2009 году Европейским союзом Платформы по внедрению технологии геологического захоронения радиоактивных отходов продолжается активное осуществление положений доклада о концепции развития до 2025 года, которая предусматривает, что к 2025 году в Европе будут безопасно эксплуатироваться первые пункты геологического захоронения отработавшего топлива, высокоактивных отходов и других долгоживущих радиоактивных отходов. В то же время ЕОСПЗ, бывшая Европейская организация по созданию пунктов захоронения, которая с 2021 года действует под названием «Ассоциация по вопросам многонациональных хранилищ радиоактивных отходов», продолжает изучать вопрос о строительстве в Европе одного или нескольких совместных геологических хранилищ.

D. Исследовательские реакторы и ускорители частиц

D.1. Исследовательские реакторы

Текущее состояние

95. На конец 2021 года в 53 странах насчитывалось 235 действующих исследовательских реакторов, включая временно остановленные. Они по-прежнему использовались для генерации пучков нейтронов и предоставления незаменимых услуг по облучению в научных, медицинских и промышленных целях, а также для обучения и подготовки кадров. В таблице D-1 приложения указаны наиболее распространенные виды применения исследовательских реакторов.



11

новых исследовательских
реакторов сооружаются
в **10** странах



14

государств-членов разработали
официальные планы по строительству
новых исследовательских реакторов



16

стран рассматривают возможность
строительства исследовательских
реакторов

96. Одиннадцать новых исследовательских реакторов сооружаются в десяти странах: Аргентине, Многонациональном Государстве Боливия, Бразилии, Китае, Республике Корея, Российской Федерации, Саудовской Аравии, Украине, Франции и Чешской Республике (рис. D.1a, D.1b и D.1c). В 2021 году была произведена первая заливка бетона в основание первого исследовательского реактора в Многонациональном Государстве Боливия, а на реакторе ПИК в Российской Федерации начался финальный этап пусконаладочных испытаний. Южная Африка приняла официальные планы по строительству нового исследовательского реактора. В настоящее время такие планы имеются у следующих государств-членов: Бангладеш, Беларуси, Бельгии, Вьетнама, Замбии, Индии, Китая, Нигерии, Нидерландов, Соединенных Штатов Америки, Таджикистана, Таиланда, Филиппин и Южной Африки. Вопрос о строительстве исследовательских реакторов рассматривает значительное число стран: Азербайджан, Гана, Индия, Ирак, Кения, Малайзия, Монголия, Мьянма, Нигер, Объединенная Республика Танзания, Руанда, Сенегал, Судан, Тунис, Филиппины и Эфиопия.



РИС. D-1 а. Строительство исследовательского реактора RA-10 в Атомном центре «Эсейса» в Аргентине. (Фото: НКАЭ)



РИС. D-1 б. Установка крышки корпуса реактора «Жюль Горовиц» в Кадараше, Франция. (Фото: КАЭ)



РИС. D-1 с. Монтаж плиты перекрытия в основании шахты реактора МБИР в государственном научном центре «Научно-исследовательский институт атомных реакторов», Димитровград, Российская Федерация. (Фото: Росатом)

97. Продолжались международные усилия по минимизации использования высокообогащенного урана (ВОУ) в гражданском секторе. На сегодняшний день из 48 стран (включая Тайвань, Китай) были возвращены в страны происхождения или иным образом утилизированы 6826 килограммов ВОУ. Кроме того, 107 исследовательских реакторов и крупных установок по производству медицинских изотопов были переведены с ВОУ на низкообогащенный уран (НОУ), или же было подтверждено их закрытие. Ведется обширная работа в области НИОКР с целью разработки новых видов высокоплотного НОУ-топлива для исследовательских реакторов высокой мощности. В Бельгии Национальный институт радиоэлементов по-прежнему работает над тем, чтобы в 2022 году полностью перейти на НОУ в производстве молибдена-99, и тогда все мировые производители этого востребованного медицинского изотопа будут применять методы производства без использования ВОУ. Национальное управление ядерной безопасности министерства энергетики США на конкурсной основе заключило с частными компаниями три новых соглашения о сотрудничестве с долевым участием в расходах, чтобы до конца 2023 года наладить промышленное производство молибдена-99 без использования ВОУ.

Тенденции

98. Доля исследовательских реакторов, находящихся в эксплуатации не менее 50 лет, приближается к 50%. Чтобы обеспечить их дальнейшую безопасную и надежную эксплуатацию и эффективное использование, на многих установках внедрены или внедряются инициативные стратегии и осуществляются систематическое управление старением, реконструкция и модернизация. Некоторые организации, которые занимаются эксплуатацией наиболее востребованных исследовательских реакторов, готовятся к продлению срока их активной эксплуатации до 80 или даже 100 лет или рассматривают такую возможность (рис. D.2). Так, во многих случаях осуществляется замена устаревших аналоговых контрольно-измерительных приборов и систем управления на новые цифровые системы.

99. Многие страны используют возможности доступа к исследовательским реакторам по линии инициатив международного и регионального сотрудничества. В 2021 году две реакторные

интернет-лаборатории с базовыми реакторами в Республике Корея и Чешской Республике приступили к трансляции экспериментов для студентов в других странах; кроме того, была открыта Европейская экспериментально-образовательная платформа в ядерной сфере, позволяющая университетам и молодым специалистам ядерной отрасли со всего мира пройти практическую подготовку на малых исследовательских реакторах.

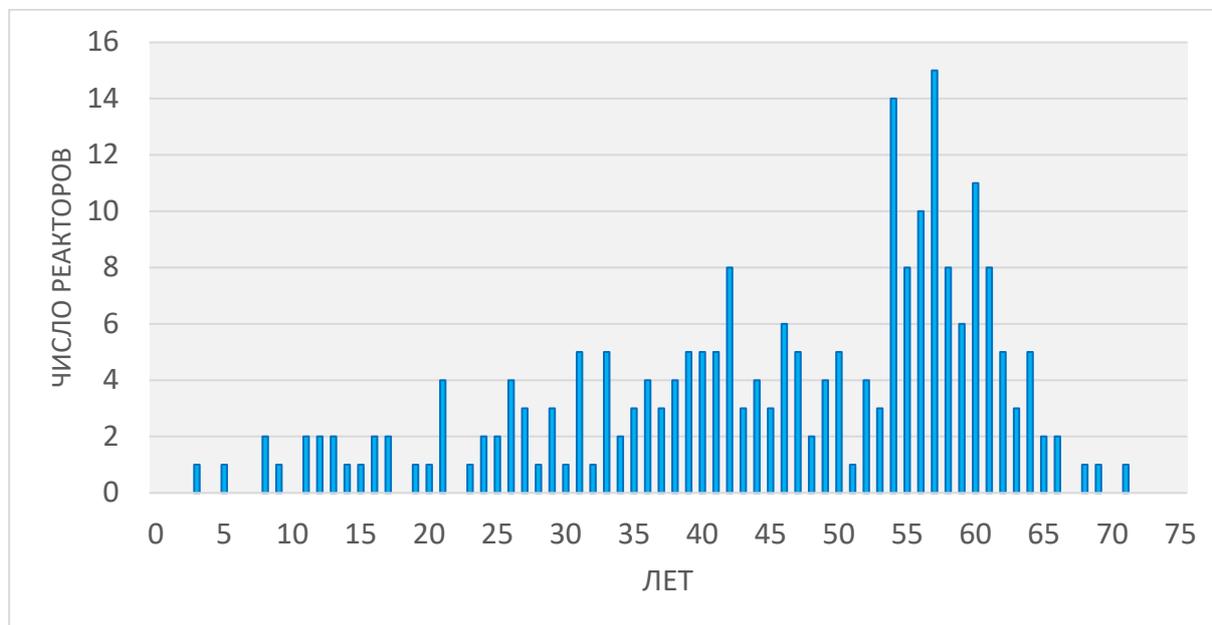


РИС. D-2. Распределение по возрасту находящихся в эксплуатации исследовательских реакторов, ноябрь 2021 года.

(Источник: База данных МАГАТЭ по исследовательским реакторам)

100. Рассеяние нейтронов повсеместно используется для решения задач в различных областях, в том числе в области медико-биологических наук, для получения информации о биологических функциях, в том числе о вирусах, белках и дегенеративных заболеваниях, а также для содействия в разработке новых лекарств и методов лечения. Оно позволяет лучше понять процессы, имеющие отношение к производству, загрязнению, очистке и сохранению пищевых продуктов и воды. Оно играет важную роль в изучении новых источников энергии для защиты окружающей среды и борьбы с изменением климата, включая хранение водорода, топливные элементы, солнечные батареи и новые типы аккумуляторов. Оно применяется во многих других областях НИОКР, промышленности и инженерии. Передовые НИОКР, проводимые с помощью современных устройств рассеяния нейтронов, обычно выполняются с использованием высокопроизводительных высокопоточных источников нейтронов, однако последние технические достижения в сфере компактных источников нейтронов на базе ускорителей, особенно с применением передовых сред для образцов на месте, теперь позволяют осуществлять рассеяние нейтронов с использованием среднепоточных источников нейтронов на базе исследовательских реакторов и ускорителей.

D.2. Ускорители частиц и контрольно-измерительные приборы

Текущее состояние

101. Исследовательские реакторы долгое время были самыми мощными источниками нейтронов, доступными для исследования пучков нейтронов, однако из-за присущих стационарным реакторам ограничений, а также вследствие сокращения использования ВОУ в гражданских целях значительного улучшения характеристик потока нейтронов в исследовательских реакторах не наблюдается. Благодаря постоянным усовершенствованиям во многих областях техники с исследовательскими реакторами начали конкурировать источники нейтронов на базе ускорителей.

102. Эксплуатация Европейского источника нейтронов скалывания (ESS) близ Лунда, Швеция, в строительстве которого участвуют 13 государств-членов, должна начаться в 2023 году. Благодаря интегрированной по времени плотности потока нейтронов ESS станет самым ярким источником нейтронов в мире; этот титул перейдет к нему от высокопоточного реактора при Институте Лауэ — Ланжевена в Гренобле, Франция, удерживавшего его почти полвека. Нейтронообразующая мишень скалывания ESS представляет собой охлаждаемое гелием вращающееся вольфрамовое колесо, на которое с линейного ускорителя протонов мощностью 5 МВт (в среднем) подается импульсный пучок протонов с энергией 2 ГэВ.

Тенденции

103. Ускорительная масс-спектрометрия (УМС) не только позволяет вести подсчет отдельных атомов с крайне высокой точностью, но и представляет собой основанный на использовании ускорителей метод, обладающий большим потенциалом для аналитических применений, актуальных для современного общества. В настоящее время УМС используется в археологии, биомедицине, исследованиях изменения климата, гидрологии, океанографии и многих других областях, вызывающих все большую социально-экономическую озабоченность. Кроме того, УМС может с успехом применяться в ядерном регулировании, особенно в отношении объектов по обращению с радиоактивными отходами. В течение последних пяти лет УМС используется для решения важнейших проблем, связанных с выводом из эксплуатации и обеспечением долгосрочной безопасности ядерных установок, таких как характеристика площадки и отходов и экологический мониторинг объектов по обращению с радиоактивными отходами. С помощью УМС можно дать количественную оценку таких радионуклидов, представляющих интерес для характеристики площадки, как углерод-14, йод-129, хлор-36, технеций-99, криптон-81, бериллий-10 и алюминий-26, в то время как для характеристики отходов ключевыми радионуклидами являются водород-3, углерод-14, хлор-36, цезий-135, йод-129, технеций-99, уран-236, цирконий-93 и плутоний-240, -241 и -242. Для регулирующих органов особый интерес представляет характеристика бетона, используемого в ядерных реакторах. Это положило начало новым технико-экономическим обоснованиям применения УМС в отношении ряда новых радиоизотопов, таких как кальций-41.

104. Благодаря последним техническим достижениям была также расширена сфера применения метода УМС: с его помощью можно изучать широкий спектр объектов культурного и природного наследия, а также выявлять подделки и факты незаконной торговли изделиями. Например, благодаря новейшим техническим достижениям с помощью УМС теперь можно датировать отдельные слои краски, пигменты, связующие вещества и холст в произведениях искусства (рис. D.3).

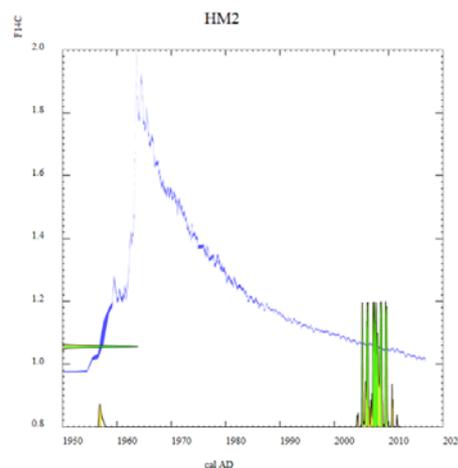


РИС. D-3. Анализ картины в стиле постимпрессионизма. Слева: волокна ткани растительного происхождения, собранные со слоя краски. Справа: датирование с помощью УМС показывает, что волокна ткани были получены уже после смерти предполагаемого художника, то есть картина — поддельная.

(Изображения: Лаборатория углеродных измерений, Университет Париж-Сакле, Франция)

105. Радиоуглеродное датирование углеродсодержащих предметов осуществляется с учетом распада углерода-14. Это радиоактивный изотоп углерода, который встречается в природе и попадает во все углеродсодержащие материалы (органические и неорганические) в ходе круговорота углерода в природе. Поскольку период полураспада углерода-14 составляет 5700 ± 30 лет, его выявление помогает определить возраст того или иного образца, если он не превышает 55 000 лет.

106. Пока самым убедительным критерием в области обнаружения подделок является научное доказательство наличия материальных анахронизмов, которое основывается на сравнении материалов, присутствующих в произведении искусства, с информацией о самой ранней дате их обнаружения или изготовления. Радиоуглеродное датирование — перспективный метод, позволяющий установить абсолютный возраст использовавшихся материалов в определенных временных рамках.

107. Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) — это неразрушающий метод быстрого одновременного анализа нескольких элементов для определения характеристик образцов различной природы и состава. РФА является экономически эффективным вариантом для многих проектов фундаментальных и прикладных исследований. Его применение в сочетании с устройствами фокусировки рентгеновского излучения позволяет неразрушающим образом определять двух- и трехмерное распределение элементов. Синхротронные источники обеспечивают высокую интенсивность рентгеновского излучения с настраиваемой пространственно-энергетической фокусировкой для различных современных методов определения распределения элементов, анализа верхних слоев поверхностей и анализа ультрамикрэлементного состава в различных областях материаловедения, в частности касающихся наноматериалов, биоматериалов и энергоматериалов (рис. D.4).

108. Согласно информации, представленной на недавно разработанной Агентством интерактивной карте лабораторий РФА¹¹, в настоящее время в более чем 100 странах мира имеется свыше 1200 лабораторий РФА, однако во многих случаях их возможности еще недостаточно хорошо известны конечным пользователям, которые могли бы воспользоваться этим эффективным аналитическим методом.

¹¹ <https://nucleus-new.iaea.org/sites/nuclear-instrumentation/Pages/World-Map-XRF-laboratories.aspx>



РИС. D-4. Основные области применения выбранной установки РФА.

Е. Атомные и ядерные данные

Положение дел

109. Для развития технологий термоядерных реакторов требуются высококачественные цифровые базы данных по взаимодействиям на атомном уровне. Имея такие данные, можно выполнять вычислительное моделирование конструкций. Проводимые в настоящее время исследования в основном касаются моделирования процессов взаимодействия плазмы и материала-кандидата стенки термоядерного реактора, а также моделирование фундаментальных процессов на атомарном уровне, описывающих взаимодействие водорода с материалами стенки реактора (рис. Е.1). Экспериментальные исследования посвящены фундаментальным вопросам атомной структуры жидких материалов в термоядерном реакторе. Также проводятся эксперименты по взаимодействию термоядерной плазмы и жидких металлов с использованием линейных плазменных ускорителей и термоядерных устройств типа стелларатора. Теоретические/вычислительные исследования проводятся в основном в целях моделирования эффектов нейтронного облучения и проникновения водорода в материалы.

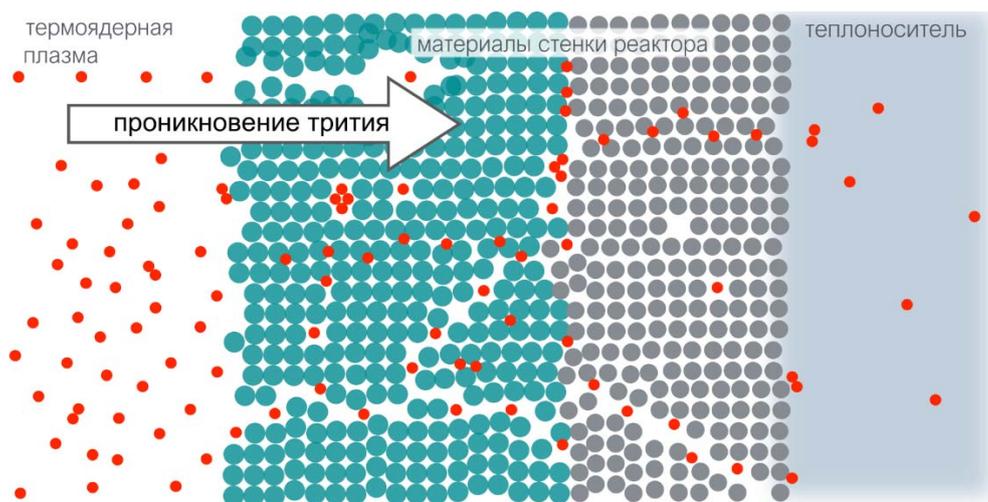


РИС. E-1. Схематическое отображение процесса проникновения трития в стенку термоядерного реактора.

Тенденции

110. Очевидной тенденцией, которая будет оказывать значительное влияние на развитие ядерной физики и библиотек ядерных данных, является стремительное внедрение искусственного интеллекта/машинного обучения в различные сферы. Возможные области применения включают прогнозирование параметров в таких ядерных расчетных кодах, как TALYS, анализ тенденций в экспериментальных данных, автоматизированное пополнение базы экспериментальных данных по ядерным реакциям, а также обнаружение и локализацию аномальных явлений на атомных электростанциях с использованием модернизированных и автоматизированных технологий обработки потоков данных. Существует большой потенциал для современных методов анализа данных, призванных улучшить оценку ядерных данных для различных ядерных применений.

Г. Окружающая среда

111. Одной из самых насущных глобальных экологических проблем и прямой угрозой устойчивому развитию является загрязнение пластиком. Инициатива по использованию ядерных технологий для борьбы с загрязнением пластиком (НУТЕК пластикс), реализация которой началась в 2021 году, опирается на усилия Агентства по решению проблемы загрязнения пластиком путем его переработки с использованием радиационных технологий и мониторинга морской среды с помощью методов изотопных индикаторов.

Г.1 Радиационные технологии для борьбы с загрязнением пластиком

Положение дел

112. Радиационные технологии обладают уникальными характеристиками и преимуществами с точки зрения сокращения количества пластиковых и полимерных отходов, позволяя дополнить традиционную механическую переработку пластика и облегчить его химическую переработку. Инновационное применение пучков гамма-частиц и электронов может обеспечить эффективную сортировку пластиковых отходов для их последующей переработки. Это повышает качество и ценность переработанного пластика, превращает пластиковые отходы в другие более ценные

продукты и облегчает применение методов усовершенствованной или химической переработки пластика. Такие применения также способствуют экономии энергии, обеспечивая разрушение полимерных молекул пластиковых отходов, которые будут использоваться в качестве химического сырья.

Тенденции

113. В настоящее время на Филиппинах разрабатывается прикладная технология, предусматривающая использование ионизирующего излучения для индуцирования процесса привитой полимеризации в целях эффективной компатибилизации натуральных волокон с переработанными пластиковыми материалами. Радиационно-индуцированная полимеризация усиливает адгезию волокна с пластиком, что улучшает общие термомеханические свойства материала (рис. F.1). На Филиппинах произрастает множество растений, используемых для производства натуральных волокон, таких как абака, банан, ананас и джут, известных своими превосходными механическими свойствами. Однако в силу гидрофильных свойств, присущих большинству лигноцеллюлозных волокон, их применение в композитных материалах ограничено из-за слабой межфазной адгезии. Радиационно-индуцированная прививочная полимеризация позволяет преодолеть такую несмешиваемость, благодаря чему можно смешивать эти материалы или добиться их однородности.



РИС. F-1. Предложенная на Филиппинах схема изготовления композита с использованием радиационно-привитых натуральных волокон и облученного пластика из вторичного сырья.
(Изображение: Филиппинский институт ядерных исследований)

114. В рамках другого прикладного решения, разработка которого ведется в Индонезии, предлагается использовать радиационную технологию для преодоления трудностей, связанных с наличием двух потоков отходов. Данный подход предполагает облучение пластиковых отходов, чтобы они могли образовывать стабильные композиты с волокнами биомассы; в этом случае из отходов пластика и пальмовых продуктов можно будет производить строительные материалы (рис. F.2). Радиационные технологии способствуют расщеплению биомассы, компатибилизации компонентов и образованию поперечных связей между ними в конечном продукте для придания ему нужных свойств.

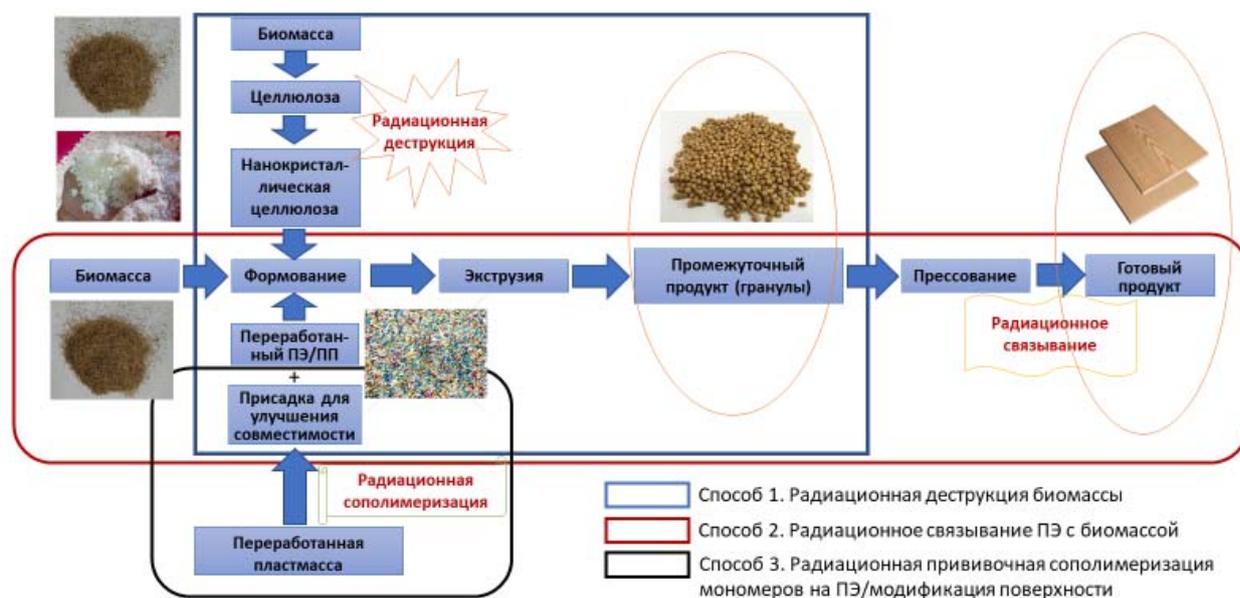


РИС. F-2. Предложенная схема производства армированного древесно-пластикового композита на основе натуральных волокон и вторичного пластика — переработанного полиэтилена (ПЭ) и полипропилена (ПП).

(Изображение: Национальное агентство Индонезии по ядерной энергии)

F.2 Ядерные и изотопные методы для борьбы с загрязнением морской среды пластиком

Положение дел

115. Роль конечного резервуара неправильно утилизируемых и не поступающих на переработку отходов пластика из наземных источников выполняет Мировой океан. Хотя за последнее десятилетие мировое научное сообщество значительно продвинулось вперед в понимании проблемы загрязнения морской среды пластиком и его потенциального воздействия на различные водные организмы, по-прежнему нет достаточной информации о распространенности в океане микропластика и характере его воздействия. Широко обсуждаемое в СМИ и заметное воздействие на морские организмы макропластика (рис. F.3) достаточно подробно задокументировано, однако потенциальный вред, который может причинять микропластик — частицы размером менее пяти миллиметров в диаметре — гораздо менее очевиден. Учитывая масштабы этой проблемы, загрязнение пластиком становится темой глобальной экологической повестки и привлекает внимание правительств, гражданского общества, научных кругов и неправительственных организаций.



РИС. F-3. Макропластик, собранный в прибрежных водах Средиземного моря с помощью планктонной сети.

116. Использование ядерных технологий вносит значительный вклад в глобальные научные усилия по борьбе с загрязнением морской среды пластиком. В последние годы разработан широкий спектр ядерных и изотопных методов для определения состава, крупности и количества пластикового мусора в морской среде. В основе этих методов лежат спектроскопические методы визуализации, такие как инфракрасная спектроскопия с использованием преобразования Фурье и рамановская микроскопия, которые позволяют определять тип полимера и оценивать количество пластиковых частиц размером более 10 микронов в пробах, взятых из природной среды. В качестве дополнения к этим методам может рассматриваться пиролитическая газовая хроматография в сочетании с масс-спектрометрией и термодесорбционная газовая хроматография в сочетании с масс-спектрометрическими методами обнаружения, которые позволяют одновременно идентифицировать полимеры в композитных пробах окружающей среды и анализировать не только массовые характеристики каждого типа полимера (от 500 микронов до одной тысячной доли микрона), но и органические токсиканты, связывающиеся с частицей пластика.

117. Все эти ядерные и изотопные методы могут применяться для организации глобального мониторинга пластика в морской среде. Наряду с моделированием циркуляции и дисперсии пластика в океане они могут способствовать отслеживанию источников попадания пластика в океан и его дальнейшей судьбы. Сочетая эти методы с измерениями содержания природных радионуклидов (бериллий-7, свинец-210, цезий-137 и плутоний-239/240) в отложениях и с рентгеновской флуоресценцией, ученые могут датировать керны донных отложений по геохронологической шкале. Это помогает ученым реконструировать прошлые тенденции загрязнения морской среды пластиком и лучше понимать процессы старения микропластика после его перехода в донные отложения.

118. Ядерные технологии также вносят существенный вклад в понимание механизмов накопления частиц микропластика в морских организмах и их воздействия на эти организмы. Некоторые частицы микропластика настолько малы, что они могут поглощаться морскими организмами и попадать в их внутренние органы, отрицательно влияя на выживаемость. Кроме того, микропластик может выступать в роли переносчика других загрязнителей. Недавние исследования подчеркивают полезность лабораторных ядерных методов для количественной

оценки движения микропластика и связанных с ним загрязнителей, их биологического воздействия, а также выявления возникающих из-за микропластика факторов стресса для морских организмов. Помимо использования для оценки биораспределения пластика, такие методы ядерной визуализации, как автордиография, позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) и однофотонная эмиссионная компьютерная томография, могут также способствовать изучению морфологических изменений на уровне тканей и организмов, вызванных воздействием пластика.

Тенденции

119. Чтобы устранить пробелы в информации, касающейся мониторинга загрязнения морской среды пластиком и уточнения его характеристик, особенно в отношении частиц меньшего размера, необходим целый комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Крайне важно получить более четкое представление о физическом воздействии, оказываемом самими частицами пластика, в том числе о накоплении, перемещении и трофическом переносе в морской среде.

120. В рамках большинства исследований для изучения накопления пластиковых частиц биотой измеряется их содержание во всем теле или в конкретных тканях путем обработки проб тканей и отделения частиц с помощью фильтрации либо путем взятия срезов тканей и их гистологической оценки, после чего производится визуальное и/или спектроскопическое подтверждение результатов. Сопряженные с использованием традиционных методов ограничения могут быть устранены за счет использования ядерных методов, позволяющих получать радиоактивные частицы пластика, или радиопластик, которые можно отследить с помощью средств измерения радиоиндикаторов. Хотя в последнее время в качестве радиопластика используются полимеры на основе углерода-14 (бета-излучатели), в будущем может быть рассмотрен вариант с использованием радиопластика на основе гамма-излучателей для оценки удержания частиц микропластика после их попадания в организм и миграции по пищевой цепи. Другие ядерные технологии, которые разрабатываются Агентством и сотрудничающими с ним учреждениями, предусматривают использование микропластика, меченного стабильными изотопами, что позволит добиться значительных успехов в изучении механизмов переноса микропластика и его воздействия на морские организмы.

121. Кроме того, внимание исследователей начинает привлекать феномен появления еще более мелких фрагментов пластика, так называемого нанопластика. В настоящее время способов количественной оценки содержания нанопластика в окружающей среде не существует. Хотя известны аналитические методы (флуориметрия и пиролитическая газовая хроматография в сочетании с масс-спектрометрией), позволяющие изучать нанопластик в лаборатории (рис. F.4), эти методы не всегда пригодны для оценки проб окружающей среды. В будущем ядерным и изотопным методам отводится особая роль в исследовании и мониторинге фрагментации микропластика и оценке количества образующегося при этом нанопластика. Все большую озабоченность вызывает проблема разделения и характеристики пластикового мусора исходя из размера его фрагментов — микропластика и нанопластика, так как в нанометровом диапазоне могут возникать более сложные и опасные взаимодействия с биологическими системами. Перспективной методикой для определения потенциального воздействия нанопластика на окружающую среду является проточное фракционирование в силовом поле, применяемое вместе с пиролитической газовой хроматографией в сочетании с масс-спектрометрией. К числу других новых технологий для количественной оценки содержания частиц пластика в морской среде относится масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой, которая позволяет получать информацию о распределении частиц по размерам и о массовой концентрации нано- и микропластика на основе обнаружения изотопа углерод-13, а также компьютерная объемная томография — метод, обычно применяемый в инженерных исследованиях.

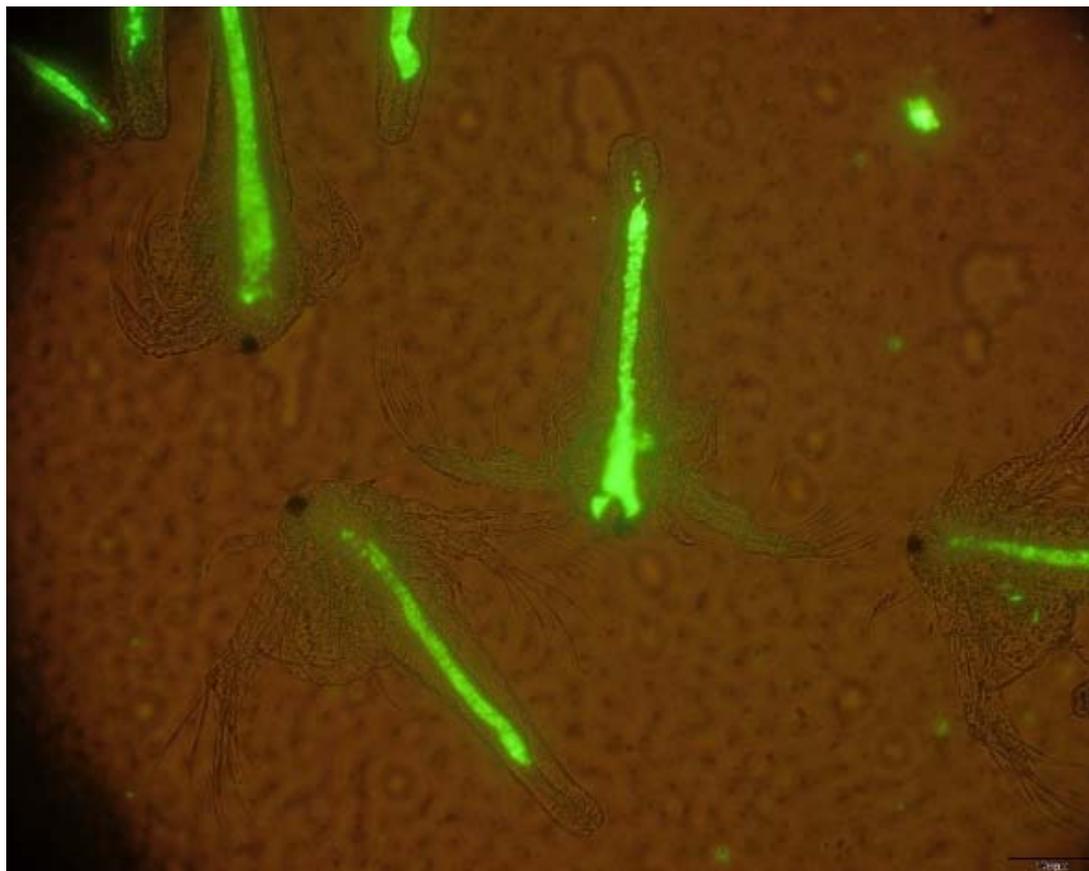


РИС. F-4. Нанопластик, проглоченный науплиусом (личинкой на ранней стадии развития) рачка Artemia salina и видимый благодаря флуоресценции.

122. Необходимо принимать к сведению и изучать все возможные риски и опасности, связанные с наличием нанопластика в окружающей среде, и современные лабораторные ядерные методы уже способны помочь в решении этой задачи. Тем не менее проблемы распространения нанопластика и его воздействия на окружающую среду до сих пор изучались лишь поверхностно.

123. Для обеспечения ожидаемого прогресса в области ядерных и изотопных методов, используемых для мониторинга загрязнения морской среды, и более точной оценки его воздействия на морские организмы должны произойти два важнейших изменения: необходимо расширять на соразмерной основе имеющийся в разных странах мира потенциал в области мониторинга и оценки данных о загрязнении морской среды пластиком, а также минимизировать расхождения в аттестации методов мониторинга на основе их сопоставления, согласования и стандартизации в интересах получения надежных результатов. Необходимы эталонные материалы, охватывающие всевозможные типы полимеров, широкий диапазон размеров, разнообразие форм и характер старения встречающихся в океанах фрагментов микропластика, однако в настоящее время такие материалы отсутствуют.

124. Ядерные и изотопные методы будут играть важнейшую роль в устойчивой борьбе с загрязнением морской среды пластиком и в совершенствовании процессов принятия обоснованных решений и управления ресурсами океанов на основе научной информации.

Г. Продовольствие и сельское хозяйство

Г.1 Новые методы анализа профиля изотопов для оценки и смягчения эффектов, связанных с сохраняемостью и переносом антибиотиков, а также их влияния на устойчивость к противомикробным препаратам

Положение дел

125. Для профилактики и лечения инфекций у людей, животных и растений используются противомикробные вещества, такие как антибиотики, противовирусные, противогрибковые и противопаразитарные препараты. Хотя они помогают спасти жизни, их неправильное и излишнее использование являются основными факторами, способствующими формированию устойчивых к лекарствам патогенных микроорганизмов. Всемирная организация здравоохранения называет устойчивость к противомикробным препаратам (УПП) одной из десяти главных угроз для здоровья населения мира, по причине которой сейчас умирает порядка 700 000 человек в год, а к 2050 году, согласно прогнозам, эта цифра достигнет десяти миллионов.

126. Антибиотики широко используются в животноводстве и птицеводстве в целях борьбы с болезнями животных и стимулирования роста. От 10% до 90% вводимых препаратов всасываются/метаболизируются организмом животного не полностью и выводятся с мочой и калом. Затем они либо непосредственно в составе навоза (рис. Г.1), либо косвенно в составе осадка сточных вод могут оказываться в удобрениях или мелиорантах для сельскохозяйственных угодий, что приводит к попаданию в почву как бактерий и противомикробных веществ, так и их метаболитов.



РИС. Г-1. Используемые для улучшения плодородия почв мелиоранты на основе навоза способствуют попаданию на поля как противомикробных препаратов, так и их метаболитов (генов устойчивости). (Фото: Программа восстановления среды Чесапикского залива)

127. УПП возникает по мере того, как бактерии, вирусы, грибки и паразиты с течением времени претерпевают изменения. Они мутируют и адаптируются и в результате больше не реагируют на противомикробные вещества, что затрудняет лечение соответствующих инфекций. Устойчивые к противомикробным препаратам микроорганизмы встречаются у людей, животных, в пищевых

продуктах, растениях и окружающей среде (особенно в воде и почве). Эти организмы обладают эволюционным преимуществом и могут инициировать развитие микробиома, т. е. популяции бактерий, которая несет гены устойчивости к противомикробным препаратам. Хотя феномен УПП широко исследуется в сфере здравоохранения и ветеринарии, его влияние на почву и воду до сих пор не изучено.

128. Перенос противомикробных веществ в окружающей среде может приводить к накоплению остатков противомикробных веществ в растениях, животных и пищевых продуктах, при этом в пищевой цепи имеется множество ниш, где распространены популяции микробов, в которых может возникать УПП. Таким образом, пищевые продукты и окружающая среда являются важными звеньями в сложном пути передачи УПП людям. Сократить количество вызванных этим феноменом смертей помогает оценка источника и пути приобретения УПП и проработка вариантов лечения. Это согласуется с подходом «Единое здоровье», который предполагает, что здоровье людей, домашних и диких животных, растений и окружающей среды в целом (включая экосистемы) тесно взаимосвязано и взаимозависимо.

129. Для оценки распространения противомикробных веществ в окружающей среде и в пищевых продуктах, а также для изучения устойчивости бактерий могут использоваться имеющиеся обычные химические методы, однако они не дают представление о конечной судьбе, динамике и сохраняемости противомикробных веществ и УПП в сельскохозяйственных системах. Они позволяют подсчитать концентрации противомикробных веществ в конкретный момент времени, но не пригодны для измерения содержания неизвестных веществ, таких как метаболиты. Поступление противомикробных веществ в сельхозугодья идет непрерывно, при этом в результате многократного использования их концентрация поддерживается на устойчивом уровне. В таких условиях трудно установить, как эти химические вещества разлагаются с течением времени. С помощью обычного анализа невозможно оценить, насколько быстро идет распространение противомикробных веществ в окружающей среде после их применения, насколько быстро трансформируются/метаболизируются недавно введенные вещества и какие метаболиты при этом образуются. Неясно также, какой вклад эти метаболиты вносят в развитие устойчивых к противомикробным препаратам популяций бактерий и насколько большое влияние оказывает текущее поступление противомикробного вещества по сравнению с предыдущим и последующим поступлением того же вещества.

Тенденции

130. Мощным инструментом для оценки содержания противомикробных веществ являются технологии анализа и исследования компонентно-специфических стабильных изотопов. Они могут быть использованы для измерения соотношений встречающихся в природе стабильных изотопов (например, углерода-13 и азота-15) в пробах окружающей среды с использованием газовой хроматографии с масс-спектрометрией изотопных соотношений и жидкостной хроматографии с масс-спектрометрией изотопных соотношений. Благодаря этим технологиям лица, принимающие решения о восстановлении окружающей среды, получают информацию о потенциальных источниках загрязняющих веществ и степени их разложения. Методы исследования стабильных изотопов позволяют определить, возможен ли и имеет ли место на загрязненной площадке процесс биоразложения конкретного загрязняющего вещества. Все подходы к исследованию стабильных изотопов предполагают использование загрязнителей, меченных изотопами (углерод-13 с азотом-15 и кислородом-18), что позволяет обнаруживать и количественно оценивать процессы биоразложения и определять микроорганизмы, вызывающие эти процессы. Для получения представления о динамике распространения противомикробных препаратов и УПП по пищевой цепи предлагается использовать комплексный подход с сочетанием изотопной технологии и секвенирования генома. Это может способствовать получению информации о динамике поступления и выведения противомикробных препаратов

из организма животных и об их миграции в окружающей среде (в частности, в почве и воде), в дополнение к информации об эволюции и распространении генов устойчивости к противомикробным препаратам.

131. В интересах применения упомянутых выше технологий для отслеживания противомикробных препаратов в сельскохозяйственных системах Агентство приступило к реализации проекта координированных исследований под названием «Изотопные методы оценки миграции противомикробных препаратов в сельскохозяйственных системах и ее последствий с точки зрения формирования устойчивости к противомикробным препаратам». Для отслеживания источника поступления и миграции пестицидов/ветеринарных противомикробных препаратов в сельскохозяйственных водосборных бассейнах был разработан метод анализа компонентно-специфических стабильных изотопов. Этот метод делает возможным мониторинг источников, динамики и масштабов распространения антибиотиков после их сельскохозяйственного применения и оценку их потенциального воздействия на окружающую среду. Первым шагом должна стать гармонизация методов диагностики и мониторинга меченных изотопами синтетических антибиотиков в навозе. На данный момент полевые испытания этой методологии затруднены из-за недостаточного количества коммерческих синтетических антибиотиков с изотопными метками.

132. Агентство в лице Совместного центра ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в области продовольствия и сельского хозяйства сотрудничает с Мюнхенским техническим университетом в целях синтеза меченого сульфаметоксазола и тетрациклина (антибиотиков, обычно применяемых в медицине и ветеринарии) на основе органического синтеза для использования в рамках совместного полевого исследования с партнерами из Австралии, Бразилии, Вьетнама, Китая и Южной Африки. Задача заключается в создании протоколов/руководств по проведению анализа в целях отслеживания потока антибиотиков, поступающих из лекарственных препаратов для людей и сельскохозяйственных животных через экскременты, навоз, загрязненные поверхностные и подземные воды, используемые для орошения, и сельскохозяйственные стоки в окружающую среду. Принадлежащая Агентству Лаборатория почвенных и водных ресурсов и питания растений в Зайберсдорфе будет организовывать практическое обучение применению изотопных методов для мониторинга противомикробных веществ в окружающей среде. В целях разработки стратегий, направленных на смягчение последствий распространения антибиотиков в окружающей среде, в рамках обучения будут также предоставляться рекомендации для развивающихся стран по применению этой методологии. Лаборатория защиты пищевых продуктов и окружающей среды Агентства в Зайберсдорфе будет оказывать помощь в проведении анализа на содержание противомикробных веществ в пищевых продуктах с использованием анализа методом изотопного разбавления и анализа компонентно-специфических стабильных изотопов.

133. Для обнаружения и количественной оценки генов устойчивости к противомикробным препаратам могут быть использованы последние разработки в области молекулярных/биологических методов, в частности, так называемый метагеномный анализ методом «дробовика». Хорошим подручным средством для оценки общих масштабов присутствия антропогенного загрязнения, в том числе устойчивых бактерий в загрязненных средах, нередко может служить анализ других генетических элементов или генов, например, интегразы нескольких классов интегронов. Используя свои платформы для секвенирования генома, Лаборатория животноводства и ветеринарии Агентства в Зайберсдорфе сможет внести вклад в этот проект, предоставляя молекулярные технологии и организуя практическое обучение для проведения лабораторных исследований, которые ставят своей целью выявление штаммов, устойчивых к противомикробным препаратам, и отслеживание генов, связанных с УПП. Предполагается, что комбинирование изотопных методов, таких как

анализ компонентно-специфических стабильных изотопов, с наиболее передовыми молекулярными методами позволит сформировать более полное представление о миграции и динамике накопления антибиотиков в навозе, применяемом в качестве удобрения, и о влиянии этих процессов на появление в окружающей среде микроорганизмов, устойчивых к антибиотикам.

G.2 Вызванная воздействием космической среды генетическая изменчивость, селекция растений и астробиология как вклад в борьбу с изменением климата

Положение дел

134. Астробиологические исследования часто проводятся в космосе. Наличие на околоземной орбите и за ее пределами специфических условий, в частности, радиационной среды и микрогравитации, создает возможность для проведения с начала освоения космоса в конце 1950-х годов ряда биологических экспериментов. Многие эксперименты, например, проводимые на Международной космической станции (МКС) или в имитируемых космических средах на Земле, в том числе в Лаборатории космической биологии и медицины НАСА, направлены на изучение влияния микрогравитации на рост растений.

135. В центре внимания этих экспериментов находятся вопросы фундаментальной биологии, решение которых позволит получить представление о способности растений к продуктивному росту в условиях микрогравитации во время космических полетов. Их результаты свидетельствуют о том, что измененная гравитация влияет на пролиферацию и рост клеток, на экспрессию генов и на динамику развития. Темой недавних экспериментов, которые ставили своей целью выяснить, смогут ли новые сорта растений выдерживать суровые условия на Земле, в том числе вызванные изменением климата, стала вызванная воздействием космической среды генетическая изменчивость. В январе 2021 года на Землю была возвращена отправленная в космос французскими исследователями полезная нагрузка из 320 черенков виноградной лозы, которые находились на МКС в течение десяти месяцев. В рамках этого эксперимента исследователи в первую очередь изучают влияние присутствующей во внутренней среде МКС микрогравитации на геном виноградной лозы и ее физиологические характеристики. С аналогичными целями компания «Франт рейндж биосайенсез» отправила в 2020 году на МКС культуры клеток тканей конопли и табака.

136. Хотя на сегодняшний день большинство астробиологических экспериментов в мире посвящены воздействию микрогравитации на биологию растений, радиационная среда космического пространства также используется для индуцирования генетической изменчивости в семенах сельскохозяйственных культур в целях улучшения их качества на основе мутационной селекции. За последние 15 лет Китай выпустил более 30 новых мутантных сортов сельскохозяйственных культур, которые были выведены путем мутагенеза в результате воздействия космической радиации, которому они подвергались на орбитальных спутниках, летящих на большой высоте воздушных шарах или в условиях имитируемой космической радиации на Земле. Эти проекты предусматривали сочетание присущих космическому пространству условий радиационной среды и микрогравитации для индуцирования генетической изменчивости. Находясь в космическом пространстве, семена подвергались воздействию внешней космической среды и не были защищены от излучений, как во внутренней среде МКС.

137. Астробиологические эксперименты, в рамках которых исследуется влияние космоса на семена растений, все еще носят очень ограниченный характер и в основном сосредоточены на проблеме выживаемости семян, а также некоторых микроорганизмов. Первое облучение микроорганизмов космическим излучением было проведено в 1965 году на зондирующих

ракетах, достигших высоты 150 км над поверхностью Земли, затем в 1966 году в рамках миссий «Джемини-9» и «Джемини-12» на высоте 300 км и, наконец, в 1974 году во время возвращения с Луны миссии «Аполлон-16». С тех пор был проведен ряд биологических экспериментов, в основном с целью доказать, что живые организмы могут выживать в чрезвычайно суровых условиях космоса, которые в основном ограничивались бактериями, водорослями, лишайниками и, в меньшей степени, семенами растений. Эти эксперименты проводились на базе специальных платформ, таких как платформа для длительного экспонирования (LDEF), европейский возвращаемый орбитальный модуль (EURECA), космическая станция «Мир», исследовательская программа Европейского космического агентства по изучению влияния космической среды на биологический материал (BioPAN), моноблок внешней полезной нагрузки EXPOSE на МКС, эксперимент TANPOPO на японском экспериментальном модуле МКС (JEM), наноспутник для оценки воздействия орбитальных нагрузок на организмы/органические вещества (O/OREOS) и его полезная нагрузка для изучения выживаемости живых организмов в космической среде (SESLO). Появление в последнее время коммерческих способов доставки полезной нагрузки облегчает проведение на МКС астробиологических экспериментов с внутренними или внешними полезными нагрузками, включающими растительный материал.

Тенденции

138. В публикуемой литературе ограничено представлена научная информация о мутагенном воздействии космической среды на растения на геномном и физиологическом уровнях. Китайские ученые сообщают, что в семенах пшеницы, отправленных в космос на возвращаемом спутнике «Шицзянь-8», наиболее частые мутации были индуцированы космическим излучением и микрогравитацией. Это указывает на синергетический эффект между космическими лучами и микрогравитацией, учитывая, что отдельное воздействие микрогравитации было намного ниже, чем воздействие космических лучей¹². Другие ученые сообщают об обнаружении последовательностей и генов, характерных для мутантов с устойчивостью к засоленности почвы, которая формировалась в процессе мутагенеза во время космического полета¹³. Семена сельскохозяйственных культур были также отправлены на первый модуль новой Китайской космической станции и на поверхность Луны в рамках лунной миссии «Чанъэ-4».

139. В настоящее время растет интерес к изучению влияния космической среды на возникновение мутаций в геномах растений и к возможностям модификации физиологических характеристик растений, что позволит улучшить способность растений выдерживать неблагоприятные условия произрастания на Земле, в том числе в связи с изменением климата. Теперь отправку на МКС полезной нагрузки в виде семян или растительного материала могут обеспечивать по крайней мере две коммерческие организации, которые рассчитывают заполнить пробел в организации или проведении исследований, посвященных воздействию космического излучения и микрогравитации на характеристики устойчивости растений к суровым условиям произрастания. Учитывая постоянный интерес к изучению биологии растений в условиях космоса, как с точки зрения питания космонавтов, так и для использования ценных мутаций, полученных под воздействием космических условий, в целях выведения устойчивых сортов сельскохозяйственных культур, следует ожидать стремительный прогресс в этой области.

¹² Guo, H., et al., Mutagenic effects of different factors in spaceflight environment of Shijian-8 satellite of wheat, *Acta Agronomica Sinica* Vol. 36 No.5, 2010.

¹³ Xiong, H., et al., RNAseq analysis reveals pathways and candidate genes associated with salinity tolerance in a spaceflight-induced wheat mutant, *Scientific Reports* 7, 2731, 2017.



РИС. G-2. Внешняя платформа Nanoracks на МКС. (Фото: Nanoracks)

140. Агентство, по линии своего Совместного центра ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в области продовольствия и сельского хозяйства, в 2022 году впервые начнет заниматься астробиологией и космической селекцией, приняв участие в эксперименте, в рамках которого планируется разместить на срок от трех до семи месяцев семена двух видов растений¹⁴ как внутри, так и снаружи МКС, соответственно в качестве внутренней и внешней полезной нагрузки. Для внешней полезной нагрузки будет использоваться платформа Nanoracks, которая на полупостоянной основе смонтирована на внешней экспериментальной платформе японского экспериментального модуля (рис. G.2). До того, как внешняя полезная нагрузка будет смонтирована снаружи, она будет размещаться в герметичном объеме МКС. Этот проект станет первым в мире систематическим исследованием для понимания и использования эффекта космической радиации и микрогравитации в целях индуцирования генетической изменчивости, что потенциально может найти применение в области создания культур, способных выдерживать суровые условия произрастания на Земле, в том числе складывающиеся в результате изменения климата.

¹⁴ *Arabidopsis thaliana*, небольшое цветковое растение, обычно используемое в качестве модельного организма в биологических исследованиях, и *Sorghum bicolor*, также известное как сорго, которое выращивается для получения зерен, используемых в пищу людьми, а также для производства кормов для животных и этанола.

Н. Здоровье человека

Н.1 Тераностика: путь к развитию персонализированных услуг онкологической помощи

Положение дел

141. Онкологические заболевания затрагивают разные типы клеток. Для оптимального медицинского обслуживания перед выбором лечения необходимо установить конкретный подтип рака, характеристики которого могут быть легко определены с помощью методов ядерной медицины, что позволяет применять индивидуальный подход к лечению.

142. За последние несколько лет на фоне развития позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) комплекс услуг ядерной медицины растет впечатляющими темпами, особенно в части применения фтордезоксиглюкозы (фтора-18) и новых подходов в области таргетной радионуклидной терапии, среди прочего. Эти нововведения открывают путь к персонализированному лечению рака. Мощным инструментом для оценки локализации и степени распространения болезни, определения прогностической ценности результатов, оценки ответа на терапию и обоснования планов лечения или проведения биопсии под контролем служат радиофармацевтические препараты, нацеленные на конкретные биомаркеры. Кроме того, радиофармацевтические препараты, которые помечены бета- или альфа-излучателями и нацелены на соответствующие молекулярные маркеры — продукты экспрессии генов, участвующих в образовании солидных и гематологических опухолей — могут использоваться для таргетной радионуклидной терапии.

143. Современная ядерная медицина играет существенную роль в реализации принципов «персонализированной», или «прецизионной», медицины, позволяя подобрать специфическое лечение, учитывающее состояние отдельных пациентов или их предрасположенность к заболеванию. Таким образом, она позволяет решать вопросы оценки риска, диагностики, мониторинга лечения и радионуклидной терапии с учетом уникальных характеристик каждого пациента, способствуя повышению качества жизни и здоровья людей. Эта деятельность вносит непосредственный вклад в достижение цели 3 Организации Объединенных Наций в области устойчивого развития, касающейся хорошего здоровья и благополучия.

144. Тераностика, основанная на применении изотопов, предполагает сочетание методов диагностики и терапии, что дает возможность медицинским работникам действовать исходя из конкретных потребностей каждого пациента. В тераностике одни и те же молекулы действующих веществ, в которые встраиваются различные радиоактивные изотопы, могут использоваться в диагностических и в терапевтических целях. Если один радиоизотоп применяется для определения с высокой точностью локализации и степени распространения рака, а также конкретного типа раковых клеток, то другой испускает излучение для уничтожения раковых клеток. По сравнению с традиционными методами лучевой терапии, которые ориентированы на то или иное заболевание и его общую локализацию в более широком смысле, тераностический подход обеспечивает более специфическое лечение, делая мишенью для облучения конкретную опухоль и щадя при этом окружающие здоровые ткани, что способствует повышению как эффективности, так и безопасности лечения (рис. Н.1).

145. Агентство оказывает государствам-членам содействие в создании тераностических отделений и организации подготовки специалистов в области тераностики в контексте безопасной и надлежащей клинической практики, создавая условия для перехода к персонализированной медицине.

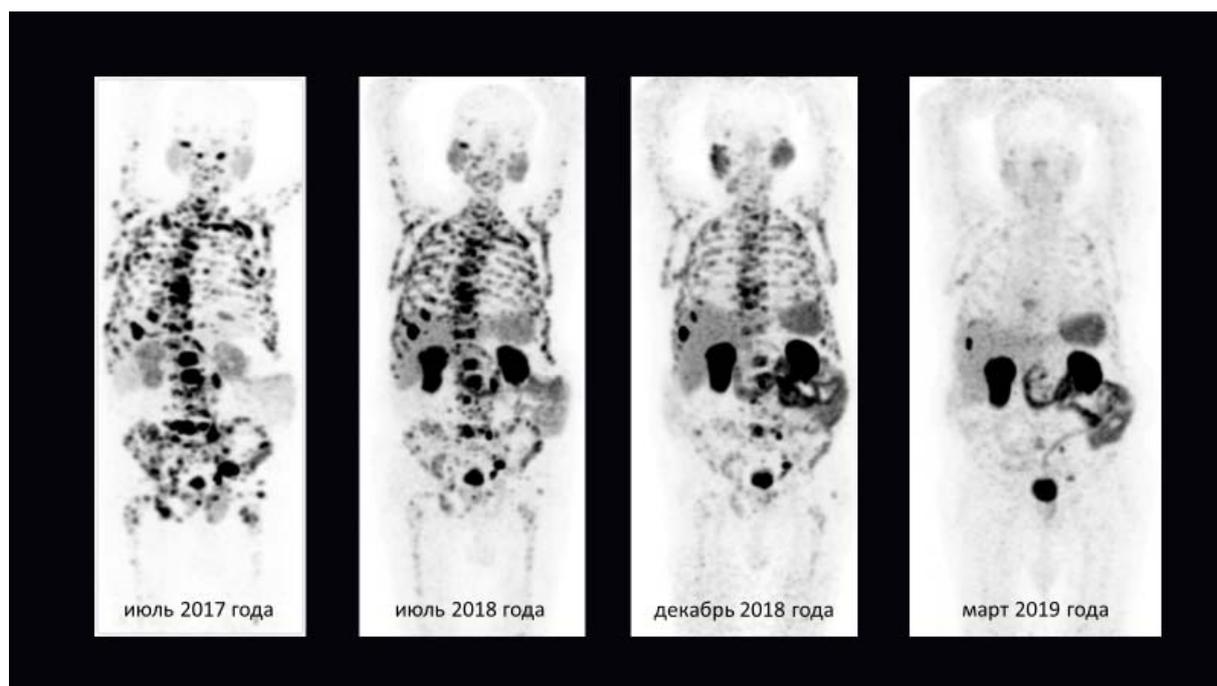


РИС. Н-1. Прогресс в тераностике 82-летнего пациента с раком простаты, распространившимся на лимфатические узлы и кости. Слева направо: Состояние в начале тераностики и до почти полной ремиссии. (Фото: Медицинский центр Американского университета в Бейруте)

Тенденции

146. За последние десятилетия наблюдается значительный прогресс в развитии прецизионной медицины, прежде всего в области таргетной диагностической визуализации и терапии. Частично это связано с разработкой новых лекарственных формул и технологий, которые становятся основой как для быстрого расширения спектра тераностических методов, применяемых в клинической практике, так и для их распространения по всему миру.

147. Ускоренными темпами развиваются прикладные клинические методы. В настоящее время они применяются в основном для оказания помощи пациентам с нейроэндокринными опухолями, лимфомой, раком простаты, молочной железы, легких и щитовидной железы.

148. Будущее тераностики зависит от разработки новых лекарственных формул, предназначенных для таргетирования конкретных опухолевых клеток, что дает возможность лечения некоторых распространенных злокачественных новообразований при одновременном снижении побочных эффектов. В этой быстрорастущей сфере возникает потребность в более широком международном сотрудничестве и стандартизации в вопросах профессиональной подготовки медицинских и научных работников и создания специализированной медицинской инфраструктуры.

Н.2 Достижения в области науки о питании: как точные данные помогают странам бороться с эпидемией ожирения

Положение дел

149. Важнейшим соображением для всех стран в контексте достижения цели 3 в области устойчивого развития, касающейся хорошего здоровья и благополучия, является питание. На фоне того как количество людей, получающих недостаточное питание, остается на тревожно высоком уровне, обостряется проблема ожирения. Согласно Докладу о питании в мире

за 2021 год¹⁵, показатели избыточного веса и ожирения среди взрослого населения растут почти во всех регионах и странах мира. Избыточный вес имеют 2,2 миллиарда человек, из них 772 миллиона страдают ожирением. По данным на 2020 год, имеющими избыточный вес считались около 6% детей в возрасте до пяти лет, причем почти половина из них проживала в Азии и более четверти — в Африке. Ожирение является одним из основных факторов риска, влияющим на развитие диабета, сердечно-сосудистых заболеваний, онкологических заболеваний, расстройств опорно-двигательного аппарата, а также на общую смертность. Заболевания, связанные с ожирением, достигли во всем мире масштабов эпидемии: ежегодно из-за избыточного веса или ожирения умирают по меньшей мере 2,8 миллиона человек. По имеющимся оценкам, к 2025 году экономическое бремя заболеваний, связанных с ожирением, достигнет в мировом масштабе 1,2 трлн долл. США в год. Чтобы справиться с эпидемией ожирения, общественность и национальные и международные директивные органы должны объединить усилия для поддержки эффективных мер нутритивной коррекции, программ и политики в области питания. В данном контексте важное значение имеют данные об энергозатратах, получаемые с помощью так называемого метода «воды с двойной меткой» (ВДМ) с использованием стабильных изотопов, которые обеспечивают фактическое обоснование решений по разработке более эффективной политики в области питания и здравоохранения в целях борьбы с растущей эпидемией ожирения во всем мире.

150. Количество затраченной человеком энергии отражает измеряемый с помощью метода ВДМ общий суточный расход энергии (ОСР). Это имеет важное значение для определения требований к получению энергии с пищей. Данные ОСР используются при разработке и оценке мер нутритивной поддержки и стимулирования физической активности, а также служат своего рода золотым стандартом для валидации методов, основанных на простом учете энергетической ценности пищи. Агентство поддерживает применение метода ВДМ, поскольку это единственный метод, который позволяет оценивать ОСР в условиях обычного образа жизни, без нарушения повседневной деятельности, что делает его оптимальным выбором для проведения исследований в полевых условиях.

151. Метод ВДМ основывается на использовании для измерения энергозатрат человека двух индикаторов в виде стабильных изотопов — дейтерия и кислорода-18. Человек выпивает некоторую дозу воды, в которой содержатся два нерадиоактивных изотопа, и она смешивается с присутствующей в организме водой. Изотопы выводятся из организма с мочой, с потом и при дыхании. В период до введения дозы воды и в течение 7–14 дней после этого собираются образцы мочи. Дейтерий выводится из организма только вместе с водой, в то время как кислород-18 выводится из организма быстрее — как с водой, так и с углекислым газом при дыхании. Разность скорости выведения дейтерия и кислорода-18 является мерой скорости образования диоксида углерода, на основе которой рассчитываются энергозатраты.

152. Хотя этот метод является неинвазивным, безопасным и может легко применяться в полевых условиях, его использование среди больших групп населения может быть весьма дорогостоящим, учитывая затраты на необходимые изотопы и аналитическое оборудование. Таким образом, исследования с использованием метода ВДМ имеют, как правило, небольшие масштабы; в то же время за счет объединения данных, полученных в ходе многих исследований, можно получить ответы на некоторые вопросы, которые не могут быть решены в рамках отдельных исследований, например о том, каким образом на потребностях различных групп населения в энергии сказывается изменение климата. Чтобы содействовать обобщению глобальных данных по ВДМ и получить ответы на некоторые важные вопросы, в декабре 2018 года Агентство запустило базу данных, в которой содержатся данные измерений,

¹⁵ <https://globalnutritionreport.org/reports/2021-global-nutrition-report/>

касающихся расхода энергии человеком, за последние три десятилетия. По состоянию на ноябрь 2021 года в эту базу включены соответствующие данные по более чем 7600 пациентам из 32 стран в возрасте от 8 дней до 95 лет. Почти 65% участников исследования составляют женщины; большая часть данных была получена из стран с высоким уровнем дохода.

Тенденции

153. Весомым фактором, способным переломить ситуацию в борьбе с ожирением, можно считать Базу данных Агентства по измерениям ВДМ. Новые результаты, опубликованные в 2021 году на основе анализа содержащихся в базе данных, свидетельствуют о том, какое важное значение методы измерения стабильных изотопов имеют для получения информации о здоровье человека и особенно о катастрофических масштабах ожирения.

154. Опубликованная в журнале «Сайенс» статья¹⁶ переворачивает наши прежние представления об обмене веществ и энергии (метаболизме) (рис. Н.2). На основе данных из базы Агентства по измерениям ВДМ в ней рассматривается, каким образом суточный расход энергии меняется на протяжении всей жизни человека, и доказывается, что метаболизм фактически подразделяется на четыре различные фазы, от рождения до девятого десятилетия жизни. Такие важные этапы жизни, как половое созревание, беременность и менопауза, а также пол и старение в среднем возрасте не оказывают на метаболизм такого сильного влияния, как считалось ранее. Эти результаты помогут ученым лучше изучить важные вопросы, касающиеся здорового метаболизма, и понять, как помочь людям вести более здоровый образ жизни на каждом жизненном этапе.

155. Еще одна статья, опубликованная в журнале «Каррент байолоджи»¹⁷, посвящена влиянию на энергетический баланс физической активности и содержит свидетельства того, что увеличение физической активности не ведет к такому высокому уровню ОСР, как считалось ранее. Это обуславливается компенсацией, т. е. большая физическая нагрузка приводит к снижению уровня основного обмена. Кроме того, людям с ожирением или тяжелым ожирением может быть труднее сжигать жир с помощью физической активности, нежели чем худым людям. Эти новые результаты также имеют важные последствия с точки зрения выработки стратегий общественного здравоохранения в области борьбы с избыточным весом и ожирением.

156. В настоящее время ведутся новые исследования и выходят новые публикации, в центре внимания которых находятся такие вопросы, как факторы, влияющие на водный обмен, и необходимое для ежедневного потребления количество чистой воды, а также влияет ли температура окружающей среды и глобальное потепление на потребности в энергии и снижаются ли энергозатраты человека на фоне эпидемии ожирения. Вместе с тем, чтобы повысить глобальную репрезентативность исследований и обеспечить директивные органы фактическими данными, на основе которых могут определяться важнейшие меры в области питания и борьбы с эпидемией ожирения, необходимо больше данных из стран с низким и средним уровнем дохода. Агентство будет поддерживать новый проект координированных исследований, предполагающий сбор большего объема данных об энергозатратах в странах с низким и средним уровнем дохода, и следить за тем, чтобы база данных Агентства по измерениям ВДМ пополнялась и далее и охватывала все государства-члены.

¹⁶ Daily energy expenditure through the human life course, Science, Vol. 373, No. 6556, 13 August 2021

¹⁷ Energy compensation and adiposity in humans, Current Biology, Vol. 31, Issue 20, 25 October 2021



РИС. Н-2. Опубликовано в журнале «Сайенс» знаковое исследование переворачивает прежние представления о метаболизме.

I. Радиоизотопы и радиационная технология

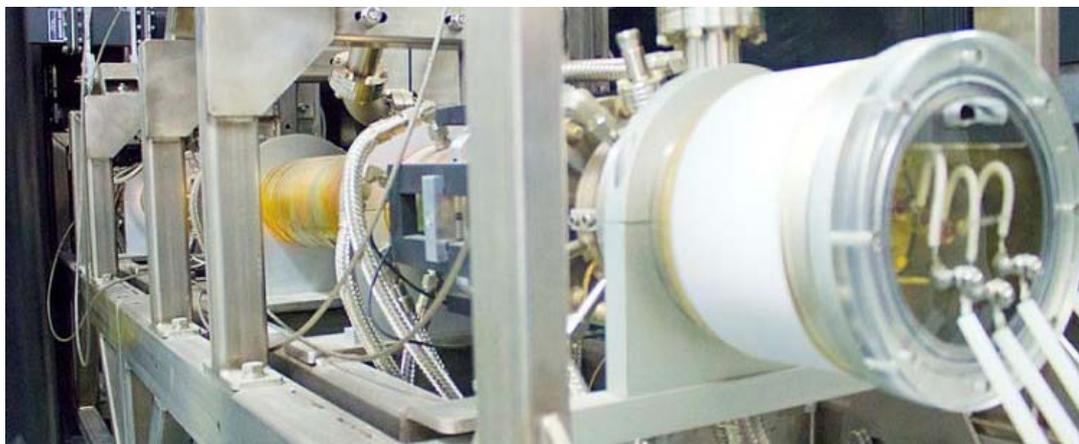
I.1. Новые способы производства медицинских радиоизотопов

Положение дел

157. Радиоизотопы и радиофармацевтические препараты используются как для диагностики, так и для лечения рака и других хронических заболеваний и помогают спасти жизни людей. Важнейшей задачей является обеспечение бесперебойных поставок основных радиоизотопов. Такие медицинские радиоизотопы, как молибден-99/технеций-99m, фтор-18, галлий-68, йод-131 и лютеций-177, в настоящее время производятся в исследовательских реакторах и циклотронах в процессе ядерных реакций, вызываемых бомбардировкой материала мишени высокоэнергетическими частицами, такими как нейтроны или протоны. После имевших место в 2007–2010 годах перебоев в поставках молибдена-99 и нарушений в работе каналов распространения во время пандемии COVID-19 исследователи и производители приступили к разработке альтернативных способов производства медицинских радиоизотопов. В Канаде была одобрена и допущена к коммерческому применению технология производства технеция-99 с использованием циклотронов.

158. Два новых способа производства молибдена-99 с использованием линейных ускорителей открывают возможности для укрепления и расширения глобальной цепи поставок молибдена-99, который является наиболее широко используемым медицинским радиоизотопом. Во всем мире предпринимаются также усилия по производству медицинских радиоизотопов для выпуска инновационных и эффективных терапевтических агентов на основе фотодинамических (γ , n) реакций, в особенности для производства актиния-225 и меди-67.

159. Для производства медицинских радиоизотопов могут применяться технологии, основанные на работе других ускорителей частиц, помимо циклотронов (рис. I.1). При облучении мишеней на линейных ускорителях возникают (γ, n) реакции, которые могут использоваться для получения множества медицинских изотопов, таких как молибден-99, актиний-225, медь-67 и скандий-47. В настоящее время готовится публикация Агентства, в которой будут рассмотрены все этапы этого процесса.



*РИС. I-1. Общий вид линейного ускорителя, эксплуатируемого компанией «Кэнэдиан изотоп инновэйшнс»
(Фото: Канадский источник синхротронного излучения)*

Тенденции

160. С помощью таких фотодинамических реакций возможно также получение радиоизотопов меди-67 и актиния-225. В контексте создания тераностических радиофармпрепаратов, особенно основанных на моноклональных антителах, внимание многих исследователей и ученых привлекает медь-67, которая имеет среднюю продолжительность периода полураспада, излучает бета-частицы, используемые в терапевтических целях, и гамма-частицы, используемые для диагностической визуализации. В рамках недавних исследований на основе фотодинамической реакции (γ, n) была успешно получена медь-67 высокого качества, которая может использоваться для производства радиофармпрепаратов и применяться в клинических испытаниях в США и Австралии.

161. Большой интерес с точки зрения таргетной альфа-терапии онкологических заболеваний представляет также радионуклид актиний-225. Доклады¹⁸, касающиеся нового фотодинамического способа получения актиния-225, свидетельствуют о том, что получаемый таким образом продукт содержит меньше примесей и больше изотопов, чем при использовании других способов. Это важный результат, который открывает путь к удовлетворению растущего мирового спроса на актиний-225. В центре внимания нового проекта координированных исследований, начатого Агентством, будут находиться вопросы производства и контроля качества радиофармпрепаратов на основе актиния.

162. Производство радиоизотопов в реакторах основывается на реакциях захвата нейтронов в материале мишени. Как правило, для производства радиоизотопов для терапевтических применений в ядерной медицине используются исследовательские реакторы. Обычным способом получения ряда радиоизотопов, таких как кобальт-60, которые используются в промышленности и брахитерапии, является облучение мишеней, устанавливаемых на АЭС. В 2021 году регулирующий орган выдал разрешение на производство молибдена-99 на

¹⁸ Actinium-225 production with an electron accelerator, Journal of Applied Physics 129, 104901 (2021)

коммерческой АЭС с реактором типа CANDU (рис. I.2). В настоящее время изучается аналогичный подход к производству на АЭС других важных короткоживущих медицинских радиоизотопов, включая лютеций-177 и гольмий-166. Это направление может открывать для проектировщиков энергетических реакторов новые перспективы, так как будет необходимо закладывать в проект возможность производства радиоизотопов.



*РИС. I-2. В 2021 году Комиссия по ядерной безопасности Канады разрешила производить жизненно важный медицинский радиоизотоп молибден-99 на АЭС «Дарлингтон».
(Фото: «Онтарио пауэр дженерейшн»)*

163. Более широкое внедрение этих способов применения, которые в настоящее время ограничиваются несколькими странами, в будущем может привести к смене всей парадигмы производства медицинских радиоизотопов.

Ж. Искусственный интеллект для ядерно-физических наук и применений

Положение дел

164. Искусственный интеллект (ИИ) — это набор технологий, позволяющих объединять числовые данные, обрабатывать алгоритмы и постоянно наращивать вычислительную мощность для разработки систем, которые способны решать сложные задачи, используя аналог человеческой логики и разума. Технологии ИИ позволяют анализировать большие объемы данных, чтобы изучать и оценивать пути решения конкретных задач — это так называемый метод «машинного обучения».

165. Искусственный интеллект развивается в геометрической прогрессии и уже способен сортировать и интерпретировать огромные объемы данных из различных источников для выполнения широкого спектра задач и помощи в решении многих наиболее актуальных мировых проблем. Он обладает огромным потенциалом для ускорения технологического развития во многих областях — от ядерной медицины до управления водными ресурсами, ядерной науки

и промышленности. В частности, способность ИИ распознавать закономерности данных и анализировать изображения высокого разрешения, получаемые с помощью спутников, беспилотных летательных аппаратов или медицинских сканеров позволяет более оперативно реагировать на гуманитарные чрезвычайные ситуации, обнаруживать глобальные гидроклиматические изменения, свидетельствующие о возможности засух или наводнений, контролировать и повышать продуктивность сельского хозяйства, отслеживать миграцию животных и морских организмов, а также помогать медицинским работникам в выявлении и лечении онкологических и других заболеваний.

166. Сочетание изотопных методов с технологиями ИИ обеспечивает интерпретируемую основу для извлечения новой информации исходя из незначительных колебаний изотопного состава, что открывает широкие возможности в самых разных областях, включая изотопную гидрологию, экологию, криминалистическую экспертизу и продовольственную безопасность. Эксперты уже применяют основанные на ИИ подходы для выполнения быстрого анализа огромных объемов изотопных данных о водных ресурсах, которые хранятся в глобальных сетях, таких как эксплуатируемая Агентством и Всемирной метеорологической организацией глобальная сеть «Изотопы в осадках». Результативный и эффективный анализ таких данных с использованием ИИ помогает ученым получить представление о процессах изменения климата и влиянии факторов, связанных с изменением климата и ростом населения, на доступность водных ресурсов во всем мире.

167. В рамках исследований, ведущихся в области термоядерного синтеза и ядерной науки, с помощью технологий машинного обучения можно оптимизировать решения для проведения экспериментов и контроля в режиме реального времени, которые необходимы для устойчивой, безопасной и эффективной работы исследовательских установок, максимально увеличивая количество и прикладную значимость информации, получаемой из экспериментальных данных и результатов моделирования.

168. Искусственный интеллект способен также внести свой вклад в борьбу с раком, способствуя при этом снижению сопутствующих затрат. Основанные на искусственном интеллекте подходы применяются как вспомогательный инструмент при диагностике и лечении рака, обеспечивая возможность улучшенной интерпретации изображений и точного построения контура опухоли, что позволяет разрабатывать точные планы лечения, а также применять адаптивную лучевую терапию — процесс лучевой терапии, учитывающий внутренние анатомические особенности конкретного пациента. Все более важную роль в области медицинской визуализации играет машинное обучение, которое находит применение в прогнозировании индивидуального течения заболевания и ответа на терапию. Искусственный интеллект также будет занимать важное место в инициативе Агентства «Комплексные действия по борьбе с зоонозными заболеваниями» (ЗОДИАК), помогая специалистам предсказывать, выявлять, оценивать и сдерживать будущие вспышки зоонозных заболеваний.

Тенденции

169. Расширенное использование ИИ в области ядерных наук и применений требует, чтобы в рамках различных дисциплин предпринимались совместные усилия, включая курирование информации и информационный обмен, прозрачные меры по развитию соответствующей деятельности в целях координации и поддержки совместной работы исследователей, представляющих широкий спектр тематических областей.

170. Для внедрения технологий искусственного интеллекта необходимы тесные партнерские связи на международном уровне и сотрудничество между представителями различных дисциплин в целях разработки руководящих материалов в области регулирования, этики, образования и подготовки кадров, а также для обмена опытом, знаниями и положительной практикой. При этом должна учитываться необходимость того, чтобы прикладные технологии ИИ использовались на инклюзивной, справедливой и равноправной основе в интересах всего общества. Это особенно важно в контексте применения ИИ в сфере ядерных технологий, которое должно ставить своей целью равноправное устойчивое развитие в интересах нынешнего и будущих поколений.

171. Признавая все преимущества и возможности, которые открывает ИИ, а также связанные с этим трудности, включая проблемные вопросы, касающиеся прозрачности, доверия, безопасности и этики, Агентство стремится к открытому диалогу и сотрудничеству в целях содействия применению ИИ в сфере ядерной науки и технологий, чтобы оказывать своим государствам-членам более активную поддержку в мирном использовании ядерных технологий.

172. Движение «ИИ во благо», учрежденное при участии Международного союза электросвязи (МСЭ) и 38 организаций системы Организации Объединенных Наций, включая Агентство, представляет собой круглогодично действующий цифровой формат взаимодействия, предназначенный для поиска направлений применения ИИ в целях ускорения достижения целей в области устойчивого развития (рис. J.1). Два проведенных Агентством в ноябре 2021 года вебинара в рамках инициативы «ИИ во благо», а также состоявшееся в октябре 2021 года первое в своем роде техническое совещание по искусственному интеллекту для ядерных технологий и применений стали международной и междисциплинарной дискуссионной площадкой, на которой обсуждались перспективы ядерной науки, технологий и применений, рассматривались новые направления работы и механизмы содействия.



Рис. J-1. Платформа «ИИ во благо» объединяет 38 организаций, входящих в систему Организации Объединенных Наций. (Фото: МСЭ)

173. Эти мероприятия продемонстрировали, как меры по разработке баз данных и повышению доступности данных могут стать реальными стимулами для развития прикладных решений на основе ИИ. Они подчеркнули важность создания, где это возможно, централизованных и взаимосвязанных (федеративных) репозиториев, предназначенных для сбора тщательно

отобранных данных, которые могут быть положены в основу прикладных систем ИИ и машинного обучения; продвижения федеративной методики обучения (перенос моделей, а не данных) для обучения модели, используемой в рамках одной базы данных, для работы с другой базой данных и создания библиотек профильной литературы для обобщения источников, касающихся применения ИИ и машинного обучения в сфере ядерных технологий и приложений.

174. Агентство стремится заложить основу для дальнейшего внедрения инновационных решений на основе ИИ в сфере ядерной науки и приложений, развертывая для этого платформу обмена знаниями «ИИ для мирного атома», оказывая помощь в вопросах регулирования и подготовки кадров и содействуя выработке соответствующих этических рекомендаций.

Приложение

Таблица А-1. Действующие и сооружаемые ядерные энергетические реакторы в мире^а

Страна	Действующие реакторы		Сооружаемые реакторы		Электроэнергия, произведенная на АЭС в 2021 году		Суммарный опыт эксплуатации на конец 2021 года	
	Число энергоблоков	Всего МВт (эл.)	Число энергоблоков	Всего МВт (эл.)	ТВт·ч	% от общего объема	Лет	Месяцев
Аргентина	3	1 641	1	25	10,2	7,2	94	2
Армения	1	448			1,9	25,3	47	8
Бангладеш			2	2 160	НП	НП		
Беларусь	1	1 110	1	1 110	5,4	14,1	1	2
Бельгия	7	5 942			48,0	50,8	317	7
Болгария	2	2 006			15,8	34,6	171	3
Бразилия	2	1 884	1	1 340	13,9	2,4	61	3
Венгрия	4	1 916			15,1	46,8	146	2
Германия	3	4 055			65,4	11,9	830	11
Индия	22	6 795	8	6 028	39,8	3,2	554	9
Иран, Исламская Республика	1	915	1	974	3,2	1,0	10	4
Испания	7	7 121			54,2	20,8	357	1
Канада	19	13 624			86,8	14,3	807	6
Корея, Республика	24	23 091	4	5 360	150,5	28,0	620	2
Мексика	2	1 552			11,6	5,3	59	11
Нидерланды	1	482			3,6	3,1	77	0
Объединенные Арабские Эмираты	2	2 762	2	2 690	10,1	1,3	1	9
Пакистан	5	2 242	1	1 014	15,8	10,6	92	11
Российская Федерация	37	27 727	4	3 759	208,4	20,0	1 410	7
Румыния	2	1 300			10,4	18,5	39	11
Словакия	4	1 868	2	880	14,6	52,3	180	7
Словения	1	688			5,4	36,9	40	3
Соединенное Королевство	12	7 343	2	3 260	41,8	14,8	1 648	6
Соединенные Штаты Америки	93	95 523	2	2 234	771,6	19,6	4 694	4
Турция			3	3 342	НП	НП	НП	НП
Украина	15	13 107	2	2 070	81,1	55,0	548	6
Финляндия	4	2 794	1	1 600	22,6	32,8	171	4
Франция	56	61 370	1	1 630	363,4	69,0	2 393	0
Чешская Республика	6	3 934			29,0	36,6	182	10
Чили	53	50 034	16	15 967	383,2	5,0	470	0
Швейцария	4	2 960			18,6	28,8	232	11
Швеция	6	6 882			51,4	30,8	480	0
Южная Африка	2	1 854			12,2	6,0	74	3
Япония	33	31 679	2	2 653	61,3	7,2	1 965	6
Итого^{b,c}	437	389 508	56	58 096	2 653,1	НП	19 170	9

Примечание: НП — неприменимо.

^a Источник: Информационная система по энергетическим реакторам (ПРИС) Агентства (www.iaea.org/pris) по состоянию на 31 мая 2022 года.

^b Суммарные показатели включают следующие данные по Тайваню, Китай: 3 энергоблока, эксплуатируемая мощность 2 859 МВт (эл.), объем поставленной электроэнергии 26,8 ТВт·ч, что соответствует 10,8% общей структуры энергопроизводства.

^c Суммарный опыт эксплуатации включает данные по остановленным станциям в Италии (80 лет, 8 месяцев), Казахстане (25 лет, 10 месяцев) и Литве (43 года, 6 месяцев), а также по остановленным и действующим станциям на Тайване, Китай (236 лет, 8 месяцев).

Таблица D-1. Распространенные виды применения исследовательских реакторов во всем мире¹⁹

Вид применения ^a	Число соответствующих исследовательских реакторов ^b	Число государств-членов, в которых имеются соответствующие установки
Обучение/подготовка кадров	162	50
Нейтронно-активационный анализ	117	49
Производство радиоизотопов	83	41
Нейтронная радиография	69	37
Облучение материалов/топлива	68	26
Рассеяние нейтронов	44	28
Геохронология	24	21
Трансмутация (легирование кремния)	23	15
Трансмутация (драгоценные камни)	20	12
Нейтронная терапия, в основном НИОКР	15	11
Измерение ядерных констант	14	7
Другие применения ^c	118	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 235 учтенных исследовательских реакторов (по состоянию на декабрь 2021 года 220 из них находили в эксплуатации, 15 были временно остановлены).

^c Другие применения включают калибровку и тестирование контрольно-измерительных приборов, эксперименты в области экранирования, создание источников позитронов и исследования в области сжигания ядерных отходов.

¹⁹ По состоянию на декабрь 2021 года.

Сокращения и аббревиатуры

АСН	Управление по ядерной безопасности (Франция)
АЭС	атомная электростанция
ВДМ	вода с двойной меткой
ВНОУ	высокообъемный низкообогащенный уран
ВОУ	высокообогащенный уран
ГВт (эл.)	гигаватт (электрической мощности)
ГВт·ч	гигаватт-часов
ГГХ	глубинное геологическое хранилище
ДСЭ	долгосрочная эксплуатация
ЗОДИАК	Комплексные действия по борьбе с зоонозными заболеваниями
ИЗРИ	изъятый из употребления закрытый радиоактивный источник
ИИ	искусственный интеллект
ИНИР	комплексная оценка ядерной инфраструктуры
КПР	комплексный план работы
КС-26	26-я сессия Конференции сторон Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (2021 года)
КС-27	27-я сессия Конференции сторон Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (2022 года)
КЯР	Комиссия по ядерному регулированию (США)
МВт (тепл.)	мегаватт (тепловой мощности)
МВт (эл.)	мегаватт (электрической мощности)
МКС	Международная космическая станция
ММР	реакторы малой и средней мощности и модульные реакторы
МСЭ	Международный союз электросвязи
НИОКР	научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы
НОУ	низкообогащенный уран
НУТЕК пластикс	Инициатива по использованию ядерных технологий для борьбы с загрязнением пластиком
НЯЛ	Национальная ядерная лаборатория (Соединенное Королевство)
ОНВ	определяемый на национальном уровне вклад
ОСР	общий суточный расход энергии
ОЯТ	отработавшее ядерное топливо
ПВС	переработанный из вторичного сырья
переработанный ПЭ/ПП	переработанный полиэтилен/полипропилен
ПИУ	подземная исследовательская установка
ПЭТ	позитронно-эмиссионная томография
РКИК ООН	Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата
РМПШ	радиоактивный материал природного происхождения
РФА	рентгенофлуоресцентный анализ
ТПТК	типовые пользовательские требования и критерии
тТМ	тонн тяжелого металла
УАЭС	Управление по атомным электростанциям (Египет)
УАЭСК	Управление по атомной энергии Соединенного Королевства
УВЭ	Управление по выводу из эксплуатации ядерных объектов
УМС	ускорительная масс-спектрометрия
УПП	устойчивость к противомикробным препаратам
УСК	утверждение стандартной конструкции
ФАО	Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций
ФЭЭК	Федерация электроэнергетических компаний Японии
ХОЯТ	промежуточное хранилище отработавшего ядерного топлива
ЭДФ	«Электрисите де Франс»

ATF	устойчивое к авариям топливо
BioPAN	программа по изучению влияния космической среды на биологический материал
COVID-19	коронавирусная инфекция 2019-nCoV
DTT	опытный реактор-токамак с дивертором
ESS	нейтронообразующая мишень скалывания
EURECA	Европейский возвращаемый орбитальный модуль
EXPOSE	моноблок внешней полезной нагрузки на МКС для 1-й фазы экспериментов
HTR	высокотемпературный ядерный реактор
HTTR	высокотемпературный реактор для технических испытаний
iPWR	интегральный реактор с водой под давлением
JEM	Японский экспериментальный модуль
JMTR	Японский материаловедческий реактор
LDEF	платформа для длительного экспонирования
LWR	легководный реактор
MOX	смешанное оксидное топливо
NPM	Энергетический модуль NuScale
O/OREOS	программа по оценке воздействия орбитальных нагрузок на организмы/органические вещества
PHWR	корпусной тяжеловодный реактор
PWR	реактор с водой под давлением
SCWR	сверхкритический водоохлаждаемый реактор
SESLO	программа по изучению выживаемости живых организмов в космической среде
SFR	быстрый реактор с натриевым теплоносителем
SMART	системно-интегрированный модульный усовершенствованный реактор
STEP	сферический токамак для производства энергии
WCR	водоохлаждаемый реактор



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