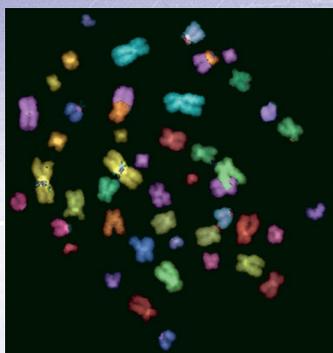


ОБЗОР ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

2020



IAEA

Международное агентство по атомной энергии

Обзор ядерных технологий — 2020

GC(64)/INF/2

Отпечатано МАГАТЭ в Австрии

Сентябрь 2020 года

IAEA/NTR/2020

Предисловие

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

В «Обзоре ядерных технологий — 2020» рассматриваются следующие отдельные области: энергетические применения, усовершенствованные ядерные и термоядерные системы, применение ускорителей и исследовательских реакторов, радиоизотопы и радиационные технологии, здоровье человека и ядерные методы в сфере продовольствия и сельского хозяйства.

Проект «Обзора» был представлен Совету управляющих на его сессии в марте 2020 года в документе GOV/2020/4. Окончательный вариант был подготовлен с учетом обсуждения, состоявшегося в Совете управляющих, а также замечаний, поступивших от государств-членов.

Содержание

Резюме	1
Обзор ядерных технологий — 2020	7
Основной доклад	7
A. Энергетические применения	7
A.1. Ядерная энергетика сегодня	7
A.1.1. Страны, эксплуатирующие АЭС	10
A.1.2. Новые проекты в рамках существующих ядерно-энергетических программ	11
A.1.3. Страны, приступающие к развитию ядерной энергетики	12
A.2. Прогнозы развития ядерной энергетики	14
A.3. Топливный цикл	16
A.3.1. Начальная стадия топливного цикла	16
A.3.2. Обеспечение гарантированных поставок	19
A.3.3. Конечная стадия топливного цикла	20
A.4. Вывод из эксплуатации, восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами	21
A.4.1. Вывод из эксплуатации ядерных установок	21
A.4.2. Восстановление окружающей среды	24
A.4.3. Обращение с радиоактивными отходами	27
B. Усовершенствованные ядерные и термоядерные системы	32
B.1. Усовершенствованные ядерные системы	32
B.1.1. Водоохлаждаемые реакторы	32
B.2. Системы на быстрых нейтронах	35
B.2.1. Газоохлаждаемые реакторы	37
B.2.2. Реакторы малой и средней мощности или модульные реакторы	38
B.2.3. Международные инициативы в области инновационных ядерно-энергетических систем	41
B.2.4. Неэлектрические применения ядерной энергетики	42
B.3. Термоядерный синтез	43
C. Ускорители и исследовательские реакторы	45
C.1. Ускорители и соответствующие контрольно-измерительные приборы	45
C.1.1. Тандемная пучковая установка открывает новые возможности для материаловедческих исследований	45
C.1.2. MACHINA — передвижной ускоритель для проведения неразрушающего анализа объектов культурного наследия на местах	46
C.1.3. Визуализация целых клеток с помощью целенаправленных мегаэлектронвольтных ионных пучков	47
C.1.4. Основанные на использовании лазера технологии ускорителей и связанные с ними разнообразные применения в перспективе	48
C.2. Исследовательские реакторы	49
D. Радиоизотопы и радиационные технологии	52

D.1. Острая проблема пластика: применение ядерных методов.....	52
D.2. Благодаря прорыву в ускорительных технологиях больницы располагают возможностями бор-нейтронзахватной терапии	55
D.2.1. Прогресс в сфере компактных источников нейтронов на базе ускорителей.....	55
D.2.2. Тераностические радиофармпрепараты и БНЗТ	57
D.3. Медицинский изотопный браузер: инструментальное средство для освоения новых путей производства радиоизотопов для борьбы против рака и других заболеваний	58
E. Здоровье человека	59
E.1. Новый метод двойного изотопного индикатора для оценки качества белка, поступающего в организм человека	59
E.1.1. Белок и его воздействие на рост и развитие ребенка	59
E.1.2. Качество белка	60
E.1.3. Метод двойного изотопного индикатора для оценки качества белка, поступающего в организм человека	60
E.1.4. Внутренняя маркировка бобов оксидом дейтерия при поливе растений	60
E.1.5. Тестирование пищи, приготовленной из внутренне маркированных бобов, с участием людей	61
E.1.6. Актуальность метода	61
E.2. Биодозиметрия как полезный инструмент диагностики/прогнозирования в случае радиационных аварийных ситуаций и в медицине	62
E.2.1. Биодозиметрия позволяет увязать биомаркеры с дозами	62
E.2.2. Стандартные методы биодозиметрии	63
E.2.3. Основные новые методы биодозиметрии, разработанные после 2000 года	63
E.2.4. Будущие направления исследований	65
F. Продовольствие и сельское хозяйство	66
F.1. Совершенствование применения метода стерильных насекомых для предотвращения появления и истребления инвазивных видов насекомых-вредителей	66
F.1.1. Общие сведения	66
F.1.2. Совершенствование технологий и стратегий МСН.....	68
F.1.3. Предупреждение и готовность применительно к инвазивным насекомым-вредителям	70
F.2. Использование ядерных методов в поддержку систем отслеживания происхождения пищевых продуктов	71
F.2.1. Общие сведения	71
F.2.2. Ядерные методы.....	71
F.2.3. Базы данных.....	74
F.3. Ядерные методы мониторинга парниковых газов в целях смягчения последствий изменения климата	75
F.3.1. Общие сведения	75
F.3.2. Расширение применения технологии на основе углерода-13 на масштабы поля	77
F.3.3. Метод отслеживания азота-15 для измерения N ₂ O и выявления источников N ₂ O.....	78
F.3.4. Новое в области измерения NH ₃ в масштабах поля.....	78
F.3.5. Заглядывая в будущее.....	80

Резюме

1. На конец 2019 года в мире насчитывалось 443 действующих ядерных энергетических реактора (рис. А-1), общая генерирующая мощность которого достигла 392,1 ГВт (эл.). В 2019 году 13 реакторов были окончательно остановлены, 6 реакторов были подключены к энергосети и началось строительство 5 реакторов. Согласно ближайшим и долгосрочным прогнозам, средоточием роста будет Азия, где находится 35 из 54 строящихся реакторов и 61 из 74 реакторов, подключенных к энергосетям с 2005 года.

447 действующих реакторов по регионам

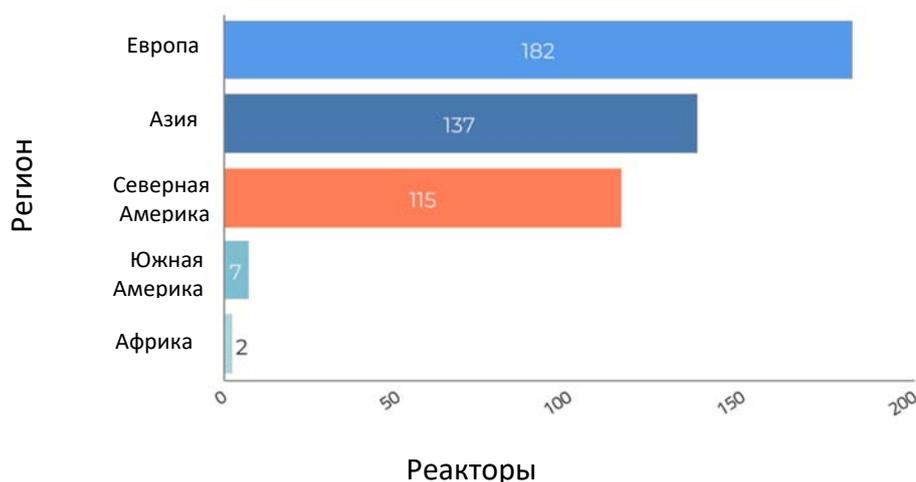


РИС. А-1. Действующие ядерные энергетические реакторы в 2019 году. (Источник: Информационная система по энергетическим реакторам МАГАТЭ <http://www.iaea.org/pris>)

2. Сегодня ядерно-энергетическими мощностями располагают 30 стран, и 28 стран изучают возможность включения ядерной энергетики в национальную структуру энергопроизводства, строят соответствующие планы или уже активно работают над этим. Четыре страны, приступающие к развитию ядерной энергетики, начали строительство своих первых атомных электростанций (АЭС), две из которых практически построены, и еще несколько стран, которые приняли решение о внедрении ядерной энергетики, находятся на продвинутых этапах подготовки инфраструктуры.

3. Прогнозы Агентства 2019 года в отношении глобальных ядерно-энергетических мощностей содержат комбинированную оценку вклада ядерной энергетики в мировую генерацию на будущие периоды в зависимости от того, будут ли введены в действие новые значительные мощности для компенсации возможного вывода некоторых реакторов из эксплуатации. Согласно низкому прогнозу на период до 2030 года установленная мощность-нетто сначала будет постепенно снижаться, а затем к 2050 году вернется к уровню 371 ГВт (эл.). Согласно высокому прогнозу к 2030 году мощность возрастет по сравнению с нынешним уровнем на 25% до 496 ГВт (эл.), а к 2050 году — на 80% до 715 ГВт (эл.). К середине века доля

ядерной энергетики в общемировом производстве электроэнергии составит порядка 6% для низкого прогноза и приблизительно 12% для высокого прогноза, по сравнению со значением порядка 10% в 2019 году.

Преимущества с точки зрения смягчения последствий изменения климата, обеспечения энергетической безопасности и экологической и социально-экономической политики являются основными факторами, которые обуславливают намерения многих стран внедрить ядерную энергетику или расширить уже действующие программы. На Международной конференции по изменению климата и роли ядерной энергетики, организованной МАГАТЭ в октябре 2019 года в сотрудничестве с Агентством по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития, было подчеркнуто, что ядерная энергетика будет играть ключевую роль в содействии достижению целей в области борьбы с изменением климата, ускоряя переход к низкоуглеродной энергетике.

4. Прогноз мирового производства урана в 2019 году был аналогичен прогнозу 2018 года и составил около 53 500 тонн. Сохраняющиеся низкие цены на уран обусловили значительное сокращение его добычи, и новые проекты по добыче урана остаются замороженными, а ряд работавших ранее урановых рудников и обогатительных фабрик остаются в законсервированном состоянии. Общемировые мощности по конверсии, обогащению и изготовлению топлива были более чем достаточны для удовлетворения текущего и прогнозируемого спроса.

5. В октябре 2019 года на объекте специального назначения в Казахстане Агентство получило партию низкообогащенного урана (НОУ), что ознаменовало собой официальное создание Банка НОУ МАГАТЭ, призванного обеспечить странам гарантированные поставки ядерного топлива.

6. В ближайшие годы ожидается вывод из эксплуатации значительного числа энергетических и исследовательских реакторов, других установок топливного цикла, критических сборок, ускорителей и облучательных установок, а также будут проводиться связанные с этим реабилитационные мероприятия. Процессы в этих областях постоянно совершенствуются благодаря как устоявшимся, так и новым технологиям.

7. Несколько стран добились определенного прогресса в осуществлении своих проектов по глубокому геологическому захоронению высокоактивных радиоактивных отходов и/или отработавшего топлива, заявленного в качестве отходов. В Финляндии ведется строительство хранилища, в Швеции ожидается принятие окончательного решения по соответствующей заявке на получение лицензии, а во Франции завершается процедура рассмотрения заявки на получение лицензии для ее хранилища. В нескольких странах продвигаются работы по проектам скважинного захоронения для изъятых из употребления закрытых радиоактивных источников, включая поддерживаемые Агентством проекты в Гане и Малайзии. В мире функционируют пункты захоронения для всех других категорий радиоактивных отходов.

8. Во всех регионах мира ширится использование современных ядерных реакторов и их применений, поскольку они расцениваются как системы, способные внести вклад в глобальный переход к более устойчивым, доступным и надежным энергетическим системам. Такая технология, вполне подходящая для интеграции в будущие безуглеродные энергосистемы, важными составными частями которых будут разнообразные источники энергии, включает реакторы малой и средней мощности или малые модульные реакторы (ММР).

9. Все более широкий интерес вызывает использование ядерной энергии в неэлектрических применениях, таких как опреснение морской воды, производство водорода, централизованное теплоснабжение и охлаждение, а также в ряде других энергоемких промышленных применениях.

ММР особенно подходят для применений, также известных как когенерация, которые могут компенсировать значительную часть затрат на выработку электроэнергии на АЭС.

10. Значительный прогресс достигнут на строительной площадке сооружения ИТЭР, где завершено более 73% строительных работ. Предполагается, что ИТЭР начнет функционировать на полную мощность примерно к 2035 году. В ряде государств-членов также осуществляются самые разнообразные программы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в области термоядерного синтеза. Важной вехой является строительство JT-60SA — сверхпроводящего токамака, который сооружается в Наке, Япония, в рамках международного сотрудничества между Европой и Японией.

11. В 54 странах находящиеся в эксплуатации 250 исследовательских реакторов продолжают играть стратегическую роль в поддержке работ, осуществляемых в медицинском, промышленном, образовательном и ядерно-энергетическом секторах. В 6 странах строятся в общей сложности 9 исследовательских реакторов, и в 11 странах запланировано создание 14 исследовательских реакторов. Исследовательские реакторы являются основными национальными установками, способствующими развитию инфраструктуры и программ в области ядерной науки и технологий. В 2019 году одна научно-исследовательская организация — Корейский научно-исследовательский институт атомной энергии стала международным центром МАГАТЭ на базе исследовательского реактора.

12. На сегодняшний день 99 исследовательских реакторов и четыре установки по производству медицинских изотопов были переведены с использования высокообогащенного урана (ВОУ) на НОУ, или же было подтверждено их закрытие. В 2019 году была начата подготовка к возвращению ВОУ-топлива для исследовательского реактора ИВГ.1М из Казахстана в Российскую Федерацию после перевода ИВГ.1М на НОУ-топливо. Началась также подготовка к снижению степени обогащения ВОУ-топлива исследовательского реактора ИГР в Казахстане до уровня обогащения ниже 20%. К концу 2019 года в рамках программы по возвращению ВОУ-топлива американского происхождения было завершено удаление примерно 1600 кг свежего и отработавшего ВОУ-топлива для исследовательских реакторов, в рамках программы по удалению материала, не подпадающего под программы по возвращению топлива американского или российского происхождения, было завершено удаление или подтверждена утилизация примерно 2875 кг ВОУ-топлива, а в рамках программы по возвращению топлива российского происхождения было завершено удаление примерно 2300 кг топлива.

13. Радиационные технологии отвечают основным принципам «зеленой» химии и создают разнообразные возможности для обработки материалов, таких как полимеры (или пластмассы) посредством контролируемого образования или разрыва химических связей. Польза радиационных технологий была всесторонне доказана в химии полимеров, включая инновационную модификацию свойств полимеров и создание уникальных полимерных композиционных материалов, а также при переработке полимерных отходов. Интерес к этой технологии возрастает, и государства-члены все чаще обращаются с просьбой задействовать радиационные технологии в решении глобальной проблемы переработки пластиковых отходов.

14. Бор-нейтронзахватная терапия (БНЗТ) — это основанный на нейтронах метод, позволяющий избирательно облучать опухоль на клеточном уровне. БНЗТ особенно эффективна при лечении рака мозга, головы, шеи и кожи. БНЗТ, при которой используется реакция между нейтроном и бором для избирательного уничтожения только раковых клеток, могла бы стать средством, которое радикально отличается от обычной радиотерапии, и обещает стать одним из действенных способов лечения рака. В участвующих центрах во всем мире в применении БНЗТ было достигнуто много успехов. Значительный прогресс был достигнут в оптимизации соединений бора и контроле их накопления в опухолевых клетках; и были разработаны трехмерные системы расчета доз. Интерес к этой теме возобновился благодаря технологическому прорыву в области производства нейтронов на компактных ускорителях, что позволяет монтировать эти установки в больницах и онкологических научных центрах.

15. Качество белка имеет крайне важное значение для удовлетворения потребностей в питании населения развивающихся стран, в частности во время беременности и в раннем детстве. Аминокислоты важны для обеспечения здорового роста в раннем детстве. Новый минимально инвазивный изотопный метод на основе использования дейтерия и углерода-13 позволяет измерять реальную идеальную усвояемость незаменимых аминокислот и проводить оценку белковой ценности питания населения. Новый метод поможет определить источники растительного белка хорошего качества, особенно бобовых культур, для потребления населением и послужит основой для разработки Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных Наций рекомендаций в отношении качества белка для населения.

16. Методы биодозиметрии помогают выявить радиационное облучение человека и дать ему количественную оценку. Ретроспективная биодозиметрия может помочь выявить радиационное облучение, полученное много лет назад. Недавно методы биодозиметрии начали применяться в радиационной онкологии и ядерной медицине, а также в диагностической и интервенционной радиологии.

17. Был разработан новый веб-инструмент — медицинский изотопный браузер, который позволяет напрямую прогнозировать объем производства медицинских изотопов на основе данных, вводимых пользователем. Медицинский изотопный браузер могут использовать ученые-медики и работники радиофармацевтической промышленности для поиска до сих пор не изученных путей производства радиоизотопов. Это явится весомым вкладом в борьбу против рака и других заболеваний. Производство медицинских изотопов для терапии или диагностики зависит от весьма сложных процессов, происходящих во время ядерной реакции, и эта работа по силам только физикам-ядерщикам, которые задействуют измерения и теории ядерных реакций. Благодаря медицинскому изотопному браузеру эта основополагающая информация через графический интерфейс пользователя для производства изотопов становится доступной многим пользователям, которые не являются специалистами.

18. Инвазивные виды становятся все более распространенными и способствуют глобальному сокращению биоразнообразия. Метод стерильных насекомых (МСН), внедренный в качестве важного компонента комплексной борьбы с сельскохозяйственными вредителями в масштабах района, может обеспечивать предотвращение появления инвазивных популяций, а также их сдерживание или истребление, не оказывая негативного воздействия на окружающую среду. Благодаря совершенствованию технологий и протоколов массового разведения, стерилизации и выпуска стерильных насекомых значительно повысилась экономическая эффективность комплексной борьбы с сельскохозяйственными вредителями в масштабах района с использованием МСН. Это позволило распространить применение этой технологии на другие важные виды насекомых-вредителей, включая значимых инвазивных насекомых-вредителей, которые негативно влияют на растения, животных и здоровье человека. Как показывает анализ, обеспечение готовности к быстрому реагированию до выявления вредителей обходится дешевле кампаний по их ликвидации.

19. Многие продукты питания продаются по премиальным ценам из-за указанной на этикетке «особенной ценности», обусловленной географическим положением места происхождения, методами производства и уникальными свойствами. Привязка продуктов к месту происхождения может быть частью благотворного круга обеспечения устойчивого качества на основе сохранения местных ресурсов, включая сельскохозяйственную, ремесленную, этическую и нутрицевтическую маркировку, т.е. те спецификации, которые свидетельствуют об особенной ценности пищевых продуктов. Чтобы защитить потребителя от контрафактной пищевой продукции и потенциальных нежелательных последствий в плане пищевой безопасности, необходимы аналитические методы для подтверждения правильности данных относительно особенной ценности с помощью систем отслеживания происхождения пищевых продуктов. Ряд ядерных, изотопных и смежных методов оказались пригодны для подтверждения широкого круга маркировочных данных относительно особенной ценности. Такие методы имеют огромный потенциал для систем отслеживания происхождения пищевых продуктов, которые позволяют защищать и продвигать пищевые продукты, на маркировках которых содержатся данные об их особенной ценности. Более широкое использование государствами-членами такой технологии в конечном счете позволит оградить от обмана потребителей и пользующихся высокой репутацией производителей, обеспечить соблюдение правовых и этических норм, создать стимулы для внутренних рынков и устранить барьеры в международной торговле.

Обзор ядерных технологий — 2020

Основной доклад

А. Энергетические применения

А.1. Ядерная энергетика сегодня

20. По состоянию на 31 декабря 2019 года в мире эксплуатировались 443 ядерных энергетических реактора суммарной мощностью 392,1 ГВт (эл.)¹ (см. табл. А-1). Из этого количества 83% составляют реакторы с легководным замедлителем и теплоносителем, 11% — реакторы с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем, 3% — легководные реакторы с графитовым замедлителем и 3% — газоохлаждаемые реакторы (см. рис. А-2). Три установки представляют собой быстрые реакторы с жидкометаллическим теплоносителем. На 376 легководных реакторах было произведено почти 89% электроэнергии, вырабатываемой на АЭС.

Находящиеся в эксплуатации реакторы в разбивке по типам, данные на 2019 год

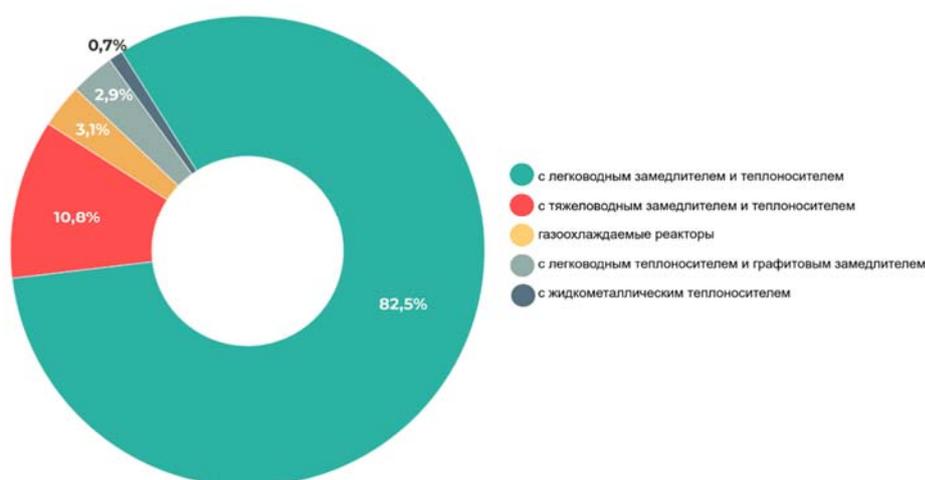


РИС. А-2. Ядерные энергетические реакторы по типам (Источник: Информационная система по энергетическим реакторам МАГАТЭ <http://www.iaea.org/pris>)

21. В 2019 году к энергосетям были подключены шесть новых легководных реакторов с водой под давлением (PWR): два реактора в Китае («Тайшань-2», 1660 МВт (эл.) и «Янцзян-6», 1000 МВт (эл.)), один в Республике Корея («Шин-Кори-4», 1340 МВт (эл.)), и три в Российской Федерации (второй энергоблок Нововоронежской АЭС-2, 1114 МВт (эл.), «Академик Ломоносов-1», 32 МВт (эл.) и «Академик Ломоносов-2», 32 МВт (эл.)), в результате чего суммарная введенная за год во всем мире мощность электрогенерации составила 5174 МВт (эл.). В общей сложности были окончательно остановлены 13 реакторов: на Тайване, Китай, —

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

«Цзиньшань-2»; в Германии — «Филиппсбург-2»; в Японии — «Генкай-2» и энергоблоки 1–4 АЭС «Фукусима-дайни»; в Республике Корея — «Ульсан-1»; в Российской Федерации — первый энергоблок Билибинской АЭС; в Швеции — «Рингхальс-1»; в Швейцарии — «Мюлеберг»; в Соединенных Штатах Америки — «Пилгрим-1» и «Три-Майл Айленд-1».

22. По состоянию на 31 декабря 2019 года на стадии строительства находились 54 реактора. Начались строительные работы в Китае на АЭС «Чжанчжоу-1» и «Тайпинлин-1», в Исламской Республике Иран на АЭС «Бушер-2», в Российской Федерации на втором энергоблоке Курской АЭС-2, в Соединенном Королевстве на втором энергоблоке АЭС «Хинкли-Пойнт С». Согласно прогнозам, рост мощностей, а также развитие ядерной энергетики в краткосрочной и долгосрочной перспективе будет происходить преимущественно в Азии (рис. А-3), где ведется сооружение 35 реакторов. Также в Азии находятся 61 из 74 новых реакторов, подключенных к энергосетям в период с 2005 года.

Количество сооружаемых реакторов по регионам

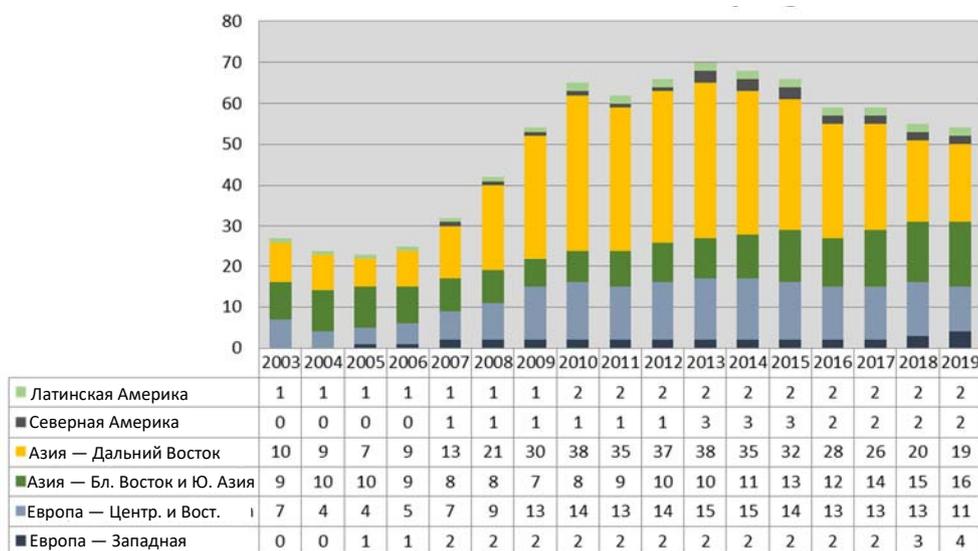


РИС. А-3. Количество сооружаемых реакторов по регионам

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

Таблица А-1. Действующие и сооружаемые ядерные энергетические реакторы в мире
(по состоянию на 31 декабря 2019 года)^а

СТРАНА	Действующие реакторы		Сооружаемые реакторы		Электроэнергия, произведенная на АЭС в 2019 году		Суммарный опыт эксплуатации на конец 2019 года	
	Число энергоблоков	Общая мощность, МВт (эл.)	Число энергоблоков	Общая мощность, МВт (эл.)	ТВт·ч	% от общего объема производства	Годы	Месяцы
АРГЕНТИНА	3	1641	1	25	7,9	5,9	88	2
АРМЕНИЯ	1	375			2,0	27,8	45	8
БАНГЛАДЕШ			2	2160				
БЕЛАРУСЬ			2	2220				
БЕЛЬГИЯ	7	5930			41,4	47,6	303	7
БОЛГАРИЯ	2	2006			15,9	37,5	167	3
БРАЗИЛИЯ	2	1884	1	1340	15,2	2,7	57	3
ВЕНГРИЯ	4	1902			15,4	49,2	138	2
ГЕРМАНИЯ	6	8113					846	7
ИНДИЯ	22	6255	7	4824	40,7	3,2	526	11
ИРАН, ИСЛАМСКАЯ РЕСПУБЛИКА	1	915	1	974	5,9	1,8	8	4
ИСПАНИЯ	7	7121			55,9	21,4	343	1
КАЗАХСТАН							25	10
КАНАДА	19	13554			94,9	14,9	769	6
КИТАЙ	48	45518	11	10564	330,1	4,9	370	1
КОРЕЯ, РЕСПУБЛИКА	24	23172	4	5360	138,8	26,2	572	2
МЕКСИКА	2	1552			10,9	4,5	55	11
НИДЕРЛАНДЫ	1	482			3,7	3,1	75	0
ОБЪЕДИНЕННЫЕ АРАБСКИЕ ЭМИРАТЫ			4	5380				
ПАКИСТАН	5	1318	2	2028	9	6,6	82	5
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ	38	28437	4	4525	195,5	19,7	1334	5
РУМЫНИЯ	2	1300			10,4	18,5	35	11
СЛОВАКИЯ	4	1814	2	880	14,3	53,9	172	7
СЛОВЕНИЯ	1	688			5,5	37,0	38	3
СОЕДИНЕННОЕ КОРОЛЕВСТВО	15	8923	2	3260	51,0	15,6	1619	7
СОЕДИНЕННЫЕ ШТАТЫ АМЕРИКИ	96	98152	2	2234	809,4	19,7	4505	8
ТУРЦИЯ			1	1114	н.д.	н.д.		
УКРАИНА	15	13107	2	2070	78,1	53,9	518	6
ФИНЛЯНДИЯ	4	2794	1	1600	22,9	34,7	163	4
ФРАНЦИЯ	58	63130	1	1630	382,4	70,6	2280	4
ЧЕШСКАЯ РЕСПУБЛИКА	6	3932			28,6	35,2	170	10
ШВЕЙЦАРИЯ	4	2960			25,4	23,9	224	11
ШВЕЦИЯ	7	7740			64,4	34,0	467	0
ЮЖНАЯ АФРИКА	2	1860			13,6	6,7	70	3
ЯПОНИЯ	33	31679	2	2653	65,7	7,5	1899	6
Всего^{b,c,d}	443	392098	54	57441	2586,2		18329	10

а. Источник: Информационная система Агентства по энергетическим реакторам (ПРИС). (www.iaea.org/pris).

б. Общий объем произведенной в 2019 году электроэнергии не включает данные с семи ядерных энергоблоков Германии, поскольку на момент публикации информация по этим блокам не поступала.

в. Суммарные показатели включают следующие данные по Тайваню, Китай: 4 энергоблока мощностью 3844 МВт (эл.) в эксплуатации; 2 энергоблока мощностью 2600 МВт (эл.) в стадии сооружения.

д. Суммарный опыт эксплуатации включает также данные по остановленным станциям в Италии (80 лет, 8 месяцев), Казахстане (25 лет, 10 месяцев), Литве (43 года, 6 месяцев), и по остановленным и действующим станциям на Тайване, Китай (224 года, 1 месяц).

А.1.1. Страны, эксплуатирующие АЭС

23. По состоянию на конец 2019 года свыше 66% действующих 443 ядерных энергетических реакторов, на долю которых приходится 256,3 ГВт (эл.) мощности нетто, находились в эксплуатации более 30 лет. Порядка 17% мировой мощности вырабатывается ядерными энергетическими реакторами, находящимися в строю уже более 40 лет. В настоящее время на все большем числе АЭС осуществляются программы по обеспечению долгосрочной эксплуатации и управлению старением.

В 2019 году на нужды неэлектрических применений ядерной энергии 71 ядерным энергетическим реактором по всему миру (14 в Азии и 57 в Европе) было произведено 2146,72 гигаваатт-часа (ГВт·ч) тепловой мощности в электрическом эквиваленте. Из числа этих реакторов 10 использовались для целей опреснения (48,01 ГВт·ч вырабатываемой мощности), 56 — для централизованного теплоснабжения (1870,6 ГВт·ч) и 32 — для выработки тепла для технологических нужд (1248,01 ГВт·ч).

24. В Российской Федерации в эксплуатации находятся два реактора на быстрых нейтронах. На 3-м блоке Белоярской АЭС, имеющем мощность нетто 560 МВт (эл.), с момента его подключения к энергосистеме в 1980 году было произведено 140 777 ГВт·ч электроэнергии. На 4-м блоке Белоярской АЭС, имеющем мощность нетто 820 МВт (эл.), с момента начала его коммерческой эксплуатации в 2016 году было произведено 13 066 ГВт·ч электроэнергии.

25. В Африке компания «Эском», оператор АЭС «Куберг» в ЮАР, приступила к ремонтным работам на своих реакторах с целью продления сроков их эксплуатации минимум на 20 лет.

26. В Азии началось комбинированное производство тепла и электроэнергии на двух реакторах типа AP1000, недавно введенных в эксплуатацию в Китае. На Тайване, Китай, по результатам состоявшегося в ноябре 2018 года референдума были приняты изменения в законодательство, снимающие требование о том, что в 2025 году эксплуатация всех АЭС там должна быть прекращена. В Индии после замены канала теплоносителя и входных труб первого контура была возобновлена работа АЭС «Какрапар».

27. В Японии основное внимание по-прежнему уделяется восстановительным мероприятиям на площадке АЭС «Фукусима-дайти», а также возобновлению эксплуатации недействующих АЭС. Возобновлена эксплуатация девяти реакторов (все из них типа PWR), остановленных после аварии на АЭС «Фукусима-дайти». Признавая приоритет соображений безопасности, в Стратегическом энергетическом плане 2018 года предусматривается развитие ядерной энергетики как важного источника постоянной электроэнергии для достижения «оптимальной структуры энергопроизводства» к 2030 году и одного из средств декарбонизации к 2050 году.

28. Что касается Европы, Франция отложила на 10 лет запланированное сокращение своего парка АЭС и приступила к работам по модернизации и обслуживанию 1-го блока АЭС «Трикастин» мощностью 900 МВт, которые позволят обеспечить его эксплуатацию на протяжении еще одного десятилетия. В то же время, в опубликованном в начале 2019 года многолетнем энергетическом плане крайним сроком для сокращения доли атомной энергии в структуре производства электроэнергии в стране до 50% установлен 2035 год. Для достижения этой цели будут остановлены 14 реакторов, что приведет к снижению суммарной мощности генерации на 12 600 МВт (эл.). В Бельгии были завершены работы по ремонту бетонных

конструкций на АЭС «Дул», а в Румынии продолжались работы в рамках программы модернизации АЭС «Чернаводэ». В Швеции было одобрено продление срока эксплуатации 1-го и 2-го блоков АЭС «Форсмарк», в то время как в Украине осуществлялся проект по продлению на 10 лет срока эксплуатации 3-го блока Южно-Украинской АЭС.

29. В Латинской Америке была на 1,33% увеличена мощность и на 30 лет продлен срок эксплуатации АЭС «Эмбальсе» в Аргентине.

30. В Северной Америке значительные инвестиции в проекты по продлению срока эксплуатации сделала Канада, где в 2020 году должна быть возобновлена эксплуатация 2-го блока АЭС «Дарлингтон». В Соединенных Штатах Америки у большинства существующих энергоблоков срок эксплуатации продлен до 60 лет. Комиссия по ядерному регулированию (КЯР) одобрила заявку компании «Флорида пауэр энд лайт» на продление эксплуатации 3-го и 4-го энергоблоков АЭС «Тёрки-Пойнт» еще на 20 лет. Это первый случай, когда в результате возобновления лицензии КЯР было разрешено продление срока эксплуатации энергоблоков с 60 до 80 лет.

31. Надежность АЭС неизменно повышается. На рис. А-4 показано количество внеплановых остановов в ручном режиме и аварийных остановов в автоматическом режиме на каждые 7000 часов (приблизительно один год) эксплуатации в расчете на энергоблок.

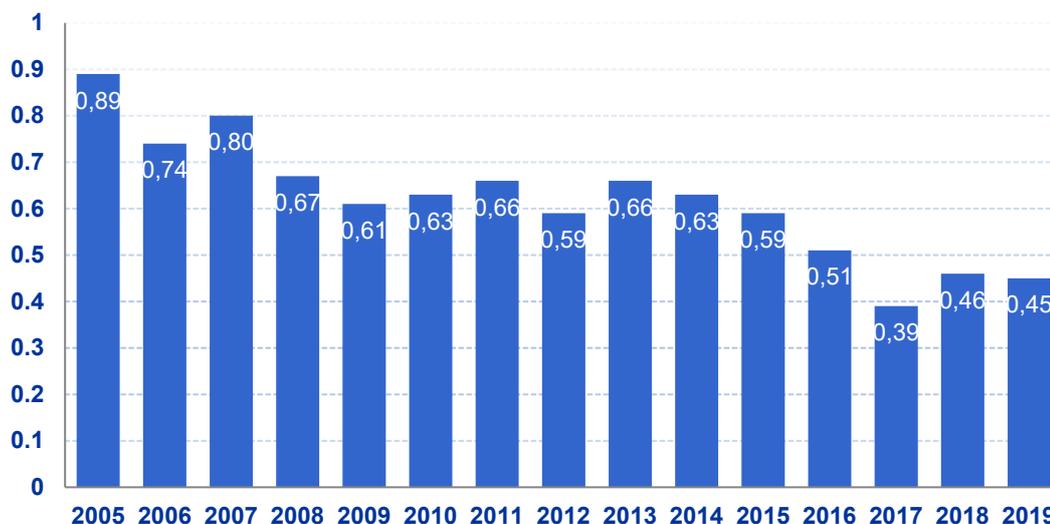


РИС. А-4. Средняя норма аварийных остановов: количество внеплановых остановов в автоматическом и в ручном режиме на каждые 7000 часов эксплуатации энергоблока.

(Источник: Информационная система по энергетическим реакторам МАГАТЭ

<http://www.iaea.org/pris>)

А.1.2. Новые проекты в рамках существующих ядерно-энергетических программ

32. Из 30 государств-членов, эксплуатирующих АЭС, 15 ведут активные работы по строительству новых энергоблоков. Эти работы охватывают 45 проектов сооружения реакторов, общая мощностью нетто которых составит 46 567 МВт (эл.). На рис. А-5 приведено сопоставление стран с учетом количества энергоблоков на этапе строительства и их общей мощности нетто.



Рис. А-5. Пятнадцать государств-членов, имеющих действующие ядерно-энергетические программы, ведут сооружение новых энергоблоков

33. В 2019 году Китай подключил к энергосети второй реактор типа EPR («Тайшань-2»), а также реактор типа APRC-1000 («Янцзян-6»), в результате чего общее количество находящихся в эксплуатации ядерных энергоблоков в стране возросло до 48. Вместе с четырьмя действующими энергоблоками в Тайване суммарная мощность ядерной электрогенерации в Китае достигла 49 362 МВт (эл.). В то же время, Финляндия и Франция объявили о планах по подключению к энергосети своих новых реакторов типа EPR соответственно в июле 2020 года и в конце 2022 года. В Соединенном Королевстве произведена заливка первого бетона в фундаменты зданий АЭС «Хинкли-Пойнт С».

34. В июне 2019 года в Российской Федерации концерн «Росэнергоатом» получил лицензию на эксплуатацию до 2029 года плавучего энергоблока «Академик Ломоносов», а в декабре его реакторы были подключены к энергосети. (Более подробная информация приведена в пункте 152).

35. Как ожидается, в Индии, где на стадии эксплуатации находится 22 реактора, а на стадии сооружения — семь реакторов, к 2031 году будет введен в эксплуатацию еще 21 ядерный энергетический реактор с суммарной генерирующей мощностью 15 700 МВт (эл.).

А.1.3. Страны, приступающие к развитию ядерной энергетики

36. Из 28 государств-членов, выразивших заинтересованность в развитии ядерной энергетики, 18 начали исследования в области ядерно-энергетической инфраструктуры; четыре уже приняли соответствующее решение и в целях подготовки к заключению контракта и привлечения финансирования для сооружения АЭС создают институциональный потенциал и развивают необходимую инфраструктуру; одно государство (Египет) подписало контракт и готовится к началу строительства, два государства (Бангладеш и Турция) приступили к строительству, и еще два (Беларусь и ОАЭ) находятся на завершающем этапе строительства своих первых АЭС.

37. В Объединенных Арабских Эмиратах (ОАЭ) практически завершено сооружение четырех энергоблоков АЭС «Барака» и ожидается выдача лицензии на эксплуатацию первых двух энергоблоков. На четвертый квартал 2020 года запланирована загрузка топлива на 1-м энергоблоке, а год спустя— на 2-м энергоблоке. В сентябре 2019 года была проведена повторная миссия по оценке аварийной готовности (ЭПРЕВ).

38. В Беларуси продолжается строительство первой АЭС в Островце. На первый квартал 2020 года запланирована загрузка топлива на первом энергоблоке, в связи с чем ожидается получение разрешения от регулирующего органа, а в 2021 году планируется ввод в эксплуатацию второго энергоблока. В августе 2019 году Беларусь приняла у себя миссию Консультативной службы МАГАТЭ по государственным системам учета и контроля ядерных материалов (ИССАС) и миссию Группы по оценке предэксплуатационной безопасности (пред-ОСАРТ), а также запросила проведение в феврале 2020 года миссии по Комплексному рассмотрению ядерной инфраструктуры (ИНИР) третьего этапа.

39. В Бангладеш продолжается строительство АЭС «Руппур», при этом ввод в эксплуатацию первого и второго энергоблоков ожидается соответственно в 2023 и 2024 году. Производится обследование площадки для проекта сооружения второй АЭС. В 2020 году планируется проведение миссии в рамках услуг по комплексной оценке деятельности органа регулирования (ИРРС). В 2021 году планируется проведение миссий Международной консультативной службы по физической защите (ИППАС) и ИССАС.

40. В Турции продолжаются строительные работы на первом блоке АЭС «Аккую», ввод которого в эксплуатацию ожидается в 2023 году; в отношении второго блока была выдана лицензия на строительство. На 2020 год запланирована миссия ИППАС, а в 2021 году предусматривается проведение миссии ИРРС.

41. В Египте, после одобрения в марте 2019 года лицензии на площадку для строительства четырехблочной АЭС в Эль-Дабаа, в середине 2020 года, если будет получено разрешение регулирующего органа, планируется начало строительных работ. В 2026 году предполагается завершить работы по вводу в эксплуатацию первого блока, а к 2028 году — остальных блоков. В январе 2019 года Египет принял у себя миссию по вопросам проектирования площадки с учетом внешних событий (СЕЕД), а в октябре-ноябре 2019 года — миссию ИНИР второго этапа.

42. В Саудовской Аравии продолжаются подготовительные работы для одновременного строительства одного малого модульного реактора (ММР) и двух крупномасштабных АЭС. Проводится оценка характеристик площадок для строительства крупномасштабных АЭС. Как ожидается, в 2032 году начнется сооружение системно-интегрированного модульного усовершенствованного реактора (SMART), в 2028 году планируется ввести его в эксплуатацию.

43. В Иордании продолжаются работы по оценке технологий для выбора соответствующих ММР. АЭС мощностью 200–400 МВт (эл.) на основе выбранной технологии ММР должна быть введена в эксплуатацию к 2030 году. В более долгосрочной перспективе (после 2030 года) предполагается строительство крупной АЭС.

44. В Нигерии планируется строительства четырех энергоблоков, при этом в 2027 году официально предполагается начать эксплуатацию первого энергоблока. Решение о возобновлении проведения предварительного технико-экономического обоснования до завершения работ по подготовке технико-экономического обоснования может привести к продлению запланированных сроков.

45. В Польше, после проведения общественных консультаций, в 2020 году ожидается принятие решение о дальнейшем развитии ядерно-энергетической программы и строительстве АЭС. В 2033 году предполагается ввод в эксплуатацию первого энергоблока.

46. Государства-члены продолжают получать помощь, которую Агентство оказывает в целях понимания обязательств и обязанностей, касающихся развития необходимой инфраструктуры для ядерно-энергетической программы на основе вехового подхода, который призван поддержать процесс подготовки и утверждения безопасных, надежных и устойчивых ядерно-энергетических программ.

В 2019 году в рамках национальных проектов технического сотрудничества были обновлены комплексные планы работы и обзорная информация о ядерной инфраструктуре страны в отношении восьми государств-членов: Саудовской Аравии (январь), Турции (январь), Иордании (февраль), Беларуси (март), Польши (март), Филиппин (ноябрь), Кении (декабрь) и Бангладеш (декабрь). С учетом проведенной в 2019 миссии ИНИР второго этапа в Египте и повторной миссии ИНИР первого этапа в Гане, число миссий ИНИР, организованных начиная с 2009 года, достигло 29 в 21 государстве-члене. Кроме того, в 31 межрегиональном учебном мероприятии, организованном в рамках проекта технического сотрудничества INT2018 «Поддержка принятия обоснованных решений и создания потенциала для начала разработки и реализации ядерно-энергетических программ», приняли участие порядка 490 слушателей из 52 стран, приступающих к реализации или расширению своих ядерно-энергетических программ (рис. А-6).



РИС. А-6. Комплексная поддержка МАГАТЭ новых ядерно-энергетических программ способствует созданию базы для первой АЭС посредством проведения миссий по независимой экспертизе, специально разработанных мероприятий для устранения выявленных пробелов и создания потенциала.

А.2. Прогнозы развития ядерной энергетики

47. Прогнозы Агентства на 2019 год (рис. А-7), подготовленные в консультации с региональными экспертами и отражающие последнюю информацию о политике и рыночной конъюнктуре, содержат комбинированную оценку вклада ядерной энергетики в мировую генерацию на будущие периоды в зависимости от того, будут ли введены в действие новые

значительные мощности для компенсации возможного вывода некоторых реакторов из эксплуатации. Согласно низкому прогнозу на период до 2030 года установленная мощность нетто производства электроэнергии на АЭС сначала будет постепенно снижаться, а затем к 2050 году вернется к уровню 371 ГВт (эл.). Согласно высокому прогнозу к 2030 году мощность возрастет до 496 ГВт (эл.) и к 2050 году — до 715 ГВт (эл.). Эти цифры представляет собой увеличение на 25% по сравнению с текущими уровнями к 2030 году и увеличение на 80% к 2050 году. К середине века доля ядерной энергетики в общемировой электрической мощности составит порядка 6% для низкого прогноза и 12% для высокого прогноза, по сравнению с достигнутым на сегодняшний момент значением порядка 10%.

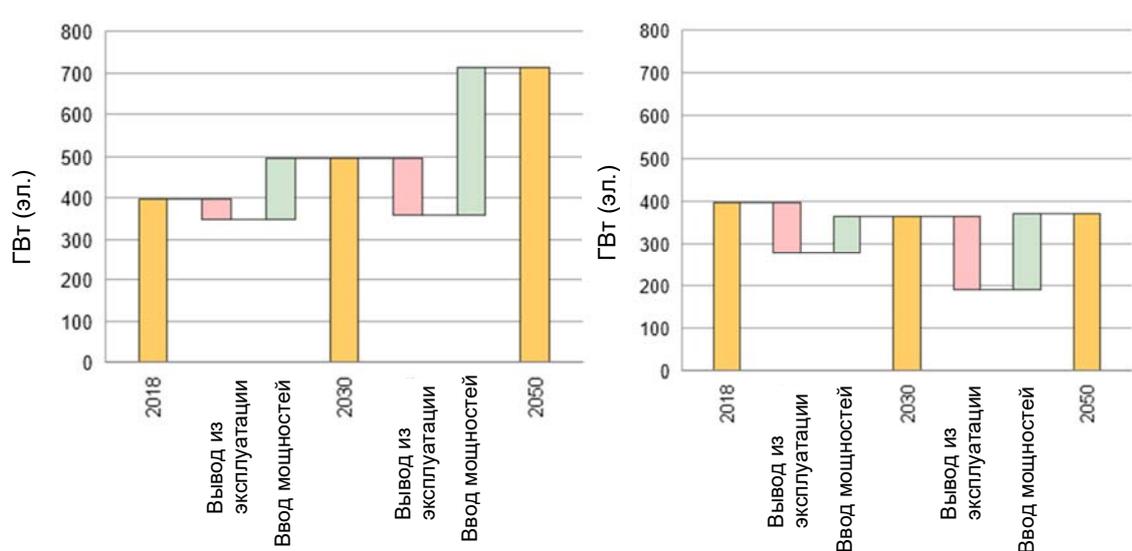


РИС. А-7. Высокий (слева) и низкий (справа) прогнозы общемировой мощности ядерной энергетики. (Источник: *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050, IAEA Reference Data Series No. 1, 2018*)

48. Большая разница между прогнозами обусловлена неопределенностью, связанной с заменой большого числа реакторов, вывод которых из эксплуатации запланирован на период до 2030 года и позднее, в особенности в Северной Америке и Европе. В то же время, прогнозы на 2019 год по сравнению с предыдущими периодами содержат меньше факторов неопределенности ввиду последних заявлений о перспективах существующего парка АЭС в некоторых регионах и о долгосрочных планах по его расширению. Для компенсации возможного вывода некоторых реакторов из эксплуатации в силу их возраста, конкурентоспособности или прочих факторов может возникнуть потребность в значительных новых мощностях.

49. Наряду с другими низкоуглеродными технологиями ядерная энергетика может удовлетворить растущий спрос на электроэнергию и неэлектрические применения энергии на период до 2050 года в рамках концепции перехода к устойчивой энергетике. В целом, в 90% сценариев смягчения последствий изменения климата, предполагающих жесткие ограничения, заложена более высокая доля ядерной генерации в 2050 году, чем в последнем низком прогнозе Агентства, при этом в 60% сценариев превышены даже оценки, соответствующие высокому прогнозу Агентства.

Подготовленные Межправительственной группой экспертов по изменению климата и Международным энергетическим агентством, а также различными правительственными, отраслевыми и неправительственными организациями глобальные энергетические сценарии предполагают увеличение роли ядерной энергетики в смягчении последствий изменения климата для достижения целей Парижского соглашения. Этот факт был также отмечен в выводах [Международной конференции по изменению климата и роли ядерной энергетики](#), организованной Агентством в сотрудничестве с АЯЭ/ОЭСР в октябре 2019 года в Вене.

50. По сравнению с текущими политическими и рыночными тенденциями, получившими отражение в прогнозах Агентства, а также по сравнению с умеренными показателями смягчения последствий, которые были представлены странами в рамках Парижского соглашения с учетом определяемых на национальном уровне вкладов, эти сценарии иллюстрируют необходимость принятия дополнительных мер для раскрытия существенного потенциала ядерной энергетики в области смягчения последствий изменения климата, благодаря чему могут быть достигнуты амбициозные цели по борьбе с глобальным изменением климата.

А.3. Топливный цикл

А.3.1. Начальная стадия топливного цикла

Ресурсы и производство урана

В 2019 году спотовые цены на уран по-прежнему оставались на низком уровне, как правило, в пределах от 52 до 57 долл. США/кг U. Спотовые цены на уран держатся на относительно неизменном уровне с 2018 года (в диапазоне от 47 до 59 долл. США/кг U) и переживают период спада с 2013 года, что привело к значительному сокращению программ разведки урановых месторождений.

51. Вследствие низких спотовых цен на уран новые проекты по добыче урана, находящиеся как на этапе планирования, так и на этапе разработки, остаются замороженными, а ряд работавших ранее урановых рудников и обогатительных фабрик остаются в законсервированном состоянии. Общемировой объем добычи урана в действующих урановых рудниках в 2019 году прогнозируется на уровне 2018 года, который составил 53 498 тонн урана (т U). По сравнению с 2016 годом это отражает спад общемировой добычи урана примерно на 15%.

52. Крупнейшим в мире производителем урана остается Казахстан. В 2019 году там эксплуатировалось восемь урановых рудников; добыча на всех из них ведется методом подземного выщелачивания и ее совокупный объем прогнозируется на уровне 22 000–23 000 т U (несколько выше, чем зафиксированный в 2018 году объем добычи 21 705 т U). В Канаде — втором крупнейшем производителе урана — в 2019 году производство велось только на месторождении «Сигар-Лейк» и относящейся к нему обогатительном комбинате «МакКлин-Лейк», его прогнозируемый объем составляет около 7000 т U, при этом из-за низких цен на уран два других месторождения и обогатительных комбината остаются

законсервированными на неопределенный срок. В Австралии в 2019 году были свернуты работы по добыче урана на руднике «Рейнджер» (согласно прогнозам, из имеющихся запасов будет произведено еще от 1400 до 1800 т U), так как тот переводится в стадию вывода из эксплуатации и реабилитации территории. Уран в качестве побочного продукта добывается на медном руднике «Олимпик-Дэм» (в 2019 году произведено порядка 3000 т U). На руднике «Фор-Майл» в 2019 году объем добычи урана методом подземного выщелачивания, согласно прогнозам, составит около 1200 т U. Общий прогнозируемый объем производства урана в Австралии в 2019 году находится в пределах 5600–5800 т U (это несколько ниже показателя 2018 года, когда было произведено 6517 т U, так как производство на руднике «Рейнджер» было сокращено).

53. В Африке имеются действующие урановые рудники в Намибии и Нигере. В Намибии разработаны четыре месторождения урана, два из них эксплуатируются («Рёссинг» и «Хусаб», прогнозируемый объем производства в 2019 году составляет соответственно 2200 и 3028 т U), а два из-за низких цен на уран пребывают в законсервированном состоянии («Лангер-Хайнрих» и «Треккопье»). В то же время, в конце 2019 года было выпущено предварительное технико-экономическое обоснование возможности возобновления в течение 12 месяцев работ на урановом руднике «Лангер-Хайнрих». В Нигере эксплуатируются два урановых рудника: «Сомаир» и «Коминак». Объем добычи на этих рудниках в 2019 году ожидается на том же уровне, что и в 2018 году (1769 т U на руднике «Сомаир» и 1115 т U на руднике «Коминак»). В целом производство урана в Африке в 2019 году прогнозируется на уровне 8100 т U.

54. Государственная политика Китая заключается в обеспечении избыточного запаса урановых ресурсов для устойчивого развития ядерной энергетики в среднесрочной и долгосрочной перспективе. В настоящее время Китай эксплуатирует семь урановых месторождений на своей территории с совокупной мощностью производства 1650 т U. Кроме того, Китай участвует в нескольких зарубежных проектах по разработке полезных ископаемых, главным образом в Казахстане, Намибии и Нигере.

55. Продолжаются работы по технико-экономическому обоснованию извлечения урана из месторождений в центральной части Иордании, при этом в 2019 году на площадке в центральной части Иордании будет введена в эксплуатацию пилотная обогатительная установка (на основе технологии кучного выщелачивания). Кроме того, проводится оценка проекта строительства завода по производству уранового концентрата в Саламанке, Испания.

Конверсия и обогащение

56. Для удовлетворения глобального спроса более чем достаточны существующие мощности по конверсии и обогащению, несмотря на то, что рынок сегментирован, а производство сконцентрировано на нескольких поставщиках. В настоящее время большую часть мирового спроса на гексафторид урана (UF₆) удовлетворяют пять производителей, обладающих проектной мощностью 62 000 т U в год, однако в 2019 году их производственные мощности были загружены лишь на 56% (объем производства примерно 34 500 тонн) (рис. А-8). Мировые поставки обогащенного урана в основном обеспечиваются за счет работы коммерческих обогатительных предприятий, а также вторичных источников, таких как запасы ранее произведенного обогащенного урана или повторное обогащение отвалов. Большая часть обогатительных мощностей сконцентрирована в Европе и в Российской Федерации (компании «Орано», «Уренко» и госкорпорация «Росатом»), хотя Национальная ядерная корпорация Китая (НЯКК) работает на том, чтобы стать отечественным поставщиком обогатительных услуг в Китае, и планирует в будущем предлагать такие услуги на международном рынке.

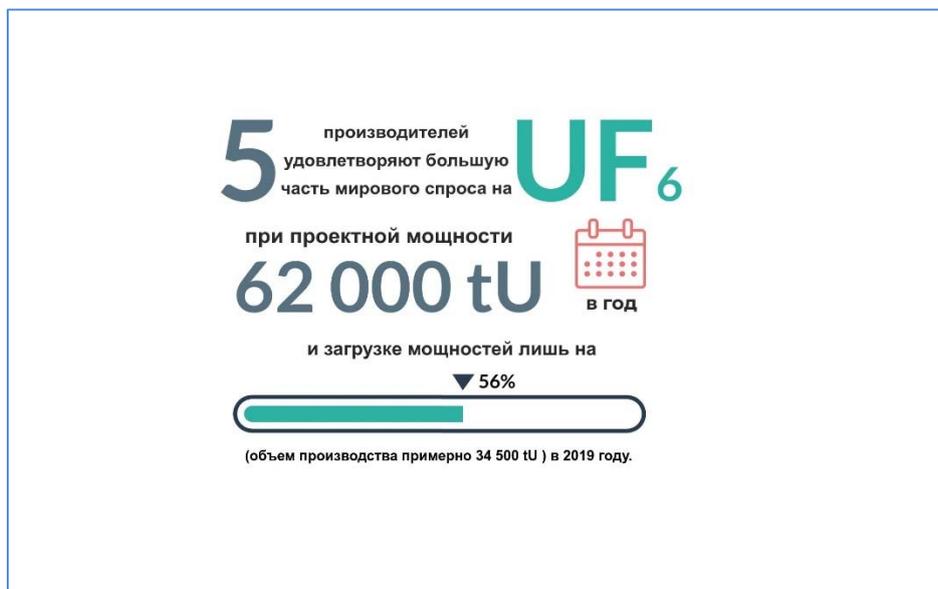


Рис. А-8. Мировые мощности по конверсии и обогащению урана в 2019 году.

Изготовление топлива

57. В целях обеспечения соответствия стратегии Агентства по поставкам Евратома в области диверсификации поставок ядерного топлива Болгарская АЭС «Козлодуй» в феврале 2019 года объявила, что в рамках контракта на сумму 3,1 млн болгарских левов (1,8 млн долл. США) привлекла шведское подразделение компании «Вестингауз электрик» для изучения вариантов лицензирования и интеграции усовершенствованного топлива применительно к двум энергоблокам станции (№ 5 и 6). Чешская энергетическая компания «ЧЭЗ» в апреле 2019 года объявила, что на первом энергоблоке эксплуатируемой ею АЭС «Темелин» произведет загрузку экспериментальной партии из шести тепловыделяющих сборок (ТВС), изготовленных шведским подразделением компании «Вестингауз электрик». Российская топливная компания «ТВЭЛ» (входит в «Росатом») является основным поставщиком ядерного топлива для АЭС «Козлодуй» и АЭС «Темелин» и на регулярной основе поставляет на эти АЭС усовершенствованное топливо более длительного действия (ТВСА-12 и ТВСА-Т.mod.2).

58. Компания «Вестингауз электрик» в феврале 2019 года объявила о выходе нового поколения ТВС собственного производства, которые предназначены для кипящих водяных реакторов (ВВР) (коммерческое обозначение: Triton11, техническое обозначение: 11x11 ВВР) и обеспечивают значительное снижение стоимости топливного цикла и увеличение эксплуатационной надежности и безопасности. Новые тепловыделяющие сборки сначала пройдут испытания на первом и втором энергоблоках АЭС «Олкилуото» в Финляндии, оснащенных реакторами ВВР типа АВВ-III мощностью 900 МВт (эл.).

59. НЯКК завершила в марте 2019 года долговременные облучательные испытания ТВС китайского производства для реакторов PWR и приступила к серийному производству ТВС типа «Чайна фьюэл 3» (изготавливаются на собственном предприятии НЯКК по производству ядерного топлива для PWR, расположенном в Ибине, провинция Сычуань, Китай, на основе топливных таблеток, поставляемых Ульбинским металлургическим заводом, Казахстан) для применения на реакторе PWR отечественной конструкции «Хуалун-1» (HPR1000).

60. Две экспериментальные ТВС с четырьмя различными комбинациями усовершенствованных топливных таблеток (из диоксида урана и уран-молибденового сплава с повышенной плотностью и удельной теплопроводностью) и материалов оболочки (из

хромированного циркония или хромоникелевых сплавов) производства компании «ТВЭЛ» в январе 2019 года были загружены в исследовательский реактор МИР в Научно-исследовательском институте атомных реакторов в Димитровграде, Российская Федерация, и в течение 2019 года проходили их испытания.

61. Компании «Саузерн ньюклар» и «Фраматом» в апреле 2019 года объявили, что во время весеннего останова для перегрузки топлива на втором энергоблоке АЭС «Вогтль» в штате Джорджия, США, были загружены первые устойчивые к авариям ТВС, конструкция которых предусматривает легированные оксидом хрома топливные таблетки и хромированную циркониевую оболочку. Компания «Бэбкок энд Уилкоккс технолоджиз» в октябре 2019 года объявила, что на ее предприятии в Линчберге, штат Виргиния, США, идет процесс перезапуска существующей производственной линии по фабрикации уранового топлива с трехструктурно-изотропическим покрытием.

62. В январе 2019 года компания «ТВЭЛ» подписала с Департаментом атомной энергетики Индии договор на поставку урановых топливных таблеток для реакторов BWR АЭС «Тарапур» (к ноябрю 2019 года было поставлено 50 тонн топливных таблеток). В июле 2019 года компания «ТВЭЛ» подписала с компаниями, входящими в состав НЯКК — «Сунэн ньюклар пауэр корпорейшн» и «Чайна ньюклар энерджи индастри корпорейшн» — контракт на поставку ядерного топлива для седьмого и восьмого энергоблоков АЭС «Тяньвань», расположенной в провинции Цзянсу, Китай. Также в июле 2019 года компания «ТВЭЛ» поставила партию ядерного топлива на китайский экспериментальный быстрый реактор. В августе 2019 года компания «ТВЭЛ» была назначена единственным уполномоченным поставщиком ядерного топлива для обоих блоков АЭС «Руппур» в Бангладеш до конца срока их эксплуатации.

63. В августе 2019 года была получена и загружена в быстрый реактор БН-800 на Белоярской АЭС первая промышленная партия смешанного оксидного топлива, состоящая из 18 ТВС, произведенных на Горно-химическом комбинате в Железногорске, Российская Федерация. В Российской Федерации также проводились реакторные испытания регенерированного смешанного топлива (переработанной смеси урана и плутония) для водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР), а также смешанного нитридного уран-плутониевого топлива для быстрых реакторов.

64. Украинская национальная атомная энергогенерирующая компания «Энергоатом» и компания «Вестингауз» в сентябре 2019 года подписали предварительный контракт на производство «Вестингаузом» ядерного топлива для украинских реакторов ВВЭР-440. В сентябре 2019 года во время планового останова для перегрузки топлива на втором энергоблоке АЭС «Байрон», оператором которой является компания «Экселон», были загружены опытно-испытательные сборки на основе топливных стержней EпCore конструкции компании «Вестингауз», изготовленные в Айдахской национальной лаборатории, США, и состоящие из таблеток высокой плотности ADOPT (разработанные «Вестингаузом» таблетки диоксида урана с добавлением оксидов хрома и алюминия для улучшения экономики топливного цикла) и таблеток из силицида урана (преимуществами которых являются повышение безопасности и оптимизация затрат на топливную кампанию), заключенных в хромированную циркониевую оболочку (в целях обеспечения большей стойкости к окислению и коррозии).

А.3.2. Обеспечение гарантированных поставок

65. В декабре 2010 года Совет управляющих Агентства утвердил создание Банка низкообогащенного урана (НОУ) МАГАТЭ. В 2015 году Агентство и Казахстан завершили работу по подготовке пакета базовых соглашений о создании Банка НОУ МАГАТЭ на площадке Ульбинского металлургического завода в Усть-Каменогорске, Казахстан.

66. Банк НОУ МАГАТЭ в Казахстане (рис. А-9) был учрежден и начал функционировать 17 октября 2019 года, когда в рамках договора поставки с «Орано Сикль» были получены и помещены на хранение на Склад НОУ МАГАТЭ 32 полных цилиндра типа 30В. Помимо этого, 10 декабря 2019 года в рамках договора поставки с «Казатомпромом» были получены еще 28 полных цилиндров типа 30В.



*РИС. А-9. Контейнеры с НОУ на фоне Склада НОУ МАГАТЭ в Казахстане.
(Фото: Министерство иностранных дел Казахстана)*

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

А.3.3. Конечная стадия топливного цикла

Перевозка отработавшего топлива

68. В Соединенных Штатах в августе 2019 года прошел сертификацию в Комиссии по ядерному регулированию (КЯР) разработанный компанией «Холтек интернэшнл» транспортно-упаковочный комплект типа HI-STAR 100MB. Он представляет собой усовершенствование конструкции предыдущей модели в целях возможности перевозки топлива с большей глубиной выгорания и меньшим временем расхолаживания, по сравнению с его предшественником. В мае 2019 года, после приостановки операций в августе 2018 года, была возобновлена перевозка отработавшего топлива из хранилища на АЭС «Сан-Онофре». КЯР одобрила возобновление операций после завершения расследования инцидента, произошедшего при помещении в сухое хранилище контейнера с отработавшим топливом.

69. В августе правительство Беларуси официально утвердило стратегию обращения с отработавшим топливом для новой АЭС. Стратегией предусматривается отправка отработавшего топлива с АЭС в Российскую Федерацию для переработки и возвращение радиоактивных отходов для захоронения в Беларуси.

70. В Российской Федерации были начаты работы по вывозу поврежденных отработавших ТВС с плавучей технической базы «Лепсе» на судоремонтном заводе «Нерпа» в Мурманске. В конечном итоге, в рамках программы, контролируемой Европейским банком реконструкции и развития (ЕБРР), отработавшее топливо будет доставлено на завод производственного объединения «Маяк» для переработки.

Хранение отработавшего топлива

71. На сегодняшний день из АЭС было выгружено около 400 000 тонн тяжелого металла в виде отработавшего ядерного топлива, и около 30% этого объема подверглось переработке. Оставшаяся часть хранится в бассейнах реакторов и во вне реакторных хранилищах

отработавшего ядерного топлива, которых насчитывается 151 в 27 странах. В 2019 году более 6630 отработавших ТВС РБМК-1000 с Ленинградской и Курской АЭС были перевезены и помещены в сухие хранилища на Горно-химическом комбинат.

72. В Японии в феврале были опубликованы фотографии обломков топлива, находящихся внутри первичной защитной оболочки второго энергоблока АЭС «Фукусима-дайти». После обследования путем фотографирования было проведено дальнейшее обследование с помощью робота-манипулятора с дистанционным управлением; он смог взять образцы обломков из пяти мест для последующего определения их характеристик и анализа. После расчистки центрального зала реакторного здания от мусора, образовавшегося в результате аварии, в апреле 2019 года были начаты работы по удалению 566 отработавших ТВС из бассейна выдержки третьего энергоблока АЭС «Фукусима-дайти». Эти ТВС будут перемещены в бассейн находящегося на площадке общестанционного хранилища.

73. В Соединенном Королевстве началась реализация пятилетней программы по переупаковке содержащих плутоний контейнеров старого образца, хранящихся на площадке в Селлафилде — в августе 2019 года там был расчехлен и помещен в современную, более прочную внешнюю оболочку первый такой контейнер. Были завершены работы по удалению топлива из реакторов типа «Магнокс»: в сентябре были вывезены последние партии отработавшего топлива с площадок АЭС в Уильфе и Колдер-Холле. Отработавшее топливо было доставлено на площадку в Селлафилде для хранения до того времени, как оно поступит на переработку. Завершена половина объема работ, ведущихся на реакторе на быстрых нейтронах в Дунрее в целях удаления остающихся воспроизводящих элементов. Для удаления заклинивших элементов, оставленных на своем месте после останова реактора в 1977 году, потребовалось применение специализированных инструментальных средств с дистанционным управлением.

74. В Украине в сентябре 2019 года был завершен этап предпусковых наладочных работ на промежуточном хранилище отработавшего ядерного топлива (предназначенном для подготовки и хранения отработавшего топлива с 1-го, 2-го и 3-го энергоблоков Чернобыльской АЭС); после получения оператором (Чернобыльской АЭС) отдельного разрешения на эксплуатацию оно будет формально введено в эксплуатацию в полном объеме.

Переработка отработавшего топлива

75. Со времени закрытия установки термально-оксидной переработки в Соединенном Королевстве мировая мощность переработки отработавшего топлива с коммерческих реакторов составляет примерно 4000 тонн в год (после того, как будет в полном объеме возобновлена эксплуатация перерабатывающего завода в Рокассё, эта цифра может увеличиться).

А.4. Вывод из эксплуатации, восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами

А.4.1. Вывод из эксплуатации ядерных установок

76. По состоянию на 31 декабря 2019 года в мире были окончательно остановлены либо выводятся из эксплуатации 186 ядерных энергетических реакторов. Из них 17 реакторов были полностью выведены из эксплуатации, и еще ряд реакторов находятся на конечных этапах вывода из эксплуатации. Окончательно остановлены либо выводятся из эксплуатации свыше 150 установок ядерного топливного цикла; полностью выведены из эксплуатации почти 130 установок (рис. А-10).

Энергетические реакторы



остановлено или выводится из эксплуатации



полностью выведено из эксплуатации

Установки топливного цикла



окончательно остановлено или выводится из эксплуатации



выведено из эксплуатации

РИС. А-10. Положение дел в мире в 2019 году в области вывода из эксплуатации.

77. По состоянию на 31 декабря 2019 года были полностью остановлены более 560 исследовательских реакторов и критических сборок, из которых полностью выведены из эксплуатации около 440; работы по выводу из эксплуатации активно ведутся на почти 70 исследовательских реакторах, а около 60 исследовательских реакторов, ожидающих вывода из эксплуатации, переведены в режим окончательного останова.

78. В сентябре 2019 года Объединенный исследовательский центр Европейской комиссии подписал соглашение о демонтаже исследовательского реактора «ИСПРА-1» с итальянской государственной компанией «Согин», которая отвечает за вывод из эксплуатации и обращение с радиоактивными отходами.

79. Благодаря внедрению хорошо отработанных технологий и НИОКР в области вывода из эксплуатации достигаются постоянные усовершенствования, в основном в странах с развитыми ядерно-энергетическими программами. В качестве примера эффективного использования инновационных методов работы можно упомянуть самоподъемную платформу, предназначенную для работ по демонтажу вентиляционной трубы устаревшей установки по переработке на площадке в Селлафилде (рис. А-11).

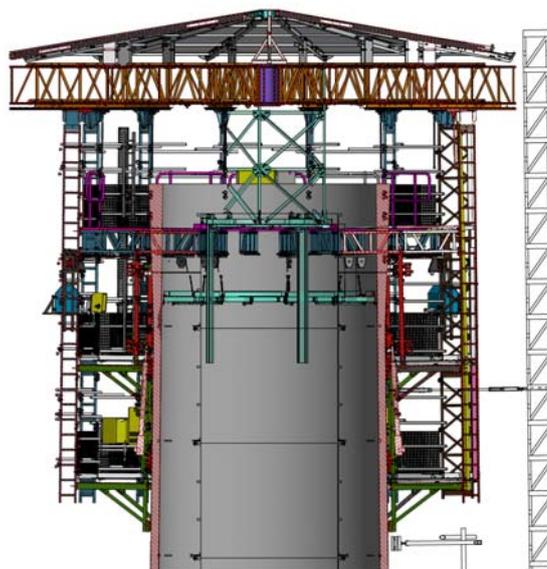


РИС. А-11. Самоподъемная платформа, предназначенная для работ по демонтажу вентиляционной трубы устаревшей установки по переработке на площадке в Селлафилде. (Фото: «Селлафилд, лтд»)

80. В Болгарии, Литве, Словакии и на Украине благодаря поддержке со стороны Европейского банка реконструкции и развития по-прежнему наблюдается прогресс в осуществлении проектов по выводу АЭС из эксплуатации. В качестве примеров можно упомянуть работы по перемещению парогенераторов из реакторного зала АЭС «Богунце V-1» в машинный зал с целью их последующей разборки (рис. А-12), а также запуск на Игналинской АЭС проекта по демонтажу реактора РБМК и созданию хранилища для графитовой кладки.



РИС. А-12. Удаление последнего из 12 парогенераторов весом 145 тонн на выведенной из эксплуатации АЭС «Богунце V-1» в Словакии. (Фото: «Ядро́ва а вираде́вация сполчностъ»)

81. В середине июня 2019 получил одобрение Европейской Комиссии и начал осуществляться предложенный несколькими странами — членами Европейского Союза проект SHARE, название которого расшифровывается как «Анализ исследовательских данных по выводу из эксплуатации силами заинтересованных сторон». Проектом SHARE предусматривается создание к концу 2021 года разветвленной «дорожной карты» исследований в технических и нетехнических областях, что позволит заложить основу для совместных усилий заинтересованных сторон по повышению безопасности, сокращению затрат и минимизации воздействия на окружающую среду при выводе ядерных установок из эксплуатации.

82. Японским агентством по атомной энергии (ЯААЭ) была опубликована «дорожная карта» работ на конечной стадии ядерного топливного цикла, которая отражает долгосрочную политику ЯААЭ в области вывода подведомственных установок из эксплуатации и переработки и захоронения соответствующих радиоактивных отходов. В 2020 года она пройдет экспертизу в рамках комплексного рассмотрения программ обращения с радиоактивными отходами и отработавшим топливом, вывода из эксплуатации и восстановления окружающей среды (АРТЕМИС).

83. В сентябре 2019 года Корпорация по содействию возмещению ядерного ущерба и выводу из эксплуатации Японии опубликовала Техничко-стратегический план на 2019 год по выводу из эксплуатации атомной электростанции «Фукусима-дайти», оператором которой является Токийская электроэнергетическая компания, содержащий рекомендации по определению способов извлечения обломков топлива из помещений второго блока — первого из блоков станции, на котором будут проводить работы по удалению обломков. Продолжается работа по выводу из эксплуатации площадки АЭС «Фукусима-дайти», включая проведение внутреннего обследования второго блока и удаление топлива из бассейна выдержки отработавшего топлива в третьем блоке.

А.4.2. Восстановление окружающей среды

84. Компанией «Магнокс», производящей работы на площадке бывшей станции обработки жидких сбросов, расположенной в Харуэлле, Соединенное Королевство (рис. А-13), достигнут значительный прогресс в выполнении восстановительных мероприятий на этой площадке. Работы на этой площадке площадью 4,2 гектара были начаты в феврале 2018 года, а к концу октября 2019 года было успешно извлечено, проанализировано и отправлено по соответствующим маршрутам для захоронения за пределами площадки 54 000 тонн отходов демонтажа строительных конструкций. Все вынутые в ходе работ отходы упаковываются в крупногабаритные мешки объемом 0,9 куб. м, затем все мешки подвергаются анализу методом гамма-спектрометрии высокого разрешения. Завершение восстановительных мероприятий прогнозируется к лету 2020 года, после чего в 2021 году начнутся работы по выводу из-под регулирующего контроля и приведению площадки в прежний вид. После их завершения площадка будет передана обратно земельному собственнику для повторного использования в рамках строительства части объектов кампуса «Харуэлл».

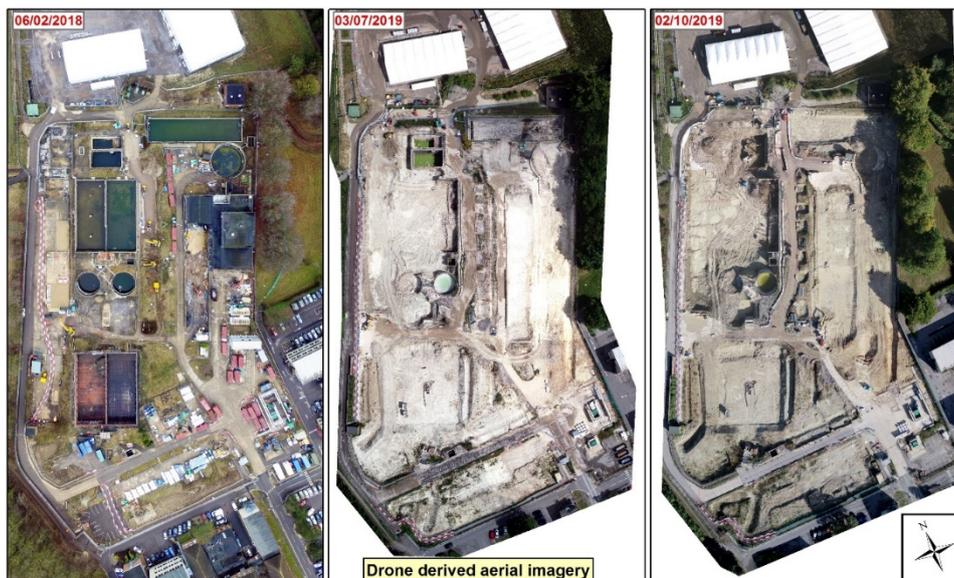


РИС. А-13. Аэросъемка с помощью БПЛА позволяет проследить прогресс в выполнении восстановительных мероприятий на площадке бывшей станции обработки жидких сбросов, расположенной в Харуэлле, Соединенное Королевство. (Фото: «Магнокс лтд»)

85. В феврале 2019 года компания «Энерджи рिसорсез оф Острэлиа», оператор уранового рудника «Рейнджер» (рис. А-14), завершила подготовку технико-экономического обоснования закрытия рудника «Рейнджер», в котором приводится детальный график работ по рекультивации и смета связанных с ними затрат, оцениваемых в 830 млн австралийских долларов. С 2012 года проводится постепенная рекультивация территории рудника; к настоящему времени ее важными рубежами можно считать засыпку карьера № 1 хвостами и пустой породой, вывод из эксплуатации штольни для подземных разведочных работ, выемку хвостов из хвостохранилища в карьер № 3, сооружение и ввод в работу концентратора соли для очистки технической воды, а также начало работ по восстановлению растительного покрова. На основании действующих разрешительных документов деятельность по добыче и переработке должна быть прекращена к январю 2021 года, а окончательная рекультивация территории — завершена к январю 2026 года. Основной целью рекультивации является приведение экосистемы площадки в соответствие с окружающей природной средой, с тем чтобы она могла быть впоследствии включена в состав национального парка «Какаду».



*РИС. А-14. Площадка уранового рудника «Рейнджер».
(Фото: «Энерджи рисорсез оф Острэлиа»)*

86. В Соединенных Штатах Америки Агентством по охране окружающей среды практически завершены мероприятия по восстановлению центрального объекта площадки «Миссисипи фосфейтс корпорейшн». Над Западным отвалом фосфогипса была сооружена уникальная система укрытия, которая охватывает площадь порядка 235 акров и обошлась приблизительно в 72 млн долл. США. В основе системы укрытия лежит применение линейного полиэтиленового материала низкой плотности, который ограничит просачивание дождевых вод и снизит скорость вымывания из отвала радиоактивных и химических загрязняющих веществ. Система укрытия обеспечивает возможность консервации площадки, снижая риски для населения и окружающей среды. На этой площадке располагалось производство удобрений на основе диаммония фосфата, которое было начато еще в 1950-х годах. В 2014 году в связи с банкротством компании оно было прекращено, в результате чего на объекте остались более 700 млн галлонов загрязненных кислотных вод и два отвала, содержащих фосфогипсовые отходы. Отвал представляет собой насыпь, сформированную из фосфогипсового шлама и природного гипса.

87. В декабре 2019 года Италия добилась значительного прогресса в реабилитации площадки в исследовательском центре Трисайя, завершив демонтаж железобетонной конструкции, содержащей радиоактивные отходы. Построенное в конце 1960-х годов вертикальное сооружение в форме призмы располагалось на глубине 6,5 метров под землей, его масса составляла около 130 тонн, а объем — 54 кубических метра.

88. В 2019 году был завешен проект по выводу из эксплуатации водоема-охладителя Чернобыльской АЭС. Старт этому проекту был дан в 2014 году после завершения ряда радиологических и экологических исследований и подготовки технико-экономического обоснования и оценки воздействия на окружающую среду при участии Агентства. По результатам этих исследований было рекомендовано прекратить подачу воды в водоем-охладитель, что приведет к снижению уровня воды в нем. Было рекомендовано также в процессе снижения уровня воды проводить радиационно-экологический мониторинг в целях непрерывного обеспечения безопасности населения и окружающей среды. Данные мониторинга подтвердили, что экологические изменения и перераспределение радиоактивных загрязнителей в целом происходит в соответствии с прогнозами, заложенными в технико-экономическом обосновании. Вывод из эксплуатации позволил значительно сократить эксплуатационные затраты, связанные с обслуживанием водоема-охладителя, и снизить риски затопления прилегающей территории. С каждым годом экологическое состояние площадки АЭС продолжает улучшаться, а за счет ограничений, введенных в действие в зоне отчуждения, поддерживаются требования в области охраны здоровья и безопасности (рис. А-15).

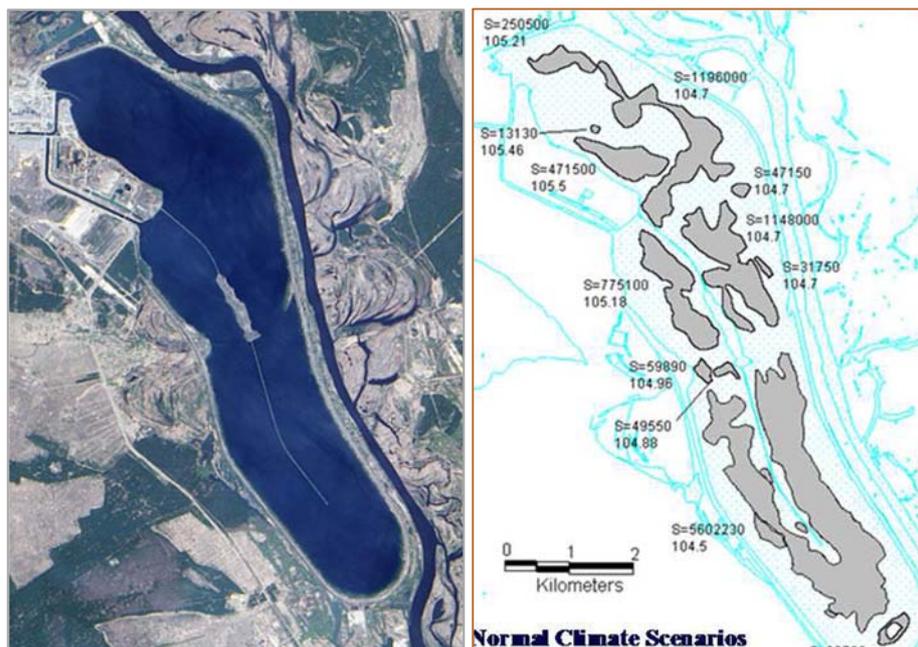


РИС. А-15. Слева: Аэроснимок водоема-охладителя ЧАЭС до его вывода из эксплуатации. Справа: Компьютерное моделирование водных объектов, остающихся после вывода из эксплуатации. (Фото: ГСП ЧАЭС)

А.4.3. Обращение с радиоактивными отходами

Обращение с изъятыми из употребления закрытыми радиоактивными источниками

В настоящее время активно рассматриваются различные варианты обращения с изъятыми из употребления закрытыми источниками (ИЗРИ), включая совместное захоронение с другими отходами в подходящих для этого пунктах. В нескольких странах, включая Гану и Малайзию, продвигаются работы по проектам скважинного захоронения. В июле 2019 года регулирующий орган выдал Малазийскому ядерному агентству лицензию на осуществление в Малайзии проекта скважинного захоронения.

89. В рамках подготовки к скважинному захоронению в июне 2019 года был принят к эксплуатации и в сентябре 2019 года отправлен в Малайзию комплект мобильного инструментария для кондиционирования ИЗРИ низких категорий опасности (категории 3–5). В начале 2020 года ожидается производство первых работ по бурению скважин.

90. В 2019 году в Гане было успешно завершена характеристика и кондиционирование ИЗРИ категорий 3–5, которые были доставлены в централизованное хранилище в ожидании помещения в систему скважинного захоронения на площадке, контролируемой Комиссией по атомной энергии Ганы.

91. В 2019 году был осуществлен ряд успешных операций по удалению ИЗРИ из установок пользователей и постановке их на хранение в надлежащих и безопасных условиях. Из Северной Македонии был удален последний остающийся ИЗРИ категории 1, а из Албании — два ИЗРИ, категорий 1 и 2.

92. Началось удаление источников категорий 1 и 2 в ряде других государств-членов, в том числе в Хорватии, на Кипре, в Иордании, Непале, Никарагуа, Словении и Тунисе.

93. На Кюрасао завершены работы по кондиционированию ИЗРИ, а местный персонал прошел соответствующее аудиторное и практическое обучение по обращению с ИЗРИ.

94. На Гренаде, Гаити, в Папуа-Новой Гвинее и Сент-Винсенте и Гренадинах, а также на Кюрасао была проведена первичная или повторная инвентаризация национальных запасов ИЗРИ, а также используемых закрытых источников.

95. В рамках национальных или региональных учебных мероприятий несколько государств-членов, в том числе Барбадос, Гайана, Кения и Малайзия увеличили свой потенциал в области розыска и возврата бесхозных источников.

96. Благодаря вкладу государств-членов и внутренних заинтересованных сторон производится масштабное обновление программного обеспечения для Международного каталога закрытых радиоактивных источников и устройств. В 2019 году проводилась работа по внесению в каталог дополнительных сведений об источниках и устройствах.

Операции перед захоронением

97. В ноябре 2019 года была выполнена задача проекта по усовершенствованной переработке смешанных отходов (АМВТР), осуществлявшегося в Айдахской национальной лаборатории (АНЛ) министерства энергетики США. Начатый еще в 2003 году, этот проект позволил подготовить к захоронению на экспериментальном комплексе по изоляции отходов (WIPP) в штате Нью-Мексико, США, более 65 000 куб. м трансурановых среднеактивных отходов (САО). В целях обработки САО, происходящих из АНЛ и 15 других объектов министерства энергетики, в проекте АМВТР комбинировались традиционные и высокотехнологичные методы извлечения, характеристики и обработки отходов, в том числе с применением робототехники.

98. В июле 2019 года на заводе по переработке жидких радиоактивных отходов Чернобыльской АЭС были начаты работы по цементированию отходов. По состоянию на сентябрь 2019 года подготовлены к захоронению 120 емкостей, содержащих переработанные отходы. При выходе на проектную мощность завод способен производить в сутки 42 емкости с отходами, представляющие собой 200-литровые бочки. Первые 120 бочек были отправлены на захоронение в хранилище комплекса производств «Вектор».

99. В Финляндии в сентябре 2019 года прошла церемония закладки первого камня завода по герметизации отработавшего ядерного топлива и начались строительные работы. На этом заводе по герметизации отработавшее ядерное топливо будет подготавливаться к окончательному захоронению. Завод по герметизации является ключевым этапом осуществления финской программы в области захоронения отходов и будет связан со строящимся в Олкилуото, Финляндия, пунктом геологического захоронения (рис. А-16).



РИС. А-16. Строительство завода по герметизации отработавшего ядерного топлива компании «Посива». (Фото: «Посива»)

100. В Грузии предложена площадка для размещения промежуточного хранилища и предприятия по переработке отходов для обращения с накопленными отходами прежней деятельности. В число этих «исторических» отходов, образовавшихся в результате деятельности, проводимой в стране с 1950-х по 1980-е годы, входят радиоактивные источники, радиоактивные материалы и прочие изделия, загрязненные радиоактивными веществами. Финансирование для проектирования предусмотренных на площадке объектов по переработке и промежуточному хранению было предоставлено Европейским Союзом. Координация международных закупок в поддержку проекта и оказание помощи грузинскому правительству обеспечивается Шведским управлением по радиационной безопасности (ССМ) в кооперации со Шведским агентством по сотрудничеству в области международного развития (СИДА). В Молдове продвигаются работы по проекту в области обращения с радиоактивными отходами с объекта типа «Радон». В настоящее время идет разработка подробного плана и вспомогательных технических документов по извлечению радиоактивных отходов и обращению с ними, а также по дезактивации объекта.

101. В Соединенном Королевстве в сентябре 2019 года была обнародована комплексная стратегия обращения с радиоактивными отходами, которая распространяется на все радиоактивные отходы, находящиеся в сфере ведения Управления по выводу с эксплуатации ядерных объектов, и охватывает 17 площадок. Она предусматривает соответствующие меры в отношении АЭС, установок по переработке отработавшего топлива, исследовательских учреждений и пунктов захоронения. Кроме того, по итогам шестилетней работы была завершена дезактивация бункеров на площадке хранилища низкоактивных отходов, в которых находился загрязненный плутонием материал (ЗПМ). Проводившаяся работа предусматривала переупаковку и вывоз ЗПМ в пункты безопасного хранения, расположенные в Селлафилде, Соединенное Королевство.

Захоронение

102. В течение 2019 года во многих государствах-членах проводились работы на пунктах захоронения низкоактивных отходов (НАО) и САО. В число этих объектов входят пункты траншейного захоронения очень низкоактивных отходов (например, в Испании, Франции и Швеции) и НАО в засушливых районах (например, в США и Южной Африке);

приповерхностные инженерные сооружения для НАО (например, в Индии, Испании, Китае, Российской Федерации, Словакии, Соединенном Королевстве, Франции, Чешской Республике, Японии); и инженерные сооружения для низко- и среднеактивных отходов (НСАО), находящиеся в геологических формациях на различных глубинах (например, в Венгрии, Германии, Норвегии, Республике Корея, Российской Федерации, Соединенных Штатах Америки, Финляндии, Чешской Республике).

103. Кроме того, ведется строительство пунктов захоронения НАО на территории национального пункта захоронения (НПЗ), расположенного на площадке «Радiana» поблизости от АЭС «Козлодуй» в Болгарии, и на площадке хранилища радиоактивных отходов «Энарек» в Исламской Республике Иран. Как ожидается, первый этап строительства НПЗ будет завершен в конце июля 2021 года, а работы по захоронению отходов начнутся после ввода в эксплуатацию в 2023 году (рис. А-17). В Исламской Республике Иран в настоящее время ведется строительство вспомогательных эксплуатационных сооружений; в 2022 году его планируется закончить, а в 2025 году — получить лицензию на эксплуатацию.



Рис. А-17. Строительство НПЗ на площадке «Радiana» поблизости от АЭС «Козлодуй»; на фотографии представлена часть административного комплекса (слева), здание приема и буферного хранения отходов (справа), и цементно-грунтовое основание платформы захоронения № 1 (справа вдали).

104. В Литве в марте 2019 года был объявлен тендер на строительство поверхностного могильника радиоактивных отходов на Игналинской АЭС, начало строительства планируется в 2020 году. В Бельгии в феврале 2019 года была подана заявка на лицензирование пункта захоронения в Десселе.

105. В сентябре 2019 года по итогам переговоров между Хорватией и Словенией касательно возможности создания совместного хранилища НАО было достигнуто соглашение о строительстве и эксплуатации двух отдельных национальных хранилищ. Словения продолжит подготовку заявки на лицензирование строительства хранилища «Врбина», которое будет расположено поблизости от АЭС «Кршко», а Хорватия займется сооружением бетонного хранилища бункерного типа в Черкежовце.

106. Летом 2019 года была окончательно подготовлена и представлена в иракское министерство науки и технологий (выступающее в качестве оператора) и в министерство окружающей среды документация по техническому проекту и оценке безопасности хранилища НАО, расположенного в Эт-Тувайте, Ирак. Разработка технического проекта финансировалась по линии Европейской Комиссии.

107. В Пакистане была выбрана площадка для размещения пункта приповерхностного захоронения НАО в районе плато Потвар и начаты работы по эскизному проектированию.

108. В Германии продолжается строительство хранилища «Конрад», предназначенного для размещения САО; в июне 2019 года были завершены земляные работы для пункта перевалки отходов на шахте № 2.

109. В нескольких государствах-членах достигнут значительный прогресс в области захоронения высокоактивных отходов (ВАО). В Финляндии ведется строительство глубинного геологического хранилища, в Швеции ожидается принятие окончательного решения по соответствующей заявке на получение лицензии, а во Франции завершается процедура рассмотрения заявки на получение лицензии для хранилища «Сижео». В Финляндии выданы подряды на строительство первых двух туннелей для транспортировки отходов и первых пяти туннелей для захоронения, в которых предусматривается размещение герметизированных контейнеров с отработавшим ядерным топливом. Планировалось, что работы по проходке туннелей начнутся в первые месяцы 2020 года и будут продолжаться около двух с половиной лет. Представленные Шведской компанией по обращению с ядерным топливом и отходами (СКБ) дополнительные сведения, содержащие ответы на вопросы, которые были подняты Судом по делам земельных ресурсов и окружающей среды в рамках процедуры лицензирования глубинного геологического хранилища, прошли согласование в регулирующем органе. Окончательное решение по данному вопросу будет приниматься правительством Швеции. Во Франции продвигаются работы по проекту «Сижео», который предусматривает сооружение глубинного геологического хранилища ВАО в пластах келловейско-оксфордского аргиллита, и в 2020 году ожидается подача заявки на получение лицензии.

110. В ряде других государств-членов также достигнуты значительные успехи в осуществлении программ в области захоронения ВАО. В Китае 6 мая 2019 года было выдано окончательное разрешение на сооружение в пустыне Гоби в районе нагорья Бэйшань (гранитные формации) подземной исследовательской лаборатории (ПИЛ). ПИЛ предназначена для проведения исследований на предмет пригодности местных гранитных пород для размещения глубинного геологического хранилища ВАО. Эта лаборатория, сооружение которой планируется на глубине 560 метров, будет открыта для сотрудничества при поступлении заявок от других государства-членов, заинтересованных в проведении подобных исследований и участии в них. Кроме того, продвигаются работы по поиску в Китае потенциального места размещения хранилища отходов в глинистых формациях. Первый подобный проект был завершен в конце 2018 года и в октябре 2019 года согласован Управлением по атомной энергии Китая. Были определены две потенциальные площадки для проведения дальнейших изысканий.

111. На территории Соединенного Королевства в Англии (декабрь 2018 года) и Уэльсе (январь 2019 года) была начата новая программа по выбору площадки для глубинного геологического хранилища радиоактивных отходов высокой активности. В настоящее время компания — оператор хранилища «Рэйдиоэктив уэйст менеджмент лтд.» (РУМ) ведет активную работу с потенциально заинтересованными местными кругами и широкой общественностью в целях повышения информированности, предоставления ответов на вопросы и обсуждения возможности размещения пункта геологического захоронения. Для того, чтобы предоставить

отправную информацию для предварительных обсуждений, РУМ организует рассмотрение на высоком уровне геологических данных, касающихся безопасности пункта геологического захоронения.

112. В США региональным управлением министерства энергетики в Карлсбаде и «Ньюклар уэйст партнершип» (оператором комплекса) заключен контракт на сооружение на площадке WIPP новой шахты инженерных коммуникаций. Новая шахта станет ключевым элементом работ по восстановлению полномасштабной эксплуатации хранилища НСАО, расположенного в Карлсбаде, штат Нью-Мексико, после того, как 9 января 2017 года оно было повторно открыто и 10 апреля 2017 года приняло первую партию отходов.

В. Усовершенствованные ядерные и термоядерные системы

В.1. Усовершенствованные ядерные системы

113. Во всех регионах мира ширится использование современных ядерных реакторов и их применений, поскольку они расцениваются как ядерно-энергетические системы, способные внести вклад в глобальный переход к более устойчивым, доступным и надежным энергетическим системам. Кроме того, они вполне подходят для интеграции в будущие безуглеродные энергосистемы, большими частями которых будут разнообразные источники энергии. В частности, одна из многообещающих технологий касается ММР, которые могут удовлетворять потребности в чистой энергии в базисном режиме, и при этом работая гибко, с тем чтобы можно было обеспечить сочетание с разнообразными альтернативными источникам энергии и реагировать на спрос. Кроме того, они вполне подходят для неэлектрических применений ядерной энергетики, таких как опреснение, производство водорода, централизованное теплоснабжение и охлаждение, а также для ряда энергоемких промышленных применений.

В.1.1. Водоохлаждаемые реакторы

114. В настоящее время во всем мире сооружаются, вводятся в эксплуатацию или эксплуатируются несколько конструкций водоохлаждаемых реакторов (WCR), в которых применяются эволюционные и инновационные технологии. По-прежнему актуальны многие из уроков, извлеченных за последние 50 лет работы WCR. В числе последних достижений в технологиях WCR усовершенствования существующих и разработка новых конструкций, имеющих общие цели повышения безопасности, более эффективного использования ресурсов и улучшения экономических показателей. В большинстве эволюционных концепций системы безопасности имеют пассивные функции, которые не зависят от энергоснабжения и предусматривают наличие больших запасов воды, что позволяет в случае незапланированных ситуаций, таких как длительное обесточивание станции, иметь временной резерв, исчисляемый не часами, а сутками. Еще одно важное направление разработки WCR — это проектирование, испытания и сооружение в заводских условиях модульных интегральных реакторов с водой под давлением малой мощности (PWR) (см. раздел В.2.2).

115. В Аргентине запланировано сооружение тяжеловодного реактора CANDU-6 (HWR), и в настоящее время рассматривается вопрос о строительстве PWR «Хуалун-1». Аргентина планирует также создать полный потенциал производства топлива. В настоящее время рассматриваются варианты партнерства для возобновления и завершения к 2026 году строительства для коммерческой эксплуатации бразильской АЭС «Ангра-3».

116. В Канаде реконструкция АЭС «Дарлингтон» и «Брюс» в Онтарио, как ожидается, будет завершена к 2032 году, при этом общий объем инвестиций составит 26 млрд канадских долларов; а АЭС «Пикеринг» должна быть закрыта к 2025 году. В Аргентине, Китае, Румынии и Соединенном Королевстве рассматривается вопрос о сооружении новых реакторов CANDU.

117. В Китае по-прежнему реализуется самая амбициозная национальная программа по созданию усовершенствованных легководных реакторов. Правительство возобновило процесс утверждения новых станций и рассматривает возможность введения «углеродного налога». Все новые установки будут работать в полностью цифровом режиме, в том числе КИП и СУЗ и системы защиты реакторов. На всех девяти энергоблоках АЭС «Циньшань» коэффициент использования мощности с 2013 года поддерживается на уровне около 90%. Что касается HWR в Китае, то основное внимание уделяется вопросам долгосрочной эксплуатации (ДСЭ) и продлению срока службы труб высокого давления, а также подготовки к замене трубопроводов.

118. По прогнозам с настоящего времени до 2040 года на Индию будет приходиться 25% роста мирового спроса на энергию. Расширение существующего парка опирается на индийские HWR класса 700 МВт (эл.) и импортные технологии PWR. Центр атомных исследований им. Бхабхи разрабатывает усовершенствованный четырехконтурный PWR (индийский реактор с водой под давлением) мощностью приблизительно 900 МВт (эл.), а также специализированные испытательные установки. Улучшилась система производственных поставок в Индии.

119. В Пакистане была подана новая заявка на повторное лицензирование HWR АЭС «Карачи» на период 2019–2024 годов.

120. Корейская электроэнергетическая корпорация занимается разработкой PWR для экспортных рынков, и помимо имеющегося ныне реактора APR1400 она предлагает усовершенствованный PWR мощностью 1 ГВт (эл.) и iPOWER — инновационный, полностью оснащенный пассивной системой защиты PWR мощностью 1250 МВт (эл.). НИОКР в области HWR связаны в основном с вопросами ДСЭ, управления жизненным циклом топливных каналов и замены трубопроводов, а также составления руководств по управлению тяжелыми авариями. Блоки 2, 3 и 4 АЭС «Вольсон» могут стать первыми реакторами CANDU-6, на которых для увеличения срока службы труб высокого давления будут применены принципы управления жизненным циклом топливных каналов.

121. В Румынии, после продления срока службы труб высокого давления сверх расчетного срока службы 210 000 часов, на 2026 год запланировано начало реконструкции блока 1 АЭС «Чернаводэ».

122. В Российской Федерации основное внимание по-прежнему уделялось продлению срока службы и повышению на 4–10% мощности ее 20 действующих ВВЭР. Продление срока службы основано на технических и экономических факторах, и, учитывая их, срок службы может быть увеличен до 11–30 лет. Росатом получил заказы на поставку 36 блоков ВВЭР по всему миру, и в настоящее время их исполнение находится на разных стадиях переговоров, планирования и сооружения.

123. В 30 штатах Соединенных Штатов Америки в эксплуатации находились в общей сложности 98 ядерных реакторов на 60 атомных электростанциях, обеспечивая около одной пятой общего годового объема энергоснабжения в стране. Средний возраст этих ядерных реакторов составляет около 38 лет. Коммерческая эксплуатация самого старого действующего ядерного энергетического реактора, энергоблока 1 АЭС «Найн-Майл-Пойнт» в Нью-Йорке началась в декабре 1969 года. Новейший реактор, который был введен в эксплуатацию в 2016 году, — это блок 2 АЭС «Уоттс-Бар». Ожидается, что два строящихся в штате Джорджия

реактора — блоки 3 и 4 АЭС «Вогтль» на базе технологии AP1000 компании «Вестингауз», — будут введены в эксплуатацию в период с 2021 по 2022 годы.

124. Канада, Китай, Российская Федерация, Япония и Европейский Союз являются сторонами, подписавшими системную договоренность об участии в совместных НИОКР по разработке концепций SCWR (рис. В-1 и В-2). Основной целью SCWR является эффективное, экономичное и безопасное производство электроэнергии. Большинство установок SCWR разработаны как установки 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. Таким образом 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 активной зоны SCWR создает условия, благоприятные для когенерации, включая производство водорода, теплоснабжение и производство пара.

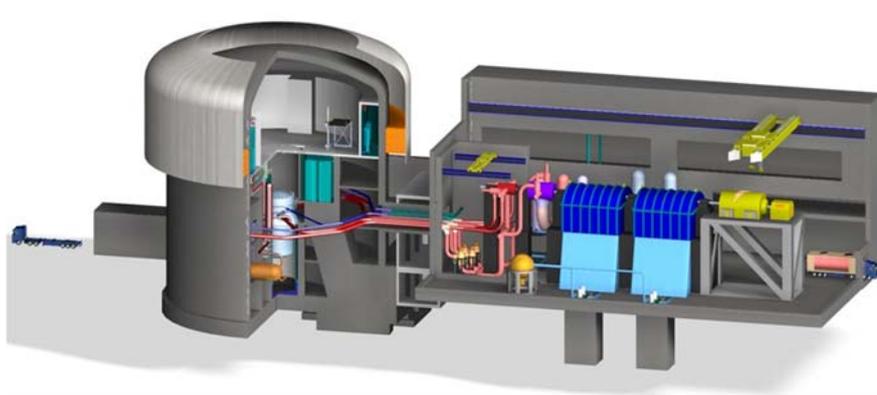


РИС. В-1. Канадский проект SCWR: здание реактора и машинный зал. (Источник: МАГАТЭ)

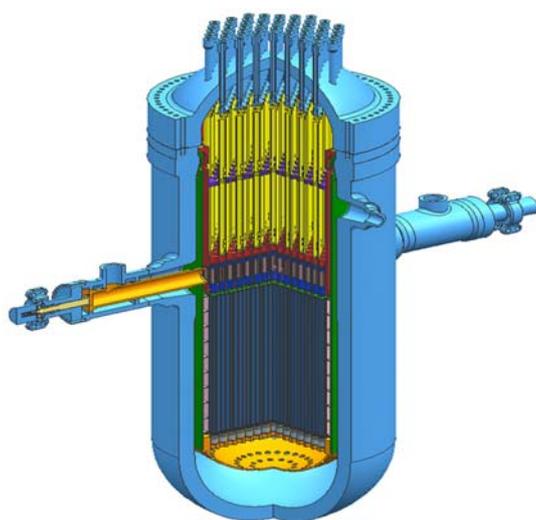


РИС. В-2. Концепция активной зоны реактора SCWR китайской конструкции. (Источник: МАГАТЭ)

В.2. Системы на быстрых нейтронах

125. Первым реактором, на котором была произведена электроэнергия, в 1951 году в Соединенных Штатах Америки стал Экспериментальный реактор-размножитель-I. Этот реактор мощностью 100 кВт (эл.) имел жидкометаллический теплоноситель — сплав натрия и калия. С тех пор во всем мире была разработана наиболее зрелая технология реакторов на быстрых нейтронах — быстрые реакторы с натриевым теплоносителем (SFR), опыт эксплуатации которых, превышающий 400 реакторо-лет, накоплен на базе экспериментальных, прототипных, демонстрационных и промышленных установок в нескольких странах, в том числе в Германии, Индии, Китае, Российской Федерации, Соединенном Королевстве, Соединенных Штатах Америки, Франции и Японии. В настоящее время в стадии разработки на национальном и международном уровнях находятся несколько инновационных (поколения IV) быстрых реакторов с натриевым, свинцовым и свинцово-висмутовым (эвтектический сплав) теплоносителем (LFR), а также газоохлаждаемых быстрых реакторов (GFR). В качестве варианта на отдаленную перспективу разрабатывается также быстрый реактор на солевых расплавах.

126. В Китайской Народной Республике на стадии проектирования и сооружения находится инновационный демонстрационный SFR — CFR-600, начать эксплуатацию которого планируется в 2025 году. Несколько институтов разрабатывают ММП со свинцовым и свинцово-висмутовым теплоносителем, в том числе системы с использованием ускорителей (СИУ). 9 октября 2019 года первая критичность была достигнута на реакторе «Цисин» («Венера») III — первом в Китае подкритическом реакторе нулевой мощности со свинцово-висмутового теплоносителем (рисунок В-3). Эта СИУ нулевой мощности будет использоваться для исследований по преобразованию долгоживущих радиоактивных отходов в короткоживущие отходы.



*Рис. В-3. На реакторе «Цисин» («Венера») III достигнута первая критичность.
(Фото: Китайский институт атомной энергии)*

127. В соответствии с трехэтапной ядерно-энергетической программой Индии, стадии завершения достигло сооружение прототипа быстрого реактора-размножителя (PFBR) мощностью 500 МВт (эл.); этот реактор находится на продвинутой стадии ввода в эксплуатацию и, как ожидается, первая критичность на нем будет достигнута в 2020 году. Этот PFBR заменит небольшой испытательный реактор мощностью 12 МВт (эл.), построенный в 1985 году в Центре атомных исследований им. Индиры Ганди. Планируется на этой же площадке в Калпаккаме построить еще два реактора-размножителя на быстрых нейтронах.

128. В Российской Федерации с 1980 года эксплуатируется БН-600, промышленный прототип SFR. Еще один SFR, BN-800 мощностью 880 МВт (эл.) находится в коммерческой эксплуатации с 2016 года. В августе 2019 года были завершены гидравлические испытания корпуса реактора на Многоцелевом исследовательском реакторе на быстрых нейтронах (МБИР) (рис. В-4), который в 2024 году заменит экспериментальный реактор БОР-60. В процессе лицензирования находятся реактор со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300 и реактор со свинцово-висмутовым теплоносителем СВБР-100.



РИС. В-4. Установка МБИР.

129. Правительство Франции решило продлить свою программу НИОКР по технологии SFR и отложить планы по созданию прототипного SFR поколения IV («Астрид»). В Бельгии принято решение о строительстве реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем MYRRHA, который может работать в подкритическом и критическом режимах в качестве ЭЛЯС; первую установку предполагается ввести в действие к концу 2024 года. Проект Шведского усовершенствованного реактора со свинцовым теплоносителем (SEALER) мощностью 55 МВт (эл.) для установки SEALER-UK (рис. В-5) был представлен на рассмотрение Департамента деловой, энергетической и промышленной стратегии Соединенного Королевства. Другими разрабатываемыми в Европе концепциями быстрых реакторов являются: ALFRED (европейский демонстрационный реактор LFR поколения IV с характеристиками типа MMP), который Румыния предложила построить в Миовени, и экспериментальный GFR ALLEGRO.

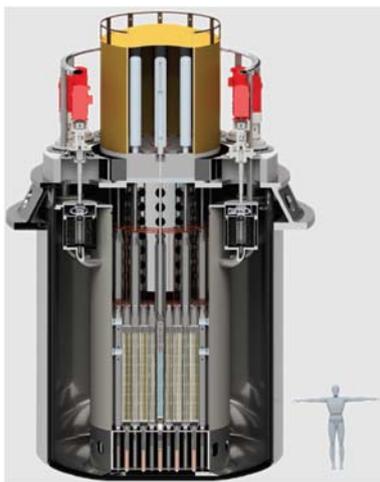


РИС. В-5. Конструкция LFR SEALER-UK мощностью 55 МВт (эл.).

130. В Соединенных Штатах Америки компания «Терра пауэр» завершила концептуальное проектирование активной зоны реактора на бегущей волне, работающего в режиме «воспроизводство-сжигание». Компания «Вестингауз» разрабатывает инновационный малый модульный реактор мощностью 450 МВт (эл.) со свинцовым теплоносителем. В феврале 2019 года министерство энергетики США объявило о планах создания универсального испытательного реактора (УИР) для исследований, связанных с облучением нейтронными потоками очень высокой энергии.

131. МАГАТЭ оказывает поддержку государствам-членам в разработке технологий быстрых реакторов путем организации и осуществления проектов координированных исследований (ПКИ), проведения семинаров-практикумов и тематических исследований. В частности, осуществляются два ключевых ПКИ, которые способствуют развитию технологий быстрых реакторов: первый касается эталонных нейтронно-физических характеристик во время пуско-наладочных испытаний китайского экспериментального быстрого реактора, а второй — эксперимента по мультифизическому анализу незащищенной потери потока на испытательной установке на быстрых нейтронах (FFTF) в США.

В.2.1. Газоохлаждаемые реакторы

132. Несмотря на длительную историю газоохлаждаемых реакторов, в коммерческой эксплуатации остались только 14 усовершенствованных газоохлаждаемых реакторов в Соединенном Королевстве. Ожидается, что некоторые из этих реакторов по-прежнему будут работать в начале тридцатых годов, при том что срок их службы ограничен в основном поведением ядерно-чистого графита.

133. Все газоохлаждаемые реакторы, разрабатываемые для внедрения в ближайшей перспективе, — это модульные высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (HTGR) малой мощности. Эти конструкции основаны на внутренне присущих им характеристиках безопасности и исключают большинство активных инженерных систем безопасности; локализация радиоактивности гарантируется микросферическим топливом с покрытием. В этих реакторах в качестве теплоносителя используется гелий, в качестве замедлителя — графит, и работают они при более высоких по сравнению с нынешними АЭС температурах (700° С и выше), благодаря чему достигается более высокая эффективность выработки электроэнергии и появляется потенциал обслуживания обширного рынка технологического тепла.

134. В Канаде проводится ряд процессов, предшествующих лицензированию ММР, в том числе в отношении четырех конструкций HTGR. Комиссия по ядерной безопасности Канады (КЯБК) получила первую заявку на лицензию на модульный HTGR малой мощности. В заявке, поступившей от «Глобал ферст пауэр» при поддержке со стороны компаний «Онтарио пауэр дженерейшн» и «Алтра сейф ньюкLEAR корпорейшн», на площадке Чок-Ривер в Онтарио предлагается соорудить микромодульную реакторную установку типа HTGR.

135. В 2020 году в Китае планируется начать промышленную эксплуатацию высокотемпературного модульного реактора с шаровыми твэлами (HTR-PM). Эта полномасштабная демонстрационная установка мощностью 210 МВт (эл.) состоит из двух реакторных блоков, сопряженных с одной турбиной. Предполагается, что в перспективе в коммерческом проекте HTR-PM600 такая же конфигурация реакторов и парогенераторов (шесть блоков) будет сопряжена с одной турбиной мощностью 650 МВт (эл.), и в настоящее время проводится ряд технико-экономических исследований в отношении создания таких конфигураций в Китае. Завершен проект обновления испытательного реактора HTR-10, и планируются дополнительные испытания для демонстрации безопасности.

136. Ожидается, что в следующем году в Японии будет получено разрешение на повторный запуск высокотемпературного реактора для технических испытаний (HTTR) мощностью 30 МВт (тепл.). В ближайшие несколько лет предполагается провести дополнительные демонстрации безопасности, сопряжение гелиевой энергетической турбины и демонстрацию сопряженного высокотемпературного производства водорода с использованием ядерной энергии. Япония также демонстрирует серьезные намерения участвовать в международных усилиях по внедрению ММР, для чего в рамках международных партнерских отношений предполагается использовать японскую технологию HTGR.

137. В Соединенных Штатах Америки продолжаются работы по аттестации топлива (испытания на облучение и нагрев), которые подтверждают отличное удержание продуктов деления топлива с трехструктурным изотропным покрытием (TRISO). Опубликованы общие требования к проектированию усовершенствованных реакторов и HTGR, которые должны способствовать созданию в этой стране более совершенной системы лицензирования. Продолжаются работы по аттестации некоторых материалов, и при этом растет интерес к испытательным установкам для иллюстрации характеристик пассивной безопасности. Продолжаются работы по проектированию и предварительному лицензированию реактора с шаровыми твэлами XE-100 мощностью 75 мегаватт (эл.).

138. Многие страны, приступающие к развитию ядерной энергетики, рассматривают возможность внедрения HTGR. Внедрение HTGR предусматривается национальным проектом использования атомной энергии Саудовской Аравии для промышленного теплоснабжения в нефтехимической отрасли. Иордания включила HTGR в свои технико-экономические обоснования внедрения ММП для производства электроэнергии, опреснения и выработки тепла, а Польша продолжает реализацию планов внедрения HTGR для промышленного теплоснабжения. В Индонезии строительство экспериментального энергетического реактора с шаровыми твэлами мощностью 10 МВт (тепл.) прекращено, однако НИОКР продолжаются, и совместно с Китаем реализуется проект по разработке реактора промышленной мощности.

139. В Европейской комиссии в рамках программы GEMINI+, которая должна быть завершена в 2020 году, продолжается деятельность, относящаяся к внедрению HTGR. Развитие технологий продолжается в Республике Корея и Российской Федерации. В Южной Африке НИОКР по новой концепции реактора с шаровыми твэлами ANTR-100 были прекращены.

140. Агентство разрабатывает и поддерживает Базу знаний МАГАТЭ по ядерно-чистому графиту, содержащую сведения об облученном графите, и в ней имеются исторические записи и знания, которые могут быть полезны для внедрения реакторов с графитовым замедлителем в будущем.

141. Кроме того, были завершены ПККИ Агентства по анализу неопределенностей в реакторной физике, по разработке проектных критериев безопасности модульных HTGR и по применению тепла HTGR для обеспечения более устойчивой, чистой добычи полезных ископаемых, и в настоящее время готовятся итоговые отчеты.

142. С учетом растущего интереса и числа запросов со стороны государств-членов Агентство в ограниченном объеме осуществляет деятельность в сфере реакторов на солевых расплавах (MSR). В настоящее время на основе НИОКР, ведущихся в государствах-членах, готовится документ, посвященный положению дел в области технологии MSR. Некоторые области, относящиеся также к газоохлаждаемым реакторам, включают высокотемпературные материалы, поведение графита и топливо на основе микросфер с покрытием (используется в конструкциях реакторов на солевых расплавах).

В.2.2. Реакторы малой и средней мощности или модульные реакторы

143. Во всем мире разрабатываются технологии ММП для внедрения в ближайшей и краткосрочной перспективе. На Международной конференции по изменению климата и роли ядерной энергетики, проведенной Агентством в октябре 2019 года, участвовавшие государства-члены выразили мнение о том, что при типичной мощности 300 МВт (эл.) ММП могут быть наиболее эффективным безуглеродным источником электроэнергии, который мог бы прийти на смену устаревающим станциям, работающим на органическом топливе. Кроме того, в силу роста на всех континентах доли неустойчивых возобновляемых источников энергии ММП представляются незаменимыми для обеспечения как базисной нагрузки, так и гибкой эксплуатации в синергии с возобновляемыми источниками, что позволит гарантировать надежное энергоснабжение.

144. Для крупномасштабного внедрения ММР необходимо решить следующие задачи: доказать, что модульность приведет к обещанным более низким уровням затрат за счет экономии, получаемой при серийном производстве, и продемонстрировать, приведут ли упрощение конструкции и короткие сроки строительства к более простым и более доступным схемам финансирования. Разрыв между странами, являющимися владельцами технологий, и развивающимися странами, приступающими к развитию ядерной энергетики, в плане достижения общего понимания требований и приемлемых критериев конструкции и технологии ММР по-прежнему велик. Поэтому крайне важна разработка общих пользовательских требований верхнего уровня для ММР, которые позволили ли бы преодолеть проблему расхождений в политике.

145. На разных стадиях разработки находятся более 50 конструкций и концепций ММР, предназначенных для различных применений.

146. Завершено строительство двух новых АЭС с ММР: в Китае и в Российской Федерации, и в настоящее время осуществляется ввод в эксплуатацию для подготовки к подключению к электросети и возможного начала коммерческой эксплуатации в 2020 году.

147. В Аргентине на площадке АЭС «Нестор Карлос Киршнер» на продвинутой стадии сооружения находится прототипный модуль CAREM-25, и на сентябрь 2022 года намечена загрузка топлива и пуск в эксплуатацию. Данный прототип рассчитан на выработку 100 МВт (тепл.) и 34 МВт (эл.) брутто. Этот ММР — интегральный PWR — будет работать в режиме полной естественной циркуляции и будет оснащен пассивными средствами безопасности. CAREM-25 был разработан с использованием отечественных технологий, и источником по меньшей мере 70% элементов и сопутствующих услуг были аргентинские компании.

148. Дорожная карта по ММР Канады предусматривает для них возможное применение для замены в сетевом или автономном режиме электростанций на органическом и дизельном топливе, в том числе в нефтяной и горнодобывающей промышленности. В настоящее время с КЯБК работают 12 разработчиков/поставщиков ММР, а компания «Глобал ферст пауэр» запросила лицензию на подготовку площадки для ММР в Чок-Риверских лабораториях.

149. В Китае завершено строительство и в процессе ввода в эксплуатацию находится НТР-РМ, который на основе двух реакторных модулей, подключенных к системе парового турбогенератора будет вырабатывать 210 МВт (эл.). Более подробно о НТР-РМ сообщается в разделе В.2.1. Китай приступил также к осуществлению проекта по сооружению АСР100, известного также под названием «Линлун-один», мощностью 125 МВт (эл.), который является интегральным PWR, разработанным как многоцелевой маломощный реактор, и который будет размещаться на площадке АЭС «Чанцзян» в провинции Хайнань. Предполагается, что строительство займет пять лет, реактор намечается ввести в эксплуатацию в 2025 году, и он предназначается для производства электроэнергии, технологического тепла и опресненной воды. Что касается морских ММР с применением технологии PWR, то Китай осуществляет разработку технологий для трех конструкций плавучих ММР, а именно АСР50S, АСР100S и АСР-F.

150. В ходе 63-й очередной сессии Генеральной конференции Агентства в сентябре 2019 года французский национальный консорциум, в состав которого входят Комиссариат по атомной энергии и альтернативным источникам энергии, «Электрисите де Франс» и «Текникатом», объявил о начале работ над NUWARD — ММР, являющимся PWR интегрального типа мощностью 170 МВт (эл.) с принудительной конвекцией и усовершенствованными системами безопасности, который предназначается для возможной реализации на зарубежных рынках в начале тридцатых годов.

151. Республика Корея и Саудовская Аравия объединили усилия для завершения детального проектирования SMART — интегрального PWR мощностью 110 МВт (эл.) (365 МВт (тепл.)), и данный проект находится в совместном владении этих двух стран. Он будет построен в Саудовской Аравии и будет использоваться для когенерации электроэнергии и опреснения морской воды. Новая оптимизированная конструкция предусматривает более высокую мощность и содержит все функции пассивной безопасности. После завершения этот проект будет представлен на сертификацию в Республике Корея, и параллельно заявка на выдачу лицензии будет подана в Саудовской Аравии.

152. В Российской Федерации в середине сентября в Певек, Чукотский АО, после буксировки на 4900 км от заправочный пирса в Мурманске, прибыла в плавучая АЭС (ПАЭС) «Академик Ломоносов» (рис. В-6), оснащенная компактным ММП с водой под давлением КЛТ-40С. Эта ПАЭС, которая получила лицензию на эксплуатацию в июле 2019 года и в декабре 2019 года была подключена к сети, имеет два реакторных модуля КЛТ-40С мощностью 35 МВт (эл.), которые вместе вырабатывают до 70 МВт (эл.) и 50 гигакалорий тепла в час, что достаточно для снабжения города с населением около 100 000 жителей. Целью этой АЭС является замена выведенной из эксплуатации Билибинской АЭС и устаревающих электростанций на угле, обеспечение энергией горнодобывающего комплекса и снабжение электроэнергией нефтепромысловых установок в Арктике. Данная ПАЭС может производить также опресненную воду.



РИС. В-6. ПАЭС «Академик Ломоносов». (Фото: Росатом)

153. В Российской Федерации рассматривается вопрос о сооружении в Республике Саха (Якутия) интегрального ММП с водой под давлением мощностью 50 МВт (эл.) РИТМ-200. Первоначально этот реактор проектировался и устанавливался на атомных ледоколах, но в настоящее время разрабатывается наземная версия для размещения на суше и подключения к сети.

154. В 2019 году Соединенное Королевство продолжало усилия по разработке технологии отечественного ММП — трехконтурной конструкции ММП на основе PWR, способного вырабатывать 450 МВт электроэнергии, при этом цель данной работы — получение одобрения этой конструкции для внутреннего использования в тридцатых годах.

155. В первом квартале 2017 года компания «НьюСкейл» в Соединенных Штатах Америки начала процедуру сертификации проекта Комиссией по ядерному регулированию (КЯР) и, по оценкам, получит сертификацию проекта к концу 2022 года. Модуль «НьюСкейл пауэр» (NPM) представляет собой интегральный PWR с естественной циркуляцией и полным комплексом функций пассивной безопасности. NPM мощностью 60 МВт (эл.) обеспечивает пошаговое увеличение мощности, которая на одной АЭС может быть доведена до мощности 720 МВт (эл.) брутто. 12-модульная конфигурация — это нынешний эталонный размер станции для целей проектирования и лицензирования, и ожидается, что эта станция заработает к середине двадцатых годов в Айдахской национальной лаборатории.

156. Большинство водоохлаждаемых ММП представляют собой компактные PWR интегрального или контурного типа. Вместе с тем, в Соединенных Штатах Америки и Японии активно осуществляются проекты по конструированию и разработке технологии BWRX-300 — кипящего реактора (BWR) с естественной циркуляцией, рассчитанного на выработку 300 МВт (эл.) и имеющего упрощенную конструкцию и функции пассивной безопасности. На основе получившего лицензию КЯР ESBWR мощностью 1520 МВт (эл.) разрабатывается конструкция ММП кипящего типа с прямым паровым циклом.

157. В течение 2019 года в нескольких странах, включая Канаду и Соединенные Штаты Америки, продвинулись работы также по подгруппе ММП, известной как микромодульные реакторы. Примером микромодульного реактора является высокотемпературный газовый реактор с блочной призматической активной зоной, рассчитанный на мощность около 5 МВт (эл.). Микромодульный реактор был представлен КЯБК для рассмотрения проектов поставщиков. Пока какой-либо глобальный консенсус относительно определения и диапазона мощности микромодульных реакторов отсутствует. В Соединенных Штатах Америки проводится также оценка конструкции интегрального PWR SMR-160.

158. В 2019 году Агентство инициировало новый проект, направленный на оказание поддержки государствам-членам, заинтересованным в создании безуглеродных гибридных энергетических систем, включающих различные возобновляемые источники энергии, ММП, накопители энергии и неэлектрические применения.

В.2.3. Международные инициативы в области инновационных ядерно-энергетических систем

159. ИНПРО, учрежденный Агентством в 2000 году, объединяет усилия разработчиков, поставщиков и пользователей технологий, направленные на выработку международных и национальных мер, необходимых для внедрения желаемых инноваций в области ядерных реакторов и топливных циклов в целях обеспечения долгосрочной устойчивости ядерной энергетики. В настоящее время ИНПРО насчитывает 42 члена — это 41 государство-член Агентства и Европейская комиссия — и предоставляет собой международный форум для рассмотрения вопросов, представляющих интерес, и координации политики, а также позволяет владельцам и пользователям технологий сотрудничать и сообщать о своих потребностях и интересах в соответствующих областях.

160. Для продвижения глобального видения устойчивого развития ядерной энергетики в XXI веке на завершающей стадии публикации находятся документы по инструментам моделирования, анализа и составления дорожных карт применительно к сценариям развития ядерной энергетической системы. В 2019 году семинары-практикумы и учебные мероприятия с использованием этих инструментов проходили в Мексике и Российской Федерации, и на 2020 год запланировано одно такое мероприятие в Таиланде. В 2019 году в Республике Корея состоялся также Форум для диалога в рамках ИНПРО, посвященный возможностям и проблемам

в сфере малых модульных реакторах. Такие форумы для диалога позволяют ИНПРО привлекать государства-члены к решению возникающих вопросов устойчивости ядерно-энергетических систем.

В.2.4. Неэлектрические применения ядерной энергетики

Будь то когенерация или интеграция с другими возобновляемыми источниками энергии — использование ядерной энергии для неэлектрических применений может охватывать широкий спектр секторов, включая опреснение воды, транспорт (например, производство водорода для транспортных средств с топливными элементами), жилищное хозяйство (централизованное теплоснабжение и охлаждение) и промышленность (нефтехимическая, сталелитейная и производство синтетического топлива).

161. В 2019 году во всем мире для выработки 2122,92 ГВт·ч теплового эквивалента электрической энергии для неэлектрических применений ядерной энергии использовались в общей сложности 74 действующих ядерных энергетических реактора (15 в Азии и 59 в Европе). Из этих реакторов 11 использовались для опреснения (потребляя 31,4 ГВт·ч), 58 — для централизованного теплоснабжения (1979,27 ГВт·ч) и 33 — для промышленного технологического теплоснабжения (1313,86 ГВт·ч). Во всем мире продолжает расти интерес к неэлектрическим применениям ядерной энергии. Использование ядерной энергии для обслуживания указанных секторов — это устойчивый способ обеспечения энергетической безопасности и борьбы с изменением климата. Извлечение и использование сбросного тепла АЭС (то есть тепла, отводимого конденсатором АЭС) для неэлектрических применений может привести к общему повышению теплового КПД станции и может снизить воздействие этого тепла на окружающую среду при сбросе в реки или другие водоемы. Когенерация с использованием сбросного тепла может компенсировать значительную часть затрат на выработку электроэнергии на АЭС. Например сбросное тепло HTGR может быть использовано для опреснения морской воды, значительно сокращая стоимость полученной воды по сравнению с опреснением с помощью газовых или мазутных электростанций. Несомненно, АЭС могут обеспечить также экономически эффективное технологическое тепло или пар в достаточном объеме. Они могут использоваться в ряде других применений, включая централизованное теплоснабжение и охлаждение.

162. В ноябре 2019 года в Китае было объявлено, что Хайян станет первым городом в Китае, который будет получать технологическое тепло от двух блоков AP1000 на АЭС «Хайян». По данным компании Шаньдунской ядерно-энергетической компании (SDNPC), которой принадлежит АЭС «Хайян», к 2021 году данный проект будет расширен в целях охвата всего города Хайян. По оценкам SDNPC, эти два блока смогут удовлетворять будущие потребности в централизованном теплоснабжении жилищ площадью до 200 миллионов квадратных метров, ежегодно экономя 6,6 миллиона тонн угля. В настоящее время имеются технологические решения, позволяющие с минимальными потерями тепла перемещать большие объемы тепла (примерно ГВт) на большие расстояния (примерно 100 км).

163. Опреснение морской воды с использованием тепла, отводимого из конденсаторов АЭС, или тепла, извлекаемого в виде низкокачественного технологического пара из последних ступеней турбин низкого давления и подаваемого в систему опреснения с многоступенчатой пленочной дистилляцией, рассматривается в качестве жизнеспособного варианта при рассмотрении проектов АЭС. Оно обеспечивает потребности электростанции в воде на протяжении всего ее жизненного цикла: строительство, эксплуатация и вывод из эксплуатации.

Благодаря достижениям в развитии технологий, связанных с опреснением, таких как низкотемпературные технологические системы, системы утилизации сбросного тепла, эффективные энергетические и технологические системы и инновационные процессы оптимизации, повышается потенциал ядерного опреснения. Оптимальным вариантом ядерного опреснения считается комплексное использование технологий гибридного термического и мембранного опреснения. Это может обеспечить снижение потребления энергии, объемов забора морской воды и затрат на системы выпуска морской воды. Несколько государств-членов, в том числе Бразилия, Египет, Индия, Иордания, Китай, Пакистан и Саудовская Аравия, выразили или подтвердили свою заинтересованность в ядерном опреснении.

164. Использование ядерной энергии для производства водорода может позволить гибкому парку ядерных реакторов играть ключевую роль в будущей водородной экономике и смягчении последствий изменения климата. На действующих в настоящее время АЭС возможно производство водорода с использованием усовершенствованной технологии низкотемпературного электролиза воды. Экономические показатели этого процесса можно улучшить за счет использования электроэнергии, вырабатываемой во внепиковый период. В последние годы развивались несколько других технологий производства водорода, включая высокотемпературный электролиз и термохимические или электротермохимические циклы производства водорода. Эти технологии могут быть интегрированы в будущие конструкции высокотемпературных реакторов.

В.3. Термоядерный синтез

165. В сооружении ИТЭР достигнут значительный прогресс, при этом завершено более 73% объема строительных работ (рис. В-7). Недавно был подтвержден пересмотренный график строительства, принятый в 2016 году, и при этом был сохранен первоначально согласованный крайний срок получения первой плазмы — к концу 2025 года. Здание токамака готово к установке основания криостата, запланированной на март 2020 года, и работа над этим элементом продлится более четырех лет. Ожидается, что эксплуатация на ИТЭР на полную мощность термоядерного синтеза начнется в 2035 году.



РИС. В-7. Фотографии строительной площадки ИТЭР в апреле 2014 года (слева) и в октябре 2019 года (справа). (Фото: ИТЭР)

166. Подписание в июне 2019 года Практических договоренностей между МАГАТЭ и Организацией ИТЭР ознаменовало новый шаг в укреплении долгосрочного сотрудничества между этими двумя организациями. В соответствии с новыми договоренностями Организация ИТЭР поделится с МАГАТЭ и его 171 государством-членом своим опытом в сфере безопасности ядерного синтеза и радиационной защиты. Обе организации будут также реализовывать образовательные инициативы в области физики плазмы и термоядерного синтеза, координировать свою информационно-просветительскую деятельность и сотрудничать в областях управления знаниями и развития людских ресурсов.

167. Еще одна важная веха в освоении термоядерного синтеза в качестве будущего источника энергии — это сооружение машины JT-60SA (рис. В-8), сверхпроводящего токамака, строящегося в городе Нака, Япония, в качестве проекта международного сотрудничества между Европой и Японией.

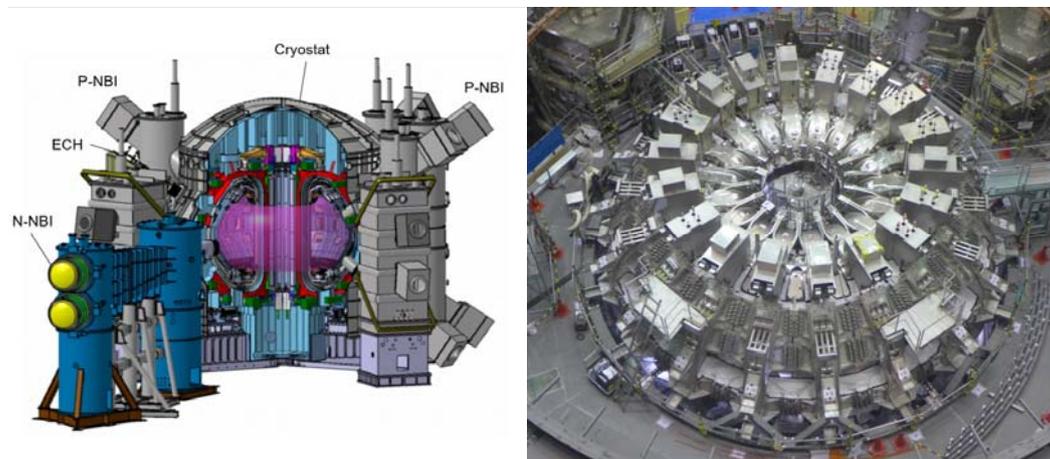


РИС. В-8. Схематическое изображение JT-60SA (слева) и фотография завершающейся сборки тора. (Источник: П. Барабаш и др., представлено на Конференции МАГАТЭ по энергии термоядерного синтеза 2018 года)

168. Ввод JT-60SA в эксплуатацию намечен на 2020 год, и, как ожидается, эта установка начнет работать на пять лет раньше ИТЭР, и таким образом проводимые на ней эксперименты будут содействовать вводу в эксплуатацию и эксплуатации ИТЭР. Некоторые из тем исследований, которые будут проводиться на JT-60SA, включают физику высоких энергий, инженерно-технические вопросы термоядерного синтеза, разработку рабочих режимов и, что наиболее важно, схемы производства и управления плазмой. Эксперименты JT-60SA дополняют также совместные с ИТЭР исследования, решая некоторые из наиболее сложных физических и технологических проблем, с которыми могут столкнуться будущие демонстрационные термоядерные энергетические установки, такие как DEMO.

169. Стабильность плазмы, материаловедение и влияние условий эксплуатации, связанных с DEMO, были темами организованного МАГАТЭ шестого семинара-практикума по программе DEMO, который в октябре 2019 года состоялся в Москве, Российская Федерация. Участие в этом мероприятии приняли около 60 экспертов из 14 стран, Организации Европейского Союза «Термоядерный синтез для энергии» и Организации ИТЭР. Во время этого семинара-практикума², который проводится раз в два года, обсуждаются основные научно-технические проблемы DEMO, а также анализируются программы, задачи и различные возможные направления действий. Хотя у каждого участника могут быть свои индивидуальные приоритеты в исследованиях, целью этих семинаров-практикумов является координация взаимовыгодных усилий и содействие международному сотрудничеству.

170. В 2019 году Министерство энергетики США приступило к осуществлению отечественной программы в области термоядерного синтеза, которая фокусируется на основных технологических разработках, включая ряд инициатив по финансированию и продвижению государственно-частных партнерств. Эта инициатива нацелена на то, чтобы послужить в качестве пилотной программы для использования возможностей в важнейших областях

² Дополнительная информация размещена на сайте https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/DEMO_landing.aspx.

исследований и разработок в сфере термоядерного синтеза и для ускорения прогресса в деле освоения энергии термоядерного синтеза.

171. Между тем, за последние пять лет было создано значительное количество частных компаний, а также государственно-частных партнерств, в основном в Канаде, Соединенном Королевстве и Соединенных Штатах Америки, а также в других европейских странах и Китае. В этом контексте в Соединенных Штатах Америки была создана Ассоциация участников освоения термоядерного синтеза как международная сеть компаний, работающих над решением задачи электрификации всего мира с помощью термоядерной энергии, и имеющая своей целью продвижение термоядерного синтеза в качестве нового источника энергии.

172. Появление этих новых структур, частично поддерживаемых частным капиталом, вероятно, изменит традиционный сценарий освоения термоядерного синтеза, по которому прогресс базируется главным образом на проектах, финансируемых государством. Таким образом, для оказания помощи в разработке и для облегчения процесса лицензирования, обеспечения процедур безопасности и защиты, планов обращения с отходами и проведения общих технико-экономических обоснований в отношении будущих термоядерных реакторов, включая анализ эффективности с точки зрения затрат и сценарии оценки социально-экономического воздействия, потребуются международные руководства принципы и нормы, относящиеся к этой области.

С. Ускорители и исследовательские реакторы

С.1. Ускорители и соответствующие контрольно-измерительные приборы

173. В настоящем разделе представлена информация об основных событиях, связанных с технологией ускорителей, их применениями и соответствующими контрольно-измерительными приборами. К наиболее распространенным применениям ускорителей относятся производство радиоизотопов для медицинской диагностики и лечения рака; стерилизация медицинского оборудования и пищевых продуктов с помощью интенсивных источников рентгеновского излучения; использование пучков заряженных частиц для материаловедческого анализа и облучения; радиоуглеродное датирование; производство нейтронов на ускорителях с широким спектром применений, таких как разведка месторождений полезных ископаемых и нефти, измерение ядерных данных и использование источников нейтронов, основанных на реакции скалывания.

С.1.1. Тандемная пучковая установка открывает новые возможности для материаловедческих исследований

174. В Загребе введена в строй тандемная ионно-пучковая установка (см. рис. С-1), позволяющая одновременно комбинировать два ионных пучка, исходящих от разных ускорителей. В результате укрепляется потенциал Хорватии в области материаловедческих исследований, и в мире появляется еще одна установка с такими передовыми возможностями.

175. Тандемная пучковая установка для облучения материалов, способных выдержать реакцию синтеза, ионами гелия, введенная в строй в Институте им. Руджера Бошковича при поддержке МАГАТЭ, поможет ученым испытывать и разрабатывать новые конструкционные материалы, используемые в связи с различными энергетическими технологиями. В результате реакций деления и синтеза образуются высокоэнергетические нейтроны, но при этом может

также выделяться газ (водород и гелий), который после воздействия в течение некоторого времени может повредить реактор и его элементы. Технология ионного пучка позволяет имитировать эти экстремальные условия и может помочь в разработке новых материалов, обладающих достаточной прочностью для того, чтобы их выдержать.



*РИС. С-1. Тандемная пучковая установка для облучения материалов, способных выдержать реакцию синтеза, ионами гелия в Институте им. Руджера Бошковича (Хорватия).
(Источник: МАГАТЭ)*

176. С помощью такой установки два пучка направляются на образец из стали — материала, обычно применяемого в ядерных реакторах в силу его прочности, — для имитации того, как продукты реакции деления или синтеза могут взаимодействовать с материалом и изменять его. Помимо вероятного повреждения кристаллической структуры материала такое ядерное взаимодействие приводит к образованию продуктов газовой трансмутации, таких как гелий и водород. В результате внутри стали могут образовываться пузырьки, что приводит к «разбуханию» материала. Зная, как и когда происходят эти реакции, ученые могут адаптировать свойства материала для нейтрализации таких нежелательных последствий.

С.1.2. MACHINA — передвижной ускоритель для проведения неразрушающего анализа объектов культурного наследия на местах

177. MACHINA представляет собой компактный ускоритель частиц следующего поколения, разработанный в рамках международного сотрудничества между Национальным институтом ядерной физики (Италия) и базирующейся в Швейцарии Европейской организацией ядерных исследований (ЦЕРН); этот ускоритель может обеспечить прорыв в области элементного анализа объектов культурного наследия на местах. MACHINA позволяет удовлетворить спрос кураторов, искусствоведов и реставраторов на неинвазивный ионно-пучковой анализ произведений искусства на местах, что крайне важно для изучения бесценных произведений искусства, которые нельзя перемещать (например, хрупкие фрески, большие картины или картины, которые могут быть повреждены при транспортировке).

178. На рис. С-2 можно видеть, что MACHINA — это компактная портативная система, основанная на разработанной ЦЕРН технологии высокочастотного радиочастотного квадрупольного (HF-RFQ). Она имеет небольшой вес (примерно 300 кг), легко перевозится, и на полный демонтаж/сборку требуется всего два часа. Она обладает повышенной надежностью, очень компактная (ее основание имеет размеры 2,5 м х 0,6 м, а регулируемая высота — 1 м), она

обладает сверхнизким энергопотреблением (общая мощность 7–8 кВт). Первый прототип³ будет использоваться в реставрационном центре «Orificio delle Pietre Dure» во Флоренции, Италия, и, как ожидается, будет предоставлен в распоряжение других европейских лабораторий и музеев.

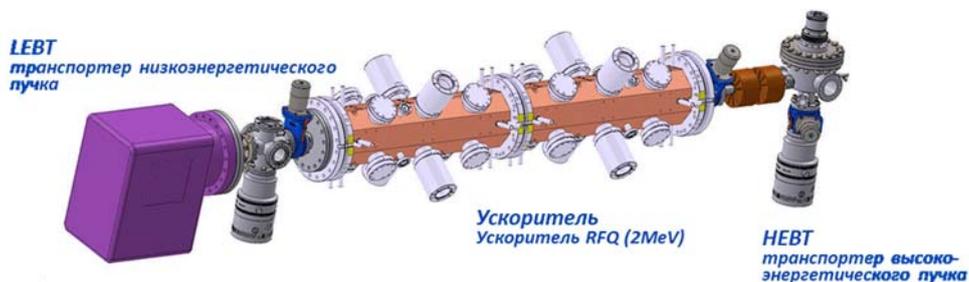


Рис. С-2. Схематическое изображение основных компонентов MACHINA. Для анализа артефакта используется ионный пучок, вырабатываемый на высокоэнергетической стороне ускорителя. На первых этапах применения основаны на методе индуцированного протонами рентгеновского излучения (ИПРИ), в рамках которого при взаимодействии частиц с материей образуется рентгеновское излучение. Затем это испускаемое излучение фиксируется, и после анализа данных определяется состав образца.

(Фото: проект MACHINA)

С.1.3. Визуализация целых клеток с помощью целенаправленных мегаэлектронвольтных ионных пучков

179. Способность видеть структуры изображений внутри целых клеток с пространственным разрешением менее 100 нанометров важна для широкого круга применений в биологии, включая доставку лекарственных препаратов, радиобиологию и терапию заряженными частицами (с использованием радиосенсибилизаторов для визуализации). Узконаправленные ионные пучки, генерируемые мегаэлектронвольтными ускорителями, открывают уникальные возможности для этих применений. Одновременно фиксируя энергию вырабатываемых ионов (сканирующая трансмиссионная ионная микроскопия (СТИМ)) и выделяемый ими видимый свет, ученые могут получать изображения, позволяющие исследовать как структуру, так и местоположение частиц. Этот вид количественной корреляционной микроскопии может быть очень полезен для изучения структуры и функций клеток. На рисунке С-3 видно, что наночастицы с трудом проникают в ядро клетки, поэтому при последующем облучении клетки в рамках радиобиологических экспериментов прямое повреждение ДНК может быть затруднено.

³ Более подробно: <http://home.infn.it/en/media-outreach/2015-03-26-11-50-59/2693-piccolo-preciso-e-potente-arriva-machina-l-acceleratore-per-i-beni-culturali-2>.

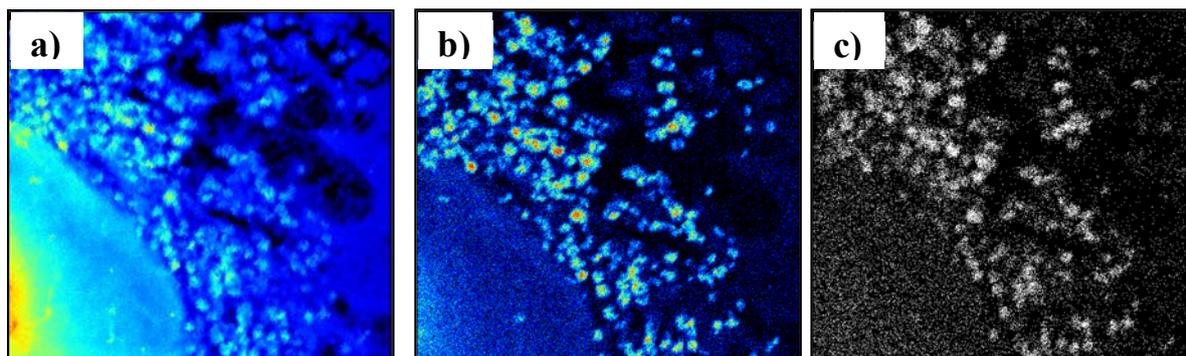


РИС. С-3. Изображение (размер сканирования 13 мкм) поглощения наночастиц редкоземельных элементов с ап-конверсией в клетке HeLa. Накопление наностержней размером 100 нм на краю ядра клетки изучается с помощью трех способов визуализации ионного пучка: а) осевая STIM, показывающая плотность; б) внеосевая STIM, показывающая повышенное рассеяние наночастиц; в) флюоресценция, вызванная альфа-частицами. Для получения изображения этой клетки с пространственным разрешением менее 50 нм был использован пучок альфа-частиц с энергией 1,6 МэВ. (Изображения любезно предоставлены Эндрю Беттиолом, Центр применения ионных пучков, Физический факультет, Национальный университет Сингапура.)

180. Наночастицы могут с успехом использоваться для обработки конкретных компонентов клетки, например митохондрий. В ходе эксперимента по радиосенсибилизации (в случае терапии заряженными частицами) может быть желательно визуализировать последствия радиационного повреждения митохондриальной ДНК, усиленного этими наночастицами. Размер митохондрий клеток составляет примерно один микрон, поэтому чрезвычайно важно высокое разрешение изображений. Митохондрии могут быть одновременно обработаны флюоресцентными зондами и наночастицами, поэтому при определении местоположения митохондрий и наночастиц может быть полезен корреляционный подход к визуализации. Затем может быть проведен систематический анализ местоположения наночастиц и воздействия различных доз облучения.

С.1.4. Основанные на использовании лазера технологии ускорителей и связанные с ними разнообразные применения в перспективе

181. Последние достижения в области высокомошных лазерных технологий⁴ позволили создать лазеры, вырабатывающие сверхкороткие световые импульсы в фемтосекундном диапазоне с очень высокой интенсивностью, превышающей 10^{21} Вт/см². Если направить эти импульсы на твердую фольгу, то могут генерироваться интенсивные источники фотонов, ионов и нейтронов (рис. С-4), которые затем можно использовать для широкого спектра применений, таких как неразрушающие испытания в аэрокосмической отрасли; радиографическая визуализация крупных объектов; функциональная диагностика литий-ионных батарей; радиационная обработка для изготовления современных функциональных материалов; активное воздействие на чувствительные ядерные материалы, включая характеризацию ядерных отходов.

⁴ Источник: параллельное мероприятие в рамках 63-й очередной сессии Генеральной конференции Агентства под названием «Иницируемые лазером источники нейтронов для ядерных применений», организованное Германией.

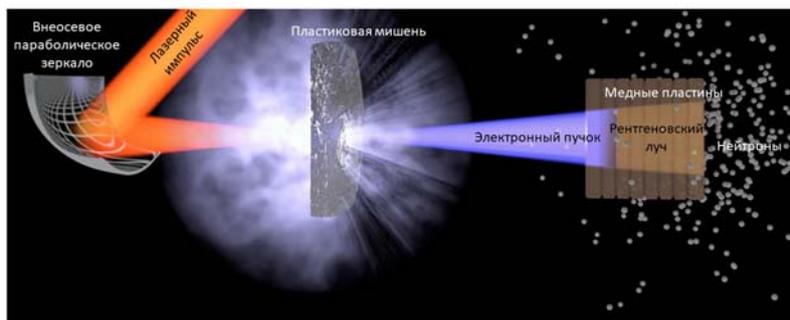


РИС. С-4. Схематическое изображение электронов и вторичных нейтронов, вырабатываемых с помощью основанных на использовании лазера технологий ускорителей. (Фото: Ишай Померанц, Тель-Авивский университет, Израиль).

182. На сегодняшний день лазерные методы демонстрируют способность поддерживать ускоряющие электрические поля по меньшей мере на четыре порядка мощнее по сравнению с методами обычных ускорителей, и цель международного научного сообщества, заключающаяся в создании компактных и портативных ускорителей частиц, представляется выполнимой в течение следующего десятилетия.

С.2. Исследовательские реакторы

183. На рисунке С-5 указаны наиболее распространенные виды применения исследовательских реакторов. Их мощность может варьироваться от нуля (например, в случае критической или подкритической сборки) до приблизительно 200 МВт (тепл.), что немного в сравнении с мощностью обычной АЭС — 3000 МВт (тепл.). В отличие от энергетических реакторов исследовательские реакторы обладают гораздо большим разнообразием конструкций и могут работать в разных режимах — стационарных или импульсных.



РИС. С-5. Распространенные виды применения исследовательских реакторов во всем мире^a

^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 237 учтенных исследовательских реакторов (по состоянию на 31 декабря 2019 года 224 эксплуатировались, 13 были временно остановлены).

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

Как следует из базы данных МАГАТЭ по исследовательским реакторам, в 67 странах было построено 818 исследовательских реакторов, 250 из которых находятся в эксплуатации в 54 странах. Наибольшее количество работающих исследовательских реакторов (59) находится в Российской Федерации, за ней следуют Соединенные Штаты Америки (50), Китай (17) и Германия (7). Во всем мире 63 исследовательских реактора работают на мощности 5 МВт и выше, генерируя нейтронные потоки высокой плотности, необходимые для производства промышленных и медицинских продуктов и услуг. В 6 странах строятся в общей сложности 9 исследовательских реакторов, и в 11 странах запланировано создание 14 исследовательских реакторов.

184. Без исследовательских реакторов невозможно производство радиоизотопов для медицины и промышленности, генерирование пучков нейтронов для исследований материалов и неразрушающих испытаний, оказание частному и государственному секторам услуг по анализу данных и облучению, а также проведение исследований в сфере культурного наследия и окружающей среды. Они вносят стратегический вклад в образование и подготовку кадров. Поскольку многие устаревающие исследовательские реакторы выводятся из эксплуатации, необходимо результативно использовать оставшиеся и новые установки, хорошо управлять ими и эксплуатировать их на устойчивой и эффективной основе. Операторам исследовательских реакторов Агентство рекомендует разрабатывать или обновлять стратегические планы

использования установок. За последние три года в Агентство были представлены стратегические планы по 23 установкам для получения дальнейших рекомендаций. В 2019 году Агентство разработало комплексный обзор использования исследовательских реакторов (ИРРУР) для оказания помощи государствам-членам в оптимизации использования исследовательских реакторов и провело первую пилотную миссию ИРРУР в Италии.

185. Возраст более половины действующих исследовательских реакторов во всем мире превышает 40 лет. Их жизненный цикл может достигать или превышать 60 лет, однако в этой связи первостепенное значение имеет своевременная реализация надлежащих программ по управлению их старением, ремонту и модернизации. Ввиду общей тенденции к сокращению финансирования таких установок, а также недостаточного планирования замещения мощностей большую важность приобретают рациональные системы управления, эксплуатация и техническое обслуживание и программы управления жизненным циклом, благодаря чему установки смогут выполнять свои задачи экономически эффективным образом. В этой связи были очень полезны миссии по независимой экспертизе в рамках услуг по оценке эксплуатации и обслуживания исследовательских реакторов (ОМАРР), которые были проведены в Бангладеш, Демократической Республике Конго, Индонезии, Португалии, Таиланде и Узбекистане. В отношении нескольких из 58 исследовательских реакторов, находящихся в режиме постоянного останова в 23 государствах-членах, в ближайшем будущем планируется начать подготовку к выводу из эксплуатации.

186. Продолжается строительство новых исследовательских реакторов в Аргентине, Республике Корея, Российской Федерации, Саудовской Аравии, Украине (подкритическая электроядерная установка) и Франции. Ряд государств-членов приняли официальные планы по строительству новых исследовательских реакторов, включая Беларусь, Бельгию, Боливию, Вьетнам, Замбию, Нигерию, Нидерланды, Соединенные Штаты Америки, Таджикистан (завершение строительства реактора «Аргус-ФТИ») и Таиланд. Другие страны, в частности Азербайджан, Бангладеш, Гана, Кения, Малайзия, Монголия, Мьянма, Нигер, Объединенная Республика Танзания, Сенегал, Судан, Тунис, Филиппины, Эфиопия и Южная Африка, рассматривают вопрос о строительстве новых установок. Миссии по комплексной оценке ядерной инфраструктуры для исследовательских реакторов (ИНИР-РР) позволяют оказать поддержку и предоставить рекомендации государствам-членам, приступающим к осуществлению проекта нового исследовательского реактора. Миссии ИНИР-РР были проведены во Вьетнаме и Нигерии и в настоящее время проводятся в Замбии и Таиланде.

187. Государства-члены, планирующие создать или сохранить свой национальный ядерный потенциал для реализации научных и технологических программ, в том числе в области ядерной энергетики, продолжают проявлять заинтересованность в получении доступа к исследовательским реакторам. Так, в 2019 году Агентство консолидировало и расширило свои четыре инструмента: реакторную интернет-лабораторию (РИЛ) — инструмент дистанционного обучения, предназначенный главным образом для целей академического образования (в 2019 году продолжились трансляции для региона Латинской Америки и Карибского бассейна, в Марокко был введен в эксплуатацию базовый реактор для РИЛ, а в регионе Азии и Тихого океана и в Европе в создании реакторов РИЛ был достигнут значительный прогресс); региональные школы по исследовательским реакторам для целей базового обучения; Инициативу в области восточноевропейских исследовательских реакторов (EERRI) для углубленного практического обучения, прежде всего молодых специалистов (в 2019 году в Японии была организована школа по исследовательским реакторам, а в Австрии, Словении и Чешской Республике были проведены 15-е учебные курсы EERRI); системы международных центров МАГАТЭ на базе исследовательского реактора (ИСЕРР) для специальной углубленной подготовки молодых и старших специалистов.

188. На сегодняшний день 99 исследовательских реакторов и четыре установки по производству медицинских изотопов были переведены с использования высокообогащенного урана (ВОУ) на НОУ, или же было подтверждено их закрытие. В 2019 году была начата подготовка к возвращению ВОУ-топлива для исследовательского реактора ИВГ.1М из Казахстана в Российскую Федерацию после перевода ИВГ.1М на НОУ-топливо. Началась также подготовка к снижению степени обогащения ВОУ-топлива исследовательского реактора ИГР в Казахстане до уровня обогащения ниже 20%.

189. К концу 2019 года в рамках программы по возвращению ВОУ-топлива американского происхождения было завершено удаление примерно 1600 кг свежего и отработавшего ВОУ-топлива для исследовательских реакторов, в рамках программы по удалению материала, не подпадающего под программы по возвращению топлива американского или российского происхождения, было завершено удаление или подтверждена утилизация примерно 2875 кг ВОУ-топлива, а в рамках программы по возвращению топлива российского происхождения было завершено удаление примерно 2300 кг топлива.

190. Продолжали предприниматься международные усилия, направленные на то, чтобы производители медицинских изотопов использовали НОУ-мишени вместо ВОУ-мишеней. В 2019 году непродолжительные перебои в работе некоторых глобальных установок и переработчиков, облучающих мишени из молибдена-99, привели к некоторому дефициту поставок на региональном уровне. Усилия органов, занимающихся управлением цепью поставок, и крупных международных производителей, а также эффективные усилия практикующих врачей, направленные на смягчение последствий, позволили несколько сгладить воздействие колебаний в объемах производства. В настоящее время примерно 75% продаваемого в мире молибдена-99 производится без использования ВОУ-топлива или мишеней. В 2018 году в Соединенных Штатах к коммерческой деятельности приступил новый производитель молибдена-99, использующий методологию производства, не основанного на урановых мишенях, а в 2019 году он начал расширять свои производственные мощности.

D. Радиоизотопы и радиационные технологии

D.1. Острая проблема пластика: применение ядерных методов

191. Производство пластика растет быстрыми темпами, и образующиеся в результате пластиковые отходы создают громадные проблемы для окружающей среды. Широкое использование легкодоступных и относительно недорогих синтетических полимеров, в том числе термопластов (обычно называемых «пластмассами») и каучука, привело к образованию огромных количеств полимерных отходов и создало соответствующие проблемы в плане обращении с отходами в наружной среде.

192. Полимеры широко используются благодаря своей низкой стоимости, простоты изготовления, легкого веса и высоких механических свойств. Рост мирового населения в сочетании с преимуществами этих материалов привел к резкому увеличению экологической нагрузки, создаваемой пластмассами во всем мире. За последние 20 лет производство

синтетических полимеров возросло на 240%. Если эта тенденция сохранится, то к 2050 году на свалки или в окружающую среду попадут около 12 миллиардов тонн полимерных отходов⁵.

193. Многие полимерные отходы представляют собой сочетания различных материалов, которые разделению поддаются с трудом или даже неразделимы, что затрудняет их повторное использование. В отличие от природных полимеров, синтетические полимеры разлагаются медленно и постепенно распадаются на мелкие частицы, известные как микропластик, которые загрязняют экосистему. Последние статистические данные о количестве произведенных за все время пластиковых отходов свидетельствуют о том, что по состоянию на 2015 год образовалось около 6300 миллионов тонн полимерных отходов (5800 Мт первичных отходов и 500 Мт вторичных), из которых около 9% было переработано, 12% сожжено и 79% выброшено на свалки или в природную среду.

194. В настоящее время уменьшение этой создаваемой отходами нагрузки основывается на нескольких технологиях, применение которых зависит от местных, региональных и национальных факторов, влияющих как на обращение с отходами, так и на уменьшение остроты создаваемой ими проблемы. Средняя степень переработки во всем мире все еще низка, и она варьируется от страны к стране (таблица D-1).

Таблица D-1. Глобальная переработка пластика

Страна/регион	Переработка (%)	Производство энергии (%)	Утилизация: свалки (%)	Не собирался (нет информации) (%)
Африка	12	1	26	62
Азия и Океания	24	25	15	37
Европа (вкл. Турцию)	27	31	33	9
Северная Америка	11	13	72	4
Южная и Центральная Америка (вкл. Мексику)	15	11	30	44

Источник данных: Global Plastics Flow 2018 (Conversio Market & Strategy, February 2018, https://www.conversio-gmbh.com/res/Global_Plastics_Flow_Feb10_2020.pdf)

195. На сегодняшний день утилизация полимерных отходов осуществляется на крупных предприятиях, которые радиационную обработку используют редко. Радиационные технологии (рис. D-1) отвечают основным принципам «зеленой» химии и создают разнообразные возможности для обработки материалов посредством контролируемого образования или разрыва химических связей.

⁵ Geyer, R., Jambeck, J.R., Law, K.L., Production, use, and fate of all plastics ever made, *Science Advances* 3(7):e1700782 (2017).

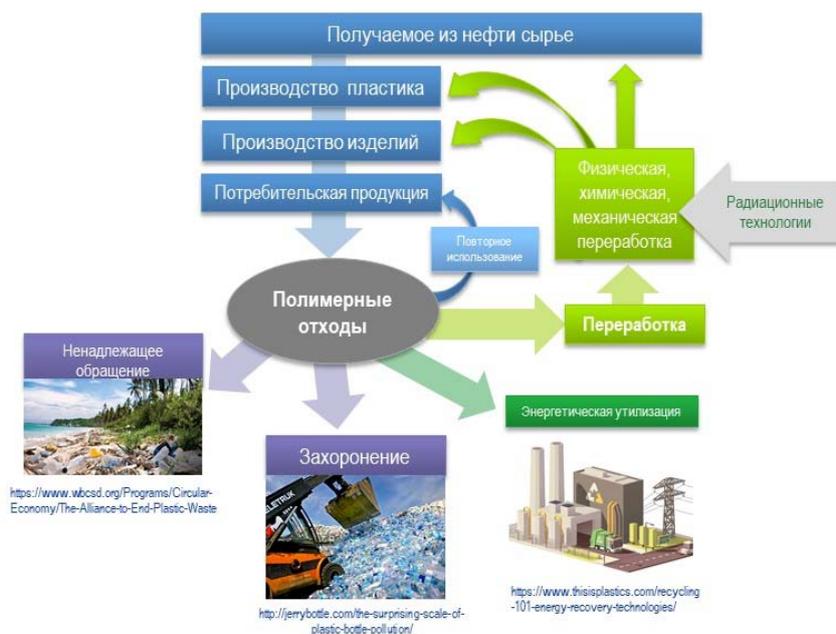


РИС. D-1. Жизненный цикл изделий из полимеров, образование полимерных отходов и обращение с ними.
(Источник: МАГАТЭ)

196. Государства-члены все чаще обращаются с просьбой задействовать радиационные технологии в решении глобальной проблемы переработки полимерных отходов. Ядерные технологии потенциально могут внести свой вклад в создание безотходной экономики полимеров и дополнить традиционные подходы к сокращению объемов полимерных отходов. Эти радиационные технологии являются масштабируемыми, то есть их можно использовать для облучения даже больших объемов полимерных отходов. Этот процесс облучения может быть использован для двух целей: для изменения структуры и свойств полимеров или для разрушения полимеров в целях создания исходного сырья. В обоих случаях модифицированный или функционализированный новый материал или исходное сырье используются для производства коммерчески жизнеспособных потребительских продуктов из переработанного пластика, что создает возможности получения прибыли при одновременном сокращении объемов отходов.

197. Использование радиационных технологий имеет явное дополнительное преимущество в том, что радиация является «зеленой» технологией, в которой, в отличие от химической переработки полимеров, не используются растворители, способствующие еще большему загрязнению окружающей среды и увеличению выбросов углерода. Переработка в новые продукты с использованием радиационных технологий особенно привлекательна, когда первичная переработка пластиковых отходов уже невозможна, поскольку многие термопласты могут быть переработаны только один или два раза при помощи обычной технологии. Таким образом, переработка полимерных отходов с использованием радиационных технологий является инновационным вкладом, который может дополнить традиционные подходы к переработке полимерных отходов.

198. Ядерные методы обеспечивают также надежный и точный мониторинг и оценку воздействия оказавшегося в море микропластика на окружающую среду с использованием изотопных индикаторов. Изотопные индикаторы обладают непревзойденной точностью и чувствительностью, которые необходимы для безошибочного определения присутствия, мониторинга перемещений и оценки содержания полимерных отходов в окружающей среде. Эта информация может быть использована для принятия политических решений.

199. Вместе с тем, хорошо зарекомендовавшие себя решения, предусматривающие использование радиационных технологий для синтеза новых материалов и дезинфекции токсичных жидкостей и газов, не могут быть напрямую перенесены на полимерные отходы. Поэтому необходимы новые исследования и разработки. Когда это возможно, желательны переработка и повторное использование полимеров, а решающее значение имеют эффективность, экономичность и устойчивость процесса переработки.

Одно из новых применений, которое превращает пластиковые отходы в материал для устойчивых и адаптируемых применений, заключается в использовании таких отходов для улучшения механических характеристик и долговечности цементного теста и бетона. Глобальное производство цемента является третьим по величине источником выбросов углерода, и, следовательно, использование в бетоне переработанного пластика также может оказать дополнительное положительное воздействие на окружающую среду⁶.

200. В будущих радиационных установках для переработки пластмасс должно использоваться экономичное интегрированное электронно-лучевое оборудование, поставлять которое могут малые и средние предприятия. Было бы предпочтительно, чтобы радиационное модифицирование полимеров проводилось в воздушной атмосфере, без избыточного давления, с использованием электронно-лучевой обработки с оптимизированными параметрами. С самого начала разработки новых систем материалов, основанных на переработанных полимерных отходах, следует рассмотреть вопрос о стандартных регулирующих руководствах, касающихся прослеживаемости материалов.

D.2. Благодаря прорыву в ускорительных технологиях больницы располагают возможностями бор-нейтронзахватной терапии

D.2.1. Прогресс в сфере компактных источников нейтронов на базе ускорителей

Что такое бор-нейтронзахватная терапия?

БНЗТ — это уникальная терапия, основанная на идее избирательной доставки соединений бора в опухолевые ткани, которые впоследствии облучаются нейтронами. Эти нейтроны захватываются бором, что сопровождается испусканием альфа-частиц и отдачей ядра лития, при этом оба процесса происходят с очень высокой передачей энергии при очень коротком тормозном пути, сравнимым с размером отдельной клетки. Основными преимуществами БНЗТ в клинической терапии являются высокая внутриклеточная биологическая эффективность и точно локализованное повреждение опухолевых клеток на клеточном уровне. Благодаря последним достижениям в области ускорительных технологий, бор-нейтронзахватная терапия (БНЗТ) приблизилась на один шаг к тому, чтобы стать возможным вариантом клинического лечения рака.

201. До настоящего времени БНЗТ проводилась в основном с использованием исследовательских реакторов, способных обеспечить необходимую интенсивность и качество пучков нейтронов для облучения пациентов. За последние два десятилетия во всем мире лечение в таких учреждениях прошли более 1000 пациентов, и был достигнут значительный прогресс в оптимизации соединений бора, включая их использование и контроль их накопления в опухолевых клетках. Однако многие из этих реакторов были остановлены, или их работа, связанная с БНЗТ была прекращена, в частности из-за сложности сочетания реакторной среды с

⁶ Schaefer, C.E. , et al., Irradiated recycled plastic as a concrete additive for improved chemo-mechanical properties and lower carbon footprint, Waste Management 71 (2018) 426–439.

клиническими требованиями. В настоящее время в качестве возможного средства лечения рака БНЗТ все еще предлагается на базе только четырех реакторов. Тем не менее, значительно возросло число установок и проектов БНЗТ, направленных на создание и эксплуатацию компактных источников нейтронов на базе ускорителей частиц — все они расположены в университетских больницах или в онкологических центрах. На некоторых из этих установок уже начались клинические испытания, и в настоящее время по всему миру рассматриваются планы задействования других установок.

202. На рисунке D-2 показаны различные технологические элементы БНЗТ на основе ускорителей: на нем показано ускорение протонов до энергий в диапазоне от нескольких мегаэлектронвольт (МэВ) до 30 МэВ при средних токах пучка от нескольких до десятков миллиампер (мА) и столкновение с мишенями из легких элементов, таких как литий (Li) или бериллий (Be). В результате получают быстрые нейтроны, которые затем, как показано на схеме, коллимируются, замедляются и направляются в зону облучения пациента. На рисунке D-3 показаны также некоторые ключевые элементы установки.

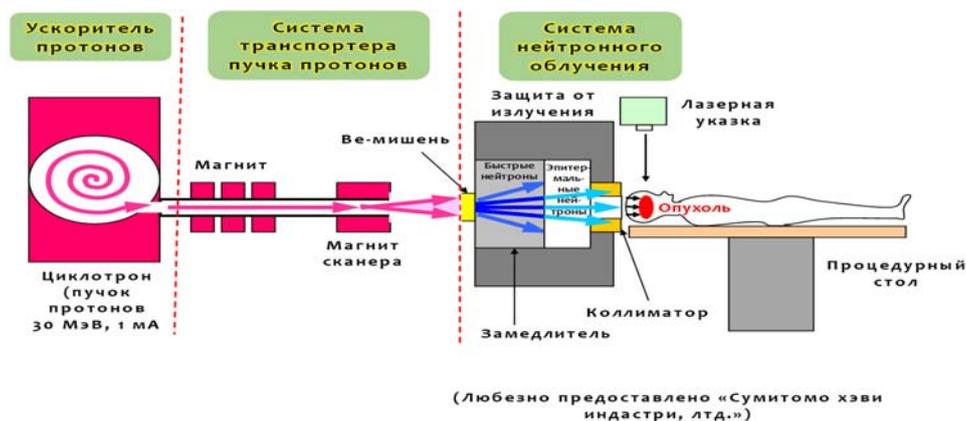


Рис. D-2. Схема БНЗТ на основе ускорителя. (Источник: «Сумитомо хэви индастриз», Япония)



Рис. D-3. В центре БНЗТ на основе ускорителя: ускоритель и компоненты мишеней (слева) с системой позиционирования пациента (справа). (Фото: Медицинский центр БНЗТ района Кансай, Япония).

203. В настоящее время Агентство рассматривает и обновляет опубликованный в 2001 году технический документ МАГАТЭ (TECDOC) «Current Status of Neutron Capture Therapy» («Текущее состояние нейтронозахватной терапии») (IAEA TECDOC No. 1223), с тем чтобы отразить все результаты, полученные за последние два десятилетия на реакторных установках БНЗТ, а также новые тенденции и прогресс, достигнутый в центрах БНЗТ с использованием ускорителей и в таких внутрибольничных центрах. В таблице D-2 приведены сводные данные о

различных установках БНЗТ на основе ускорителей, их технических параметрах и статусе готовности к использованию.

Таблица D-2. Перечень установок БНЗТ на основе ускорителей и статус их готовности к использованию. (Источник: МАГАТЭ)

Страна	Установка	Ускоритель	Налетающая частица (падающая энергия) + мишень	Проектный максимальный ток (ток в настоящее время)	Нынешний статус
Япония	Киотский университет	Циклотрон	p (30,0 МэВ) + Ве	1 (1)	Клинические испытания
	Исследовательский центр БНЗТ южного Тохоку				
	Медицинский центр БНЗТ района Кансай				
	Университет Цукубы	Линейный	p (8 МэВ) + Ве	5 (1,8)	Ввод в эксплуатацию
	Больница Национального онкологического центра	Линейный	p (2,5 МэВ) + Li	20 (12)	Клинические испытания*
	Центр БНЗТ в больнице Эдогавы				Строительство
	Нагойский университет	Электро-статический	p (2,8 МэВ) + Li	15 (1)	Ввод в эксплуатацию
Финляндия	Университетская больница Хельсинки	Электро-статический	p (2,6 МэВ) + Li	30 (20)	Клинические испытания*
Аргентина	Атомный центр «Барилоче»	Электро-статический	d (1,4 МэВ) + Ве	30 (1)	Строительство
Российская Федерация	Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера	Электро-статический	p (2,0 МэВ) + Li	10 (2)	Разработка
Израиль	Ускоритель для прикладных исследований в Центре Сорек	Линейный	p (4,0 МэВ) + Li	20 (2)	Разработка
Китай	Сямьнская гуманитарная больница	Электро-статический	p (2,5 МэВ) + Li	10 (-)	Разработка
Италия	Национальный институт ядерной физики	Линейный	p (4,0 МэВ) + Ве	30 (-)	Разработка
Республика Корея	A-BNCT	Линейный	p (10,0 МэВ) + Ве	8 (-)	Разработка

*Установка находится в рабочем состоянии, и клинические испытания уже запланированы.

D.2.2. Тераностические радиофармпрепараты и БНЗТ

204. Тераностические радиофармацевтические препараты могут использоваться в качестве комбинированных терапевтических и диагностических средств, которые позволяют перейти от традиционной медицины к персонализированной и точной медицине. Эффективность БНЗТ во многом зависит от концентрации бора и его распределения в опухолевых клетках-мишенях. В большинстве случаев в БНЗТ в качестве носителя бора-10 (^{10}B) используется борофенилаланин (БФА). Разработан и успешно применяется для мониторинга фармакокинетики БФА с помощью

позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) БФА, меченный фтором-18 (^{18}F -БФА). В результате ПЭТ с ^{18}F -БФА позволяет не только получить информацию об опухоли, но также оценить накопление бора как в опухоли, так и в здоровых тканях и показать реакцию опухоли на БНЗТ. В настоящее время БНЗТ на основе ПЭТ с ^{18}F -БФА применяется для лечения различных видов рака, таких как злокачественные глиомы, рак головы и шеи, меланома, мезотелиома, рак печени и опухоли легких (рис. D-5).

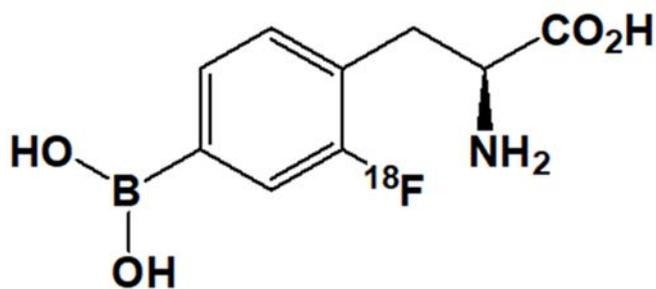


РИС. D-5. Слева: молекулярная структура БФА, меченного ^{18}F (^{18}F -БФА). Справа: ПЭТ-изображение накопленного соединения бора при метастатической злокачественной меланоме легкого. (Источник: Осацкий университет, Япония)

205. Эффективность БНЗТ может быть повышена, если увеличить концентрацию бора в клетках-мишенях. Поскольку БФА содержит только один атом ^{10}B на молекулу, существует необходимость разработки агентов, воздействующих на клетки, которые в своей структуре содержат больше атомов ^{10}B . В настоящее время во всем мире ведутся многочисленные исследования по внедрению таких молекул; однако, учитывая длительный процесс разработки лекарств, для тестирования и применения новых молекул в БНЗТ потребуется некоторое время.

D.3. Медицинский изотопный браузер: инструментальное средство для освоения новых путей производства радиоизотопов для борьбы против рака и других заболеваний

206. Агентство разработало новый веб-инструмент, который позволяет напрямую прогнозировать объем производства медицинских изотопов на основе данных, вводимых пользователем. Медицинский изотопный браузер могут использовать ученые-медики и работники радиофармацевтической промышленности для поиска до сих пор не изученных путей производства радиоизотопов. Это явится весомым вкладом в борьбу против рака и других заболеваний. Производство медицинских изотопов для терапии или диагностики зависит от весьма сложных процессов, происходящих в время ядерной реакции, и эта работа по силам только физикам-ядерщикам, которые задействуют измерения и теории ядерных реакций. Благодаря Медицинскому изотопному браузеру, через графический интерфейс пользователя, эта основополагающая информация становится доступной многим пользователям, которые специалистами не являются.

207. Медицинский изотопный браузер был официально введен в действие в ходе Международного симпозиума по тенденциям в области радиофармацевтических препаратов, который Агентство организовало в октябре — ноябре 2019 года в Вене. Первая версия ограничена изотопами, производимыми на ускорителях заряженных частиц. Пользователи могут указать характеристики ускорителя, такие как налетающая частица (протон, дейтрон, тритий, гелий-3 или альфа-частица), ток в микроамперах и энергию падающего и исходящего излучения,

а также материал мишени и желаемый произведенный радиоизотоп. Практически мгновенно могут быть получены данные о требуемом выходе изотопов в качестве функции времени облучения и охлаждения, а также полное описание всех полученных примесей. Следующая версия будет включать также производство медицинских изотопов с использованием исследовательских реакторов и электронных пучков (рис. D-6).

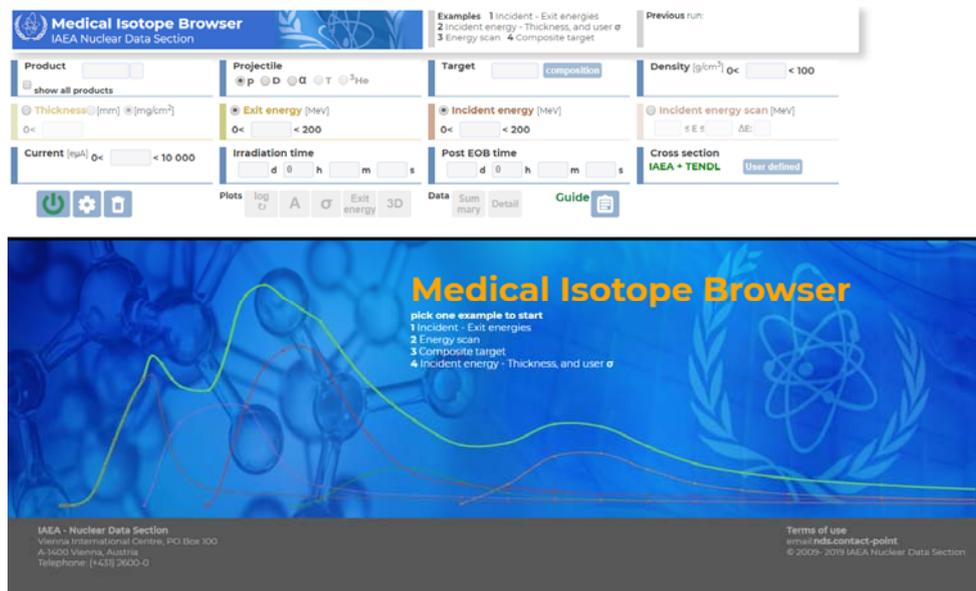


Рис. D-6. Головная страница Медицинского изотопного браузера размещена по адресу <http://nds.iaea.org/mib>.

Е. Здоровье человека

Е.1. Новый метод двойного изотопного индикатора для оценки качества белка, поступающего в организм человека

Е.1.1. Белок и его воздействие на рост и развитие ребенка

208. Поступление белка в организм в первые два года жизни не только обеспечивает рост человека, но и влияет на риск ожирения и неинфекционных заболеваний в последующий период, а также может оказывать воздействие на восстановление после острой недостаточности питания. Белки состоят из заменимых и незаменимых аминокислот. Первые могут синтезироваться в организме, тогда как вторые должны поступать с пищей. Дети с высоким риском замедления роста часто потребляют продукты питания с недостаточным содержанием большинства незаменимых аминокислот, включая триптофан, метионин, треонин, фенилаланин и лизин. Однако имеющихся данных о потребностях в незаменимых аминокислотах и их усвояемости для обеспечения роста ребенка в раннем возрасте недостаточно.

Е.1.2. Качество белка

Вы это знаете?

Усвояемость белка зависит от его источника: как правило, белки животного происхождения усваиваются лучше, чем белки растительного происхождения.

209. Качество белка определяется как мера полезности данного белка в плане получения при его потреблении достаточного количества биологически доступных незаменимых аминокислот для поддержания жизнедеятельности организма, роста, физиологических потребностей, физической активности и способности бороться с инфекциями. Большое значение имеют состав незаменимых аминокислот в белке, его усвояемость и последующее поглощение аминокислот. Эти характеристики отражены в показателе качества белка в том или ином продукте питания. Например, содержание лизина и треонина недостаточно в большинстве зерновых, а метионина — в бобовых.

Е.1.3. Метод двойного изотопного индикатора для оценки качества белка, поступающего в организм человека

210. Имеющиеся в настоящее время методы измерения усвояемости аминокислот в верхней части кишечника являются инвазивными, так как они требуют доступа к выделениям из тонкого кишечника, что достигается путем интубации кишечника человека. Однако аналогичных результатов можно достичь относительно неинвазивным способом с помощью метода двойного изотопного индикатора с использованием дейтерия (^2H) и углерода-13 (^{13}C), в рамках которого внутренне маркированный изотопом тестовый белок поступает в организм одновременно с другим маркированным изотопом «стандартным» белком. Этот «стандартный» белок представляет собой либо смесь свободных аминокислот (не требующих переваривания), либо целый белок (например, маркированную изотопом спирилли), усвояемость которого заранее определена. В результате постпрандиальное соотношение маркированных разными изотопами незаменимых аминокислот в крови позволяет оценить реальную усвояемость таких аминокислот из тестового белка. Этот метод был разработан в ответ на призыв Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО) в контексте поддерживаемого МАГАТЭ ПКИ под названием «Биодоступность белков при растительном и пищевом рационе». В рамках этого ПКИ на основе рекомендованной ФАО таблицы усвояемости незаменимых аминокислот была проведена оценка различных отечественных бобовых культур, выращиваемых в Бразилии, Индии, Марокко, Мексике, Пакистане, Таиланде и Ямайке, при этом техническую поддержку оказывали эксперты из Соединенного Королевства и Франции. Данный метод включает два этапа, описание которых приводится ниже.

Е.1.4. Внутренняя маркировка бобов оксидом дейтерия при поливе растений

211. Внутренне маркированные бобы получают следующим образом: при поливе бобовых растений используется разовая доза оксида дейтерия (D_2O). Растения созревают, и затем собираются сухие плоды (см. рис. Е-1).



*РИС. Е-1: Внутренняя маркировка бобов с использованием D₂O на этапе роста.
(Фото: г-жа Вантани Криенгсиньос, Университет им. Махидола, Таиланд).*

Е.1.5. Тестирование пищи, приготовленной из внутренне маркированных бобов, с участием людей

212. Двойной изотопный метод применяется в рамках протокола питания, рассчитанного на восемь часов (у взрослых) или шесть часов (у детей). У взрослых берутся пять образцов крови (в исходном состоянии, а затем ежечасно через пять, шесть, семь и восемь часов после приема тестовой пищи), в то время как в рамках протоколов для очень маленьких детей берутся только три образца (один в исходном состоянии и на пятый-шестой час). Например, тестируемые бобы и получаемая из них пища внутренне маркируются с использованием D₂O, при этом добавляется небольшое количество маркированного ¹³C «стандартного» белка, чтобы сравнить показатели незаменимых аминокислот, одновременно полученных из тестируемых бобовых культур и из стандартного белка. В качестве стандартного белка может быть коммерчески доступный одноклеточный белок с высоким содержанием ¹³C (¹³C-спирулина). Содержание маркированных аминокислот в крови по сравнению с употребленной тестируемой пищей используется для расчета усвояемости и белка, полученного из бобовых культур (рис. Е-2). Кроме того, добавляя маркированную аминокислоту (¹³C-фенилаланин) к тестируемой пище, можно оценить абсорбцию аминокислоты по содержанию этой маркированной аминокислоты в крови.



*РИС. Е-2: Тестируемая пища и одна из участниц исследования.
(Фото: Вантани Криенгсиньос, Университет им. Махидола, Таиланд).*

Е.1.6. Актуальность метода

213. Данный метод уже применяется в Индии для оценки реальной усвояемости незаменимых аминокислот, получаемых из четырех распространенных продуктов питания, младенцами и детьми младше двух лет. Полученные результаты свидетельствуют о том, что усвояемость ключевых незаменимых аминокислот, таких как метионин и треонин, является очень низкой.

Кроме того, была выявлена положительная связь между показателями усвояемости незаменимых аминокислот из пищи и ростом ребенка. Появляющаяся информация об усвояемости аминокислот будет в значительной степени способствовать выработке рекомендаций ФАО о качестве белка, предназначенных для людей всех возрастов, в соответствии с целью 2 в области устойчивого развития — ликвидировать голод во всем мире. В условиях нарастающего кризиса, связанного с изменением климата и нехваткой воды, вероятно, снизится как содержание белка в зерновых, так и их урожайность, в то время как содержание белка в бобовых может пострадать в меньшей степени. Существует возможность определять содержание белка в плодах засухоустойчивых сортов растений и усвояемость таких плодов, а также прогнозировать будущие поставки высококачественного белка с использованием точных методов, таких как метод двойного индикатора.

Е.2. Биодозиметрия как полезный инструмент диагностики/прогнозирования в случае радиационных аварийных ситуаций и в медицине

Биодозиметрия помогает определить дозу излучения, полученную тем или иным лицом или пациентом. В рамках этого метода используются биологические маркеры, такие как хромосомные аномалии, которые можно увидеть с помощью микроскопа.

214. В биодозиметрии используются биологические пробы, такие как кровь, которые обычно берутся у людей, подвергшихся воздействию излучения, чтобы оценить полученную ими дозу, поступившую, например, ингаляционным или пероральным путем. Электронный парамагнитный резонанс зубной эмали или кости также используется для ретроспективной дозиметрии, и этот метод иногда называют биодозиметрией. В случае радиационной или ядерной аварийной ситуации биодозиметрия чрезвычайно важна для своевременного определения радиационной дозы, полученной лицами, подвергшимися облучению (например, облученными работниками или населением). Ретроспективная биодозиметрия может помочь выявить радиационное облучение, полученное уже много лет назад, как в случае чернобыльской аварии или даже атомных бомбардировок Хиросимы и Нагасаки. Кроме того, биодозиметрия может использоваться в клинических целях, например, для оказания помощи радиационным онкологам в улучшении результатов лечения.

Е.2.1. Биодозиметрия позволяет увязать биомаркеры с дозами

215. Биодозиметрия является одной из наиболее развитых отраслей радиобиологии; ее технические аспекты хорошо отработаны и стандартизированы на международном уровне⁷. Существуют четыре стандарта ИСО по биодозиметрии, которые лежат в основе международных руководящих материалов по оказанию биодозиметрических услуг: ISO 19238:2014, ISO 21243:2008, ISO 17099:2014 и ISO 20046:2019.

216. В общих чертах, для увязки биомаркеров с дозой, полученной пациентом, используются калибровочные кривые (рис. Е-3). Определение дозы важно для выбора правильной медицинской стратегии лечения человека, подвергшегося облучению в результате аварии. Калибровочные кривые являются результатом математического моделирования, основанного на эмпирических данных; ошибки не показаны.

⁷ IAEA, Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies, EPR-Biodosimetry 2011 (2011) p. 142.

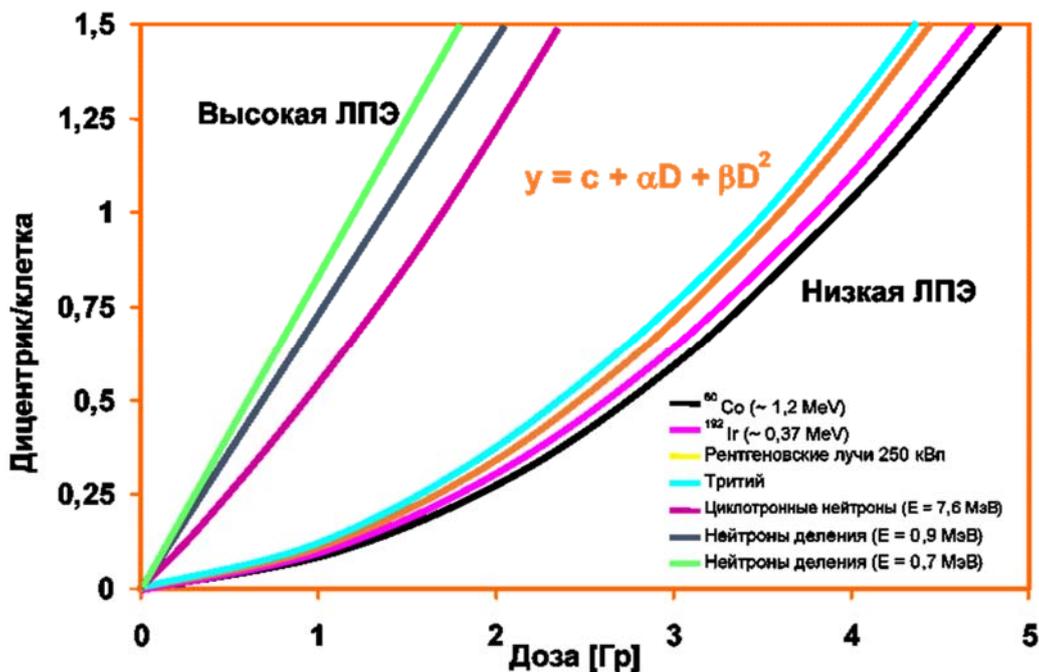


РИС. Е-3. Линейные и линейные квадратичные дицентрические кривые доза-эффект для излучения с высокой и низкой линейной передачей энергии. (Источник: *Cytogenetic Dosimetry: Applications in Preparedness for and Response to Radiation Emergencies — Training Materials* («Использование цитогенетической дозиметрии для обеспечения готовности и реагирования при радиационных аварийных ситуациях — учебные материалы»), *Emergency Preparedness and Response, EPR-Biodosimetry/T 2012, IAEA, 2013.*)

Е.2.2. Стандартные методы биодозиметрии

217. В настоящее время применяются четыре стандартизированных метода цитогенетической биодозиметрии: i) обычный анализ нестабильных хромосомных aberrаций («дицентрический анализ»); ii) измерение стабильных хромосомных aberrаций методом флуоресцентной гибридизации *in situ* (FISH) («транслокационный анализ»); iii) анализ преждевременной конденсации хромосомы (PCC); iv) микроядерный тест с блокированием цитокинеза (CBMN).

Е.2.3. Основные новые методы биодозиметрии, разработанные после 2000 года

218. Недавно в практику биодозиметрии было введено несколько новых методов, которые кардинальным образом изменили ситуацию в этой области⁸. Радиационно-индуцированные дицентрические хромосомы в лимфоцитах человека могут быть обнаружены с помощью пептидо-нуклеиновых кислот и FISH (метод ПНК–FISH) (рис. Е-4). Это усовершенствованный метод определения нестабильных хромосомных aberrаций, позволяющий более эффективно выявлять дицентрические aberrации. Использование теломерных и центромерных зондов в гибридизации может повысить разрешающую способность при обнаружении дицентрических хромосом в ходе анализа.

⁸ Zeegers, D., et al., Biomarkers of Ionizing Radiation Exposure: A Multiparametric Approach, *Genome Integrity* 8(1) (2017).

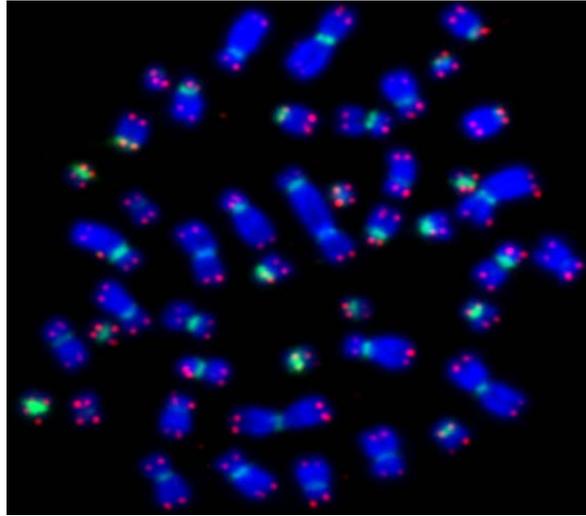


РИС. Е-4. ПНК-зонды — ПНК-FISH цианин 3 (теломера) и изотиоцианат флуоресцеина (центромера) — обозначены сигналами красного и зеленого цвета на фоне 4',6-диамидино-2-фенилиндола синего цвета. (Фото: проф. Ханьдэ, Национальный университет Сингапура.)

219. Многоцветная флюоресцентная гибридизация *in situ* (mFISH) является еще одним методом, позволяющим выявлять межхромосомные aberrации в виде транслокации хромосом, индуцированной в лимфоцитах человека ионизирующим излучением (рис. Е-5).

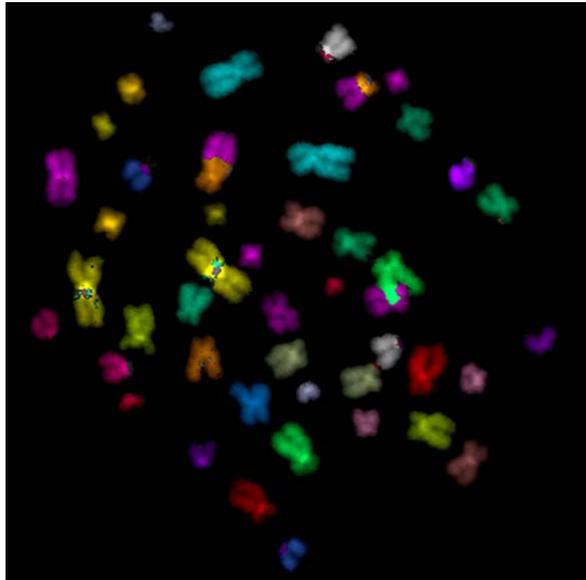
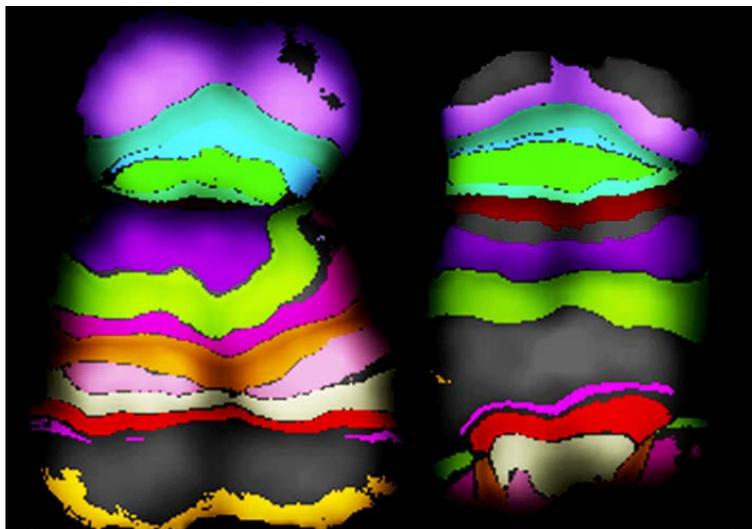


РИС. Е-5. При использовании метода mFISH каждая хромосома (1–22, X и Y) окрашивается в разные цвета с применением комбинаторной маркировки, в результате чего создается 24-цветная гибридизация, позволяющая выявлять любые межхромосомные транслокации, отображаемые в качестве цветowych соединений на отдельных хромосомах. (Фото: проф. Ханьдэ, Национальный университет Сингапура.)

220. Наконец, метод многоцветного дифференциального окрашивания хромосом (mBAND), вероятно, является наиболее совершенным методом биодозиметрии, так как он позволяет выявлять внутрихромосомные aberrации. Такой биомаркер считается уникальным признаком излучения с высокой линейной передачей энергии (рис. Е-6)⁹.



*РИС. Е-6. Внутрихромосомные aberrации в хромосоме 5, выявленные с помощью mBAND FISH путем использования хромосомных красок, меняющихся в разных частях хромосомы.
(Фото: проф. Ханьдэ, Национальный университет Сингапура.)*

Е.2.4. Будущие направления исследований

221. Новые методы биодозиметрии помогают выявить радиационное облучение человека, дать ему количественную оценку и получить информацию о возможном источнике и характере облучения. Недавно методы биодозиметрии начали применяться в радиационной онкологии и ядерной медицине, а также в диагностической и интервенционной радиологии¹⁰. Агентство приступило к реализации нового ПКИ, призванного способствовать диалогу между специалистами по биодозиметрии и радиационными онкологами¹¹. Ожидается, что благодаря заметному улучшению методов биодозиметрии можно будет проводить более комплексную оценку последствий планового или непреднамеренного медицинского облучения.

⁹ Vinnikov, V. and Belyakov, O., Clinical Applications of Biomarkers of Radiation Exposure: Limitations and Possible Solutions through Coordinated Research. Radiat Prot Dosimetry, 2019.

¹⁰ Там же.

¹¹ Там же.

Ф. Продовольствие и сельское хозяйство

Ф.1. Совершенствование применения метода стерильных насекомых для предотвращения появления и истребления инвазивных видов насекомых-вредителей

Ф.1.1. Общие сведения

222. Инвазивные чужеродные виды могут вмешиваться в экосистемные услуги или нарушать работу целых экосистем, вызывая снижение численности множества местных видов, включенных в перечень сокращающихся в численности или находящихся под угрозой исчезновения¹². Воздействие инвазивных видов является второй по значимости причиной глобальной утраты биологического разнообразия после разрушения среды обитания¹³. Значительные издержки, сопряженные с борьбой с инвазивными насекомыми-вредителями, и упущенные производственные возможности — это транснациональная проблема, для решения которой требуется эффективная региональная и международная координация.

223. В результате быстрого роста международных перевозок и торговли, миграции населения, перемещения сельскохозяйственных животных и товаров между географическими регионами вероятность интродукции инвазивных видов насекомых-вредителей в новые регионы существенно увеличилась. За последние 200 лет темпы интродукции чужеродных видов выросли со среднего годового показателя в размере 7,7 вида за период с 1500 по 1800 год до рекордных 585 видов в 1996 году¹⁴. Со временем членистоногие и другие беспозвоночные стали внедряться все более успешно, а в течение последних 45 лет наблюдается экспоненциальный рост масштабов интродукции. По оценкам, наносимый инвазивными видами ущерб мировой экономике составляет примерно 1,4 трлн долл. США, т. е. примерно 5% общего объема мировой экономики по состоянию на 2002 год.

Ф. 1.1.1. Связь между инвазивными насекомыми-вредителями и изменением климата

224. В результате изменения климата в связи с антропогенными выбросами парниковых газов не только меняется географическое распределение многих видов, но и повышается вероятность выживания инвазивных насекомых-вредителей в ранее неблагоприятных для них регионах¹⁵. В то время как рост масштабов перемещения и обмена товарами ведет к ускорению расширения ареалов распространения многих насекомых-вредителей, климатические изменения и связанные с ними изменения в землепользовании, скорее всего, приведут к появлению новых экологических ниш для насекомых-вредителей, что позволит им закрепиться на новых территориях и вызовет существенные перемены в ареалах обитания видов (рис. F-1).

¹² Charles, H., Dukes, J., Impacts of invasive species on ecosystem services, *Ecological Studies* 193 (2007) 217–237.

¹³ Pimentel, D., (Ed.) *Biological Invasions: Economic and Environmental Costs of Alien Plant, Animal and Microbe Species*, 2nd edn. (2011) CRC Press, Boca Raton, 369. В разделе F ссылка на эту публикация приводится несколько раз.

¹⁴ Hulme, P. E., Trade, transport and trouble: managing invasive species pathways in an era of globalization, *Journal of Applied Ecology* 46 (2009) 10–18.

¹⁵ Ziska, L. H., Dukes, J. S., (Eds.) *Invasive species and global climate change*, (2014) CABI, Wallingford, 368.



*РИС. F-1. Пример инвазивного насекомого-вредителя (огневка кактусовая, *Cactoblastis cactorum* Berg). (Фото: Игнасио Базс, Центр научных и технологических исследований по защите растений, Министерство сельского хозяйства США)*

225. Согласно прогнозам в области изменения климата на период до 2050 года, ожидается, что распространенность инвазивных членистоногих в чистом выражении в среднем будет составлять 18%. Эта территориальная экспансия касается не только вредителей растений, но и трансмиссивных болезней, поскольку она будет оказывать влияние как на пространственно-временное распределение и популяционную динамику переносчиков заболеваний, включая паразитов, так и на ускорение их жизненного цикла, в том числе на способы передачи и возможности для развития в новых хозяевах. Повышение температуры может спровоцировать ускорение развития вредителей и патогенов, в результате чего сократится время жизни одного поколения и, соответственно, увеличится число поколений в одном году, а это, в свою очередь, может привести к росту численности популяций патогенов/паразитов и повышению вероятности мутаций в более вирулентные штаммы. Для смягчения или преодоления этих вызванных изменением климата и глобализацией проблем появления новых вредителей необходимы новые законодательные и политические меры¹⁶. В том числе необходимо поддерживать разработку инновационных подходов к контролю, таких как метод стерильных насекомых (МСН), для предотвращения появления или регулирования первичных очагов биологических видов, а также сдерживания географического распространения чужеродных насекомых-вредителей.

F.1.1.2. МСН как инструмент предотвращения появления и истребления инвазивных насекомых-вредителей

226. При проведении кампаний по истреблению инвазивных насекомых-вредителей нередко не хватает инструментов для прицельного устранения всех представителей целевой популяции, вследствие чего приходится прибегать к неизбирательному и крупномасштабному распылению инсектицидов, а также решительному удалению пораженных животных и растений или даже массовому уничтожению скота, посевов сельскохозяйственных культур и посадок плодовых деревьев.

¹⁶ Perrings, C., Dehnen-Schmutz, K., Touza, J., Williamson, M., How to manage biological invasions under globalization, Trends in Ecology and Evolution 20(5) (2005) 212–215.

Внедрение МСН

МСН, внедренный в качестве важной составляющей части комплексной борьбы с сельскохозяйственными вредителями в масштабах района (КБСВ-МР), может обеспечивать предотвращение появления инвазивных популяций, а также их сдерживание и истребление, не вызывая при этом сопротивление со стороны населения и не оказывая негативного воздействия на окружающую среду. Поскольку этот метод предполагает воздействие только на конкретный вид и не оказывает влияния на другие полезные или нецелевые организмы, он идеально подходит для истребления инвазивных насекомых-вредителей. Особенно эффективно его использование на более поздних этапах кампаний по истреблению насекомых в связи с обратной зависимостью эффективности метода от плотности популяции, т. е. чем ниже численность целевой популяции, тем быстрее будет достигнута цель. Кроме того, он хорошо сочетается с другими биологическими методами борьбы. Пролетевшие обработку насекомые могут выпускаться в воздухе, благодаря чему метод эффективен в условиях сложного рельефа и труднодоступной местности.

F.1.2. Совершенствование технологий и стратегий МСН

227. За последние десятилетия благодаря совершенствованию технологий и протоколов массового разведения, стерилизации и выпуска стерильных насекомых КБСВ-МР с использованием МСН стала значительно менее затратной. Это открыло возможности для расширения применения такой технологии против разных важных видов насекомых-вредителей, включая значимые инвазивные виды, которые негативно воздействуют на растения, животных и здоровье человека. Это в том числе использование МСН для ликвидации всплеск численности после появления первичных очагов и недавнего возникновения популяций насекомых-вредителей. Если государства-члены сталкиваются с интродукцией инвазивного вида, в их распоряжении есть Международная база данных по уничтожению насекомых-вредителей и их стерилизации (IDIDAS), в которой собраны и представлены данные о рекомендуемых дозах стерилизации для более чем 360 видов насекомых.

228. Примером использования МСН в целях предотвращения распространения вредителей являются программы превентивного выпуска, направленные на борьбу со средиземноморской плодовой мухой в Калифорнии и Флориде¹⁷. Именно в этих американских штатах все чаще возникают первичные очаги средиземноморской плодовой мухи, приводящие к повторному появлению этого насекомого и всплескам его численности на застроенных территориях, особенно вокруг международных аэропортов. Появление первичных очагов связывают с незаконным ввозом фруктов, а также быстрым ростом объемов грузоперевозок и воздушного сообщения. В связи с этим были осуществлены обширные и дорогостоящие программы истребления, которые изначально в основном заключались в распылении с воздуха над застроенными территориями малатионовых аэрозольных приманок, что вызывало волну общественного возмущения. В ответ на это в 1994 году в Калифорнии была начата новая программа превентивного выпуска стерилизованных средиземноморских плодовых мух (ППВ), которая в настоящее время действует на площади 4582 квадратных километра на территории котловины Лос-Анджелеса и округа Ориндж. По сравнению предшествовавшим началу ППВ периодом число всплеск численности средиземноморских плодовых мух в Калифорнии сократилось более чем на 98%. В районах осуществления ППВ во Флориде вообще не происходило всплеск численности средиземноморских плодовых мух¹⁸. В итоге, несмотря на постоянное появление первичных очагов этого инвазивного вредителя, на международном уровне

¹⁷ Dowell, R. V., Siddiqui, I. A., Meyer, F., Spaugy, E. L., Mediterranean fruit fly preventative release programme in southern California, 369–375. In Tan, K. H., (Ed.) Proceedings: Area-Wide Control of Fruit Flies and Other Insect Pests. International Conference on Area-Wide Control of Insect Pests, and the 5th International Symposium on Fruit Flies of Economic Importance, 28 May–5 June 1998, (2000) Penerbit Universiti Sains Malaysia, Malaysia.

¹⁸ United States Department of Agriculture, 2014 Review of Sterile Insect Release Facilities: Sarasota, Florida and Los Alamitos, California. Mediterranean Fruit Fly Preventive Release Program, (2014) 30.

территория континентальной части Соединенных Штатов Америки продолжает считаться свободной от средиземноморской плодовой мухи.

229. Примером использования МСН для ликвидации всплеск численности после появления первичных очагов и недавнего возникновения популяций насекомых-вредителей является истребление средиземноморской плодовой мухи в Доминиканской Республике. Появление средиземноморской плодовой мухи в Доминиканской Республике было зафиксировано в марте 2015 года. Основные торговые партнеры Доминиканской Республики немедленно ввели запрет на импорт фруктов и овощей, в результате чего страна недополучила примерно 40 млн долл. США от экспорта этой продукции, а под угрозой оказались тысячи рабочих мест. В качестве меры экстренного реагирования правительство Доминиканской Республики создало программу «Москамед ДР».

230. Объединенный отдел ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в продовольственной и сельскохозяйственной областях в тесном сотрудничестве с Министерством сельского хозяйства Соединенных Штатов и программой «Москамед Гватемала-Мексика-США» оказал Доминиканской Республике техническую помощь в области борьбы с этим серьезным инвазивным вредителем и внедрения МСН в качестве основного инструмента истребления. Другими организациями, принимавшими участие в этой масштабной работе по оказанию помощи Доминиканской Республике, были Международная региональная организация по охране здоровья растений и животных и Межамериканский институт сотрудничества в области сельского хозяйства. С октября 2015 года по май 2017 года с установки на озере Эль-Пино в Гватемале в Доминиканскую Республику было отправлено более 4 миллиардов особей стерильных мух, которые затем были выпущены в пострадавших от нашествия районах (рис. F-2). Об истреблении средиземноморской плодовой мухи было официально объявлено в июле 2017 года¹⁹. Если бы этому ненасытному инвазивному насекомому позволили основать популяцию, то весь регион Карибского бассейна и все его торговые партнеры подверглись бы серьезной угрозе опустошительных всплеск численности представителей этого вида и огромных убытков в результате сокращения экспортной выручки.



РИС. F-2. Подготовка к выпуску стерильных насекомых с воздуха.
(Фото: Программа «Москамед Гватемала»)

¹⁹ Zavala-López, J. L., Marte-Díaz, G., Martínez-Pujols, F., Successful area-wide Mediterranean fruit fly eradication in the Dominican Republic. In J. Hendrichs, R. Pereira and M.J.B. Vreysen (Eds.), Area-wide integrated pest management: development and field application (готовится к публикации).

F.1.3. Предупреждение и готовность применительно к инвазивным насекомым-вредителям

231. Для многих регионов или стран, где в настоящее время отсутствуют определенные виды вредителей, вопрос заключается не в том, появятся ли они на этих территориях, а когда именно произойдет вторжение этих вредителей (рис. F-3). Глобальные тенденции в сферах туризма и торговли ведут к повышению вероятности попадания любого вида в любую точку мира.



*РИС. F-3. Фитосанитарная инспекция багажа в пункте въезда с помощью собак, способных обнаруживать инвазивные виды на стадиях неполной зрелости.
(Фото: ФУНБАПА, Аргентина)*

232. Как правило, оценки затрат и выгод показывают, что проведение крупных и дорогостоящих кампаний по истреблению вредителей без определенных гарантий успеха или бездействия, позволяющее серьезному вредителю создать постоянную популяцию, которую затем нужно будет контролировать, обойдутся гораздо дороже, чем меры по подготовке к появлению первичных очагов, которые позволят быстро и эффективно реагировать на такие случаи при необходимости. У МСН существует огромный потенциал для применения против основных инвазивных насекомых-вредителей; однако, когда происходят вспышки численности новых инвазивных вредителей, часто в распоряжении оказываются только отдельные части пакета МСН, а то и вообще ничего. Поэтому важно разработать такой пакет МСН, который можно было бы использовать против самых опасных потенциальных чужеродных видов вредителей, восприимчивым к применению МСН²⁰.

233. Оптимизация технологии, используемой для применений МСН в масштабах района, а также ее диверсификация для борьбы с разными важными видами насекомых-вредителей позволят еще больше расширить применение этой технологии и станут стратегическим инструментом борьбы с увеличением масштабов интродукции инвазивных вредителей вследствие таких факторов, как рост туристических потоков и торговли, а также изменение климата.

²⁰Invasive Species Specialist Group, Global Invasive Species Database, Global Invasive Species Programme (GISP) (2018). <http://www.issg.org/database/species/search.asp?st=100ss&fr=1&str=&lang=EN>

Ф.2. Использование ядерных методов в поддержку систем отслеживания происхождения пищевых продуктов

Ф.2.1. Общие сведения

234. Многие продукты питания продаются по премиальным ценам из-за указанной на этикетке «особенной ценности», обусловленной географическим положением места происхождения, методов производства и уникальных свойств. Привязка продуктов к месту происхождения может быть частью благотворного круга обеспечения устойчивого качества на основе сохранения местных ресурсов и других факторов, описанных в публикации ФАО «Linking people, places and products» («Связь людей, мест и продуктов»)²¹.

235. Наиболее перспективными аналитическими методами проверки географического указания являются анализ стабильных изотопов и микроэлементов (SITE) магнитно-резонансная спектроскопия, включающая ядерно-магнитный резонанс (ЯМР) и электронный парамагнитный резонанс или спектроскопию электронного спинового резонанса, а также профилирование с помощью масс-спектрометрии. Кроме того, существует рекомендация Европейского союза о том, чтобы документы на регистрацию новых географических указаний содержали ссылку на соответствующую аналитическую процедуру для проверки происхождения и/или основных качеств продукта.

Что такое географическое указание?

Географическое указание обозначает место происхождения и/или способ производства продукта питания в случаях, когда определенное качество, репутация или иная характеристика продукта питания по своей сути обусловлена его географическим местом происхождения, или терруаром. Среди преимуществ географического указания — гарантия качества (репутация), честная конкуренция, защита наименования на рынках (внутреннем или международном), премиальная наценка, привязка ценных продуктов к сельским районам, восстановление связи между потребителями и производителями, а также защита традиций. Перечень зарегистрированных продуктов, имеющих географическое указание, можно найти в подготовленной Европейским союзом Базе данных мест происхождения и регистрации (DOOR) сельскохозяйственных и пищевых продуктов, в которую включено несколько тысяч продуктов питания со всего мира.

Ф.2.2. Ядерные методы

236. Основные ядерные или изотопные методы, применяемые для проверки происхождения пищевых продуктов, описаны в ниже. Эти методы включают, в частности, анализ соотношения стабильных изотопов тяжелых элементов с помощью масс-спектрометрии с термической ионизацией (МСТИ) и мультиколлекторной масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МК-МС-ИСП); многоэлементный анализ с использованием масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (МС-ИСП), оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС) с ИСП, рентгеновской флуоресценции (РФ), нейтронно-активационного анализа (НАА) и смежных методов. Кроме того, могут использоваться такие методы, как ЯМР-спектроскопия и масс-спектрометрия для профилирования метаболитов или нецелевой скрининг, наряду с другими быстрыми ядерными

²¹ ФАО, Strengthening sustainable food systems through geographical indications: An analysis of economic impacts (2018).

методами, используемыми для проведения предварительных исследований, такими как спектрометрия ионной подвижности (СИП).

237. Степень охвата и взаимодополняющий характер этих методов обеспечивают прочную основу для определения происхождения и аутентичности пищевых продуктов в поддержку систем отслеживания происхождения пищевых продуктов и продуктов, имеющих особую ценность. Кроме того, полученный в ходе применения различных технологий успешный опыт определения с их помощью происхождения пищевых продуктов и фальсификаций имеет решающее значение с точки зрения передачи знаний, их быстрого внедрения и подготовки специалистов в странах и регионах, в которых в настоящее время отсутствуют соответствующие аналитические решения.

Измерения стабильных изотопов

238. Ядерные методы используют систематические глобальные вариации в соотношениях стабильных изотопов биоэлементов водорода, углерода, азота, кислорода и серы, измеренных с помощью МСИС, а также вариации тяжелых изотопов стронция и другие биогеохимические показатели. При первом приближении измерения естественно присутствующих в больших количествах стабильных изотопов раскрывают информацию о фотосинтезе или питании растений (изотопные соотношения углерода и азота) и о географическом происхождении (изотопные соотношения водорода, кислорода, серы и стронция). Например, измерение соотношений естественно встречающихся в природе стабильных изотопов биоэлементов водорода, углерода, азота, кислорода и серы в пищевых продуктах часто может дать информацию о географическом происхождении или методах производства пищевых продуктов через связь с соотношениями изотопов в окружающей среде или, например, режимах и рационах кормления животных. Изотопы стронция, измеренные с помощью МСТИ или МК-МС-ИСП, также предоставляют информацию, связанную с геологией региона производства, которая передается растениям и животным через содержащиеся в почвах поддающиеся биологическому усвоению фракции. Поскольку оставляемые в пищевых продуктах стабильными изотопами «отпечатки» неразрывно связаны с характеристиками района производства, их подделка является слишком дорогой, чтобы приносить экономическую выгоду.

Элементное профилирование

239. Элементное профилирование пищевых продуктов с помощью МС-ИСП предоставляет важную информацию о концентрациях макро- и микроэлементов, а также элементов, присутствующих в виде следов, с помощью которой можно привязать пищевые продукты к месту их производства, и о любой потенциально меняющей их элементный профиль технологической обработке, такой как, например, измельчение или дробление. В тканях растений присутствует точно такой же состав биодоступных и мобилизованных питательных веществ, как и в подстилающих грунтах, на которых они были выращены. Например, щелочные металлы, особенно рубидий и цезий, легко мобилизуются в почве и попадают в растения, поэтому они служат хорошими индикаторами географической принадлежности.

240. Наличие следов элементов зависит от нескольких факторов, таких как кислотность, влажность и пористость почвы, а также содержание в ней глины и гумуса. Соответственно, диапазон присутствующих почв вместе с биодоступностью означает, что элементный состав может давать уникальную комбинацию маркеров в продуктах питания, характеризующих географическое происхождение и дающих возможность его отслеживания. Аналогичным образом, многоэлементный профиль животных тканей в некоторой степени является отражением растительности, которую потребляют животные, и может быть привязан к конкретным районам производства, например, в случае пастбищного молочного и мясного скота. Кроме того, элементное профилирование позволяет получать информацию о безопасности пищевых

продуктов с точки зрения концентрации потенциально токсичных элементов, таких как мышьяк, кадмий, свинец и ртуть.

Метод сбора уникальных метаболомических характеристик (метаболомика)

241. Анализ содержащихся в пищевых продуктах метаболитов является еще одним важным методом, который обычно используется для проверки аутентичности. Метаболиты появляются в результате происходящих в организме клеточных или молекулярных процессов и могут быть определены с помощью ЯМР и масс-спектропии. Метаболомика может быть либо целевой, то есть направленной на группы связанных метаболитов для получения непосредственной функциональной информации для метаболомического моделирования, либо нецелевой, то есть предназначенной для выявления структуры отдельных метаболомов, что позволяет установить различия между наборами образцов и может использоваться для построения моделей для классификации неизвестных образцов на основе метаболомической структуры или уникальных характеристик. Все эти методы в значительной степени опираются на многомерный статистический анализ для обработки и толкования результатов (рис. F-4).

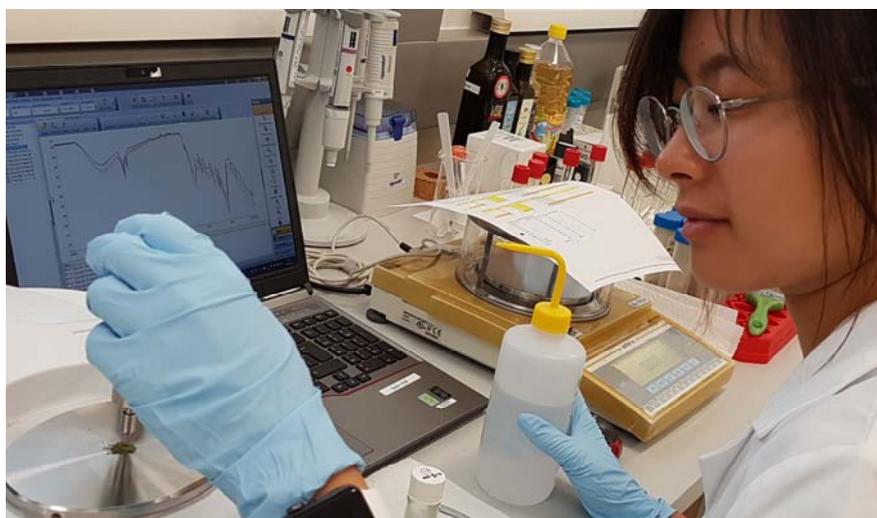


РИС. F-4. Сотрудник МАГАТЭ проводит анализ образца зеленого чая. (Фото: МАГАТЭ)

242. ЯМР и электронный парамагнитный резонанс могут применяться для исследований сложных смесей в пищевых продуктах с проведением или без проведения простого предварительного разделения компонентов, и с его помощью можно получить информацию о географическом происхождении, присутствии фальсифицирующих примесей, качестве и технологической обработке пищевых продуктов. Примером применения данного метода является профилирование с использованием протонной высокопольной ЯМР-спектроскопии для определения места происхождения и присутствия фальсифицирующих примесей в меде, фруктовых соках и винах. Результаты исследования неизвестного образца сравниваются с базой данных аутентичных образцов известного происхождения, и тогда в случае аутентичности исследуемого образца наблюдается совпадение характеристик, а при их несовпадении указываются отклоняющиеся уникальные характеристики. Еще одним преимуществом этих методов является то, что область спектрального отклонения может быть дополнительно проанализирована для выявления химического вещества или веществ, использованных для фальсификации. Кроме того, проведение характеристики с помощью электронного парамагнитного резонанса позволяет получить чувствительный и точный метод измерения для обнаружения органических химических радикалов с неспаренными электронами в условиях магнитного поля, которые показывают, соблюдаются ли стандарты качества и нормы безопасности производителями фруктов и овощей, производителями специй и другими участниками цепей поставок продукции. Электронный парамагнитный резонанс подтверждает

использование облучения пищевых продуктов путем обнаружения антиоксидантов, радикалов целлюлозы и радикалов кристаллического сахара в образцах пищевых продуктов. Облучение пищевых продуктов — это процесс обработки пищевых продуктов с помощью одобренных уровней ионизирующего излучения для устранения болезнетворных организмов и продления срока их хранения. Оно также используется для обеспечения микробиологической безопасности, чтобы инактивировать паразитов и патогенные микроорганизмы за счет ликвидации насекомых и вредных бактерий, таких как кишечная палочка в мясе и птице, которые часто встречаются в самых разных пищевых продуктах, в процессе технологической обработки, направленной на повышение безопасности пищевых продуктов.

Технология скрининга

243. Последние достижения в разработке аналитических приборов позволяют использовать некоторые ядерные и электронные парамагнитные методы в более компактных и доступных устройствах. Различные категории приборов, которые ранее использовались только в лабораториях, появляются в виде более доступных настольных, портативных или карманных устройств, способных осуществлять скрининг пищевых продуктов на наличие нетипичных характеристик или отклонений. Например, недавно появились относительно доступные настольные ЯМР-приборы, которые могут выполнять скрининговые анализы, ранее проводившиеся с помощью дорогостоящих высокопольных приборов ЯМР- и электронного парамагнитного резонанса, для использования которых требуются особая инфраструктура и специальные работники.

244. Точно так же переносным и карманным РФ-спектрометрам можно было бы найти применение в исследовании пищевых продуктов для выявления элементарных уникальных характеристик, если бы можно было повысить их относительную чувствительность. Другим применяемым в настольных и переносных устройствах методом, который имеет большой потенциал в области проверки аутентичности пищевых продуктов, является парофазная газовая хроматография и спектроскопия ионной подвижности (ГХ-СИП), для проведения которой используется источник излучения с очень низкой энергией. СИП много лет широко используется в аэропортах для выявления взрывчатых веществ и запрещенных наркотических средств, но только недавно ее стали применять для подтверждения с помощью анализа летучих органических соединений в пищевых продуктах их аутентичности и места происхождения. В число примеров входят проверка аутентичности и происхождения молочных продуктов, риса и ценных масел, получаемых из растений, семян или орехов, например марокканского арганового масла.

Ф.2.3. Базы данных

245. Для применения вышеуказанной технологии к системам независимой проверки места происхождения и отслеживания пищевых продуктов необходимо охарактеризовать присутствующие в рамках анализа SITE и метаболических уникальных характеристик естественные вариации аутентичных пищевых продуктов, связанные с годовыми циклами или циклами урожая. Эта информация может быть включена в справочную библиотеку или базу данных о местах происхождения пищевых продуктов для проведения сравнения предполагаемых контрафактных или фальсифицированных пищевых продуктов. Несмотря на наличие методологии и технологии, отсутствие актуальных баз данных и/или ограниченная функциональная совместимость между ними являются основным препятствием для использования этой методологии в целях применения анализа SITE и сравнения с уникальными метаболическими характеристиками при проведении проверки происхождения и аутентичности пищевых продуктов.

Знаете ли вы?

База данных о происхождении пищевых продуктов представляет собой организованную подборку данных, проанализированных в соответствии с установленными протоколами и полученных из репрезентативного числа аутентичных образцов.

246. Целью такой базы данных является определение естественных (и допустимых по технологии) вариаций присущих конкретному пищевому продукту специфических свойств. Эти «естественные» вариации берутся в качестве справочного значения при проведении сравнения в ходе проверки подозрительных образцов или рутинного инспекции рыночных образцов с целью выявления случаев мошенничества с пищевыми продуктами, таких как недостоверная маркировка и фальсификация. Принимая во внимание конечную цель таких баз данных в виде оказания поддержки системам отслеживания происхождения пищевых продуктов (например, в случаях адресных или ограниченных отзывов продукции) и последствия, наступающие в тех случаях, когда выясняется, что проверенные пищевые продукты не соответствуют заявленным характеристикам, крайне важно, чтобы эти базы данных надлежащим образом велись независимым, глобальным и уважаемым органом, к которому государства-члены могли бы обращаться на регулярной основе для проведения сравнения пищевых продуктов, в отношении которых существуют подозрения в фальсификации и контрафакте.

247. Существует целый ряд ядерных и смежных аналитических методов для проверки места происхождения пищевых продуктов, которые могут оказывать поддержку системам отслеживания происхождения пищевых продуктов или способствовать получению независимого подтверждения их корректности. Ожидается, что в число предстоящих разработок войдут дальнейшее уменьшение размеров аналитических приборов для скрининга первого уровня с использованием новаторских и экспериментальных технологий, таких как наноматериалы и усовершенствованные средства обработки данных, для разработки портативных, быстрых и неинвазивных приборов, что позволит значительно увеличить количество отбираемых для проведения экспертизы образцов пищевых продуктов. Например, уже разработаны прототипы сканеров пищевых продуктов с использованием обычных смартфонов в качестве скринингового устройства. Экономичность и доступность этих методов означает, что потенциально их можно было бы использовать для проведения скрининга пищевых продуктов на разных этапах производства и создания стоимости всеми заинтересованными сторонами в пищевой промышленности, регулирующими органами и даже потребителями, что значительно повысило бы эффективность систем контроля.

248. Интеграция таких приборов в системы проверки пищевых продуктов приведет к изменению парадигмы, при которой лаборатории, применяющие высокочувствительные и специфические ядерные и изотопные методы, позволяющие получать критически важную информацию, перейдут от работы с большим количеством образцов, которые соответствуют заявленным характеристикам, к работе с меньшим количеством представляющих большее значение образцов, которые были идентифицированы как подозрительные.

Г.3. Ядерные методы мониторинга парниковых газов в целях смягчения последствий изменения климата

Г.3.1. Общие сведения

249. Выбросы основных парниковых газов (ПГ), включая углекислый газ (CO₂), метан (CH₄) и закись азота (N₂O), способствуют глобальному потеплению, оказывая воздействие на

устойчивость систем производства сельскохозяйственной продукции. Последние данные Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) ясно показывают, что антропогенные выбросы ПГ находятся на самом высоком уровне за всю историю²². С 1900 года средняя температура приземного слоя воздуха планеты выросла примерно на 0,8°C, причем более активная фаза этого роста пришлась на период после середины 1970-х годов. Изменениями в сельском хозяйстве и землепользовании объясняется примерно 25% от общего объема выбросов ПГ, главным образом это связано с неэффективным использованием химических удобрений и навоза, выбиванием пастбищ скотом и обезлесением. И хотя сельское хозяйство вносит значительный вклад в изменение климата за счет связанных с ним выбросов ПГ, оно одновременно является и жертвой климатических изменений в результате негативного воздействия изменения климата на наличие воды, плодородие и качество почв, а также на урожайность сельскохозяйственных культур.

250. ПГ поступают не только из непосредственных источников, но также и из различных косвенных источников, в том числе в результате испарение аммиака (NH_3) в сельскохозяйственных системах (рис. F-5). Наблюдается большой разброс в уровнях выбросов NH_3 (от 10% до 60% применяемого азота) различных агроэкосистем²³. Столь значительные потери NH_3 в процессе сельскохозяйственной деятельности имеют негативные последствия для агрономии, окружающей среды и экономики. Например, выбросы NH_3 вызывают медицинские и экологические проблемы, в том числе воспаление органов дыхания, эвтрофикацию воды и подкисление почвы. Кроме того, NH_3 служит вторичным источником N_2O — мощного парникового газа, способствующего глобальному потеплению. Помимо этого, пространственная и временная изменчивость выбросов ПГ создает серьезные трудности с точки зрения их измерения и регулирования применительно к различным агроэкосистемам и видам землепользования, особенно с учетом присущей последним пространственной неоднородности. С помощью инструментов на основе изотопных методов можно определить последовательность возникновения выбросов и, соответственно, получить информацию для разработки эффективных методов смягчения последствий.

²² IPCC (2014) Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. IPCC, 2019. Publications [WWW Document]. IPCC - Task Force on National Greenhouse Gas Inventories. URL <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/index.html>

²³ Zaman, M., Saggari, S., Stafford, A.D., Mitigation of ammonia losses from urea applied to a pastoral system: The effect of nBTP and timing and amount of irrigation, Proceedings of the New Zealand Grassland Association 75 (2013) 209–214.

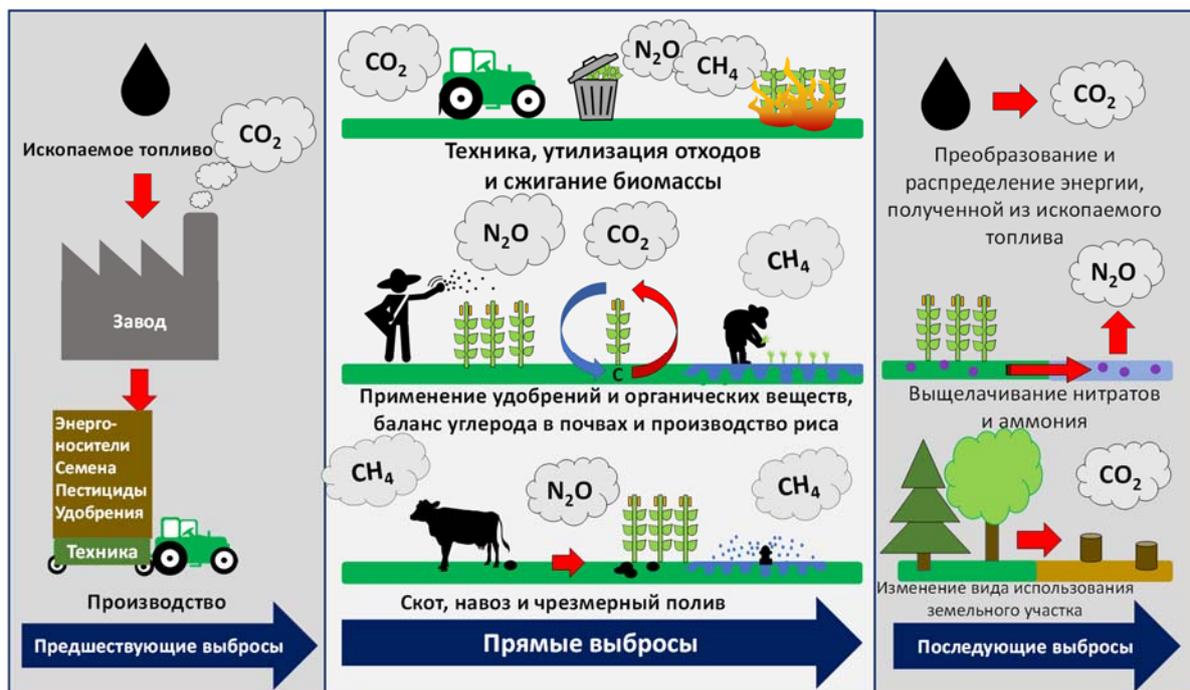


Рис. F-5: Схематическое изображение прямых (производимых непосредственно в процессе выращивания сельскохозяйственных культур) и косвенных (предшествующих и последующих) выбросов ПГ, связанных с растениеводством.

Ф.3.2. Расширение применения технологии на основе углерода-13 на масштабы поля

251. Инновации в области углерода-13 теперь позволяют нам расширить масштабы исследований геохимического цикла углерода с ограниченных по размеру лабораторных экспериментов до масштабов поля. Для такого масштабирования решающее значение имеют передовые приборы для проведения анализа углерода-13 в реальном времени, такие как лазерный анализатор изотопов углерода для оценки выбросов CO_2^{24} . Кроме того, используя маркировку растительных материалов изотопами углерода-13, можно оценить оборот органического вещества в почве, его секвестрацию и стабилизацию в агроэкосистемах. Лаборатория почвенных и водных ресурсов и питания растений МАГАТЭ Агентства занимается НИОКР в области выбросов CO_2 , и в настоящее время маркированные углеродом-13 растительные материалы доступны государствам-членам. Эти технологические инструменты, основанные на использовании изотопов углерода-13, не только помогут повысить устойчивость землепользования к изменению климата, но и понять какое дополнительное воздействие на содержание углерода в почвах и уровень выбросов CO_2 может возникать в рамках различных климатических сценариев (изменение температуры, различное количество осадков). Эти методы дают однозначную оценку того, сколько углерода секвестрируется в почве или высвобождается из различных почвенных углеродных пулов²⁵.

²⁴ Müller, C., et al., Quantification of N_2O emission pathways via a ^{15}N tracing model, *Soil Biology and Biochemistry* 72 (2014) 44–54.

²⁵ Keidel, L., et al., Depth-dependent response of soil aggregates and soil organic carbon content to long-term elevated CO_2 in a temperate grassland soil, *Soil Biology and Biochemistry* 123 (2018) 145–154.

Ф.3.3. Метод отслеживания азота-15 для измерения N_2O и выявления источников N_2O

252. Для понимания выбросов N_2O очень важно количественно оценить потери азота в результате выбросов не являющегося парниковым газом молекулярного азота (N_2), который выделяется в гораздо больших количествах, чем N_2O . Для получения точных измерений выделения ПГ из почвы ученые из Совместной программы ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в продовольственной и сельскохозяйственной областях и Университета им. Юстуса Либиха в Гисене, Германия, в рамках совместной работы провели многочисленные лабораторные и полевые эксперименты. Результатом этих исследований стала разработка метода отслеживания азота-15, который отличается от метода изотопного разбавления и может точно измерять выбросы ПГ и отпределять их источники в почве в почве в ходе краткосрочных и долгосрочных полевых исследований^{26, 27}.

253. В недавней работе была подчеркнута важность изотопных методов, которые дают представление о движении и преобразовании азота и углерода в наших агроэкосистемах с точки зрения их содержания в почвах и выделения в атмосферу. Понимание сложной природы почв и взаимосвязанных факторов, влияющих на плодородие почв и выработку ПГ, является необходимым условием для разработки методов ведения сельского хозяйства, не причиняющих климатического ущерба. На рис. F-6 приведен пример полученных при помощи такого метода отслеживания результатов проведения количественной оценки последовательности выбросов N_2O с сельскохозяйственного угодья, постоянно покрытого травянистой растительностью. Существуют аналогичные методы для определения процессов выделения и поглощения CH_4 и CO_2 с помощью применения подходящих источников углерода-13.

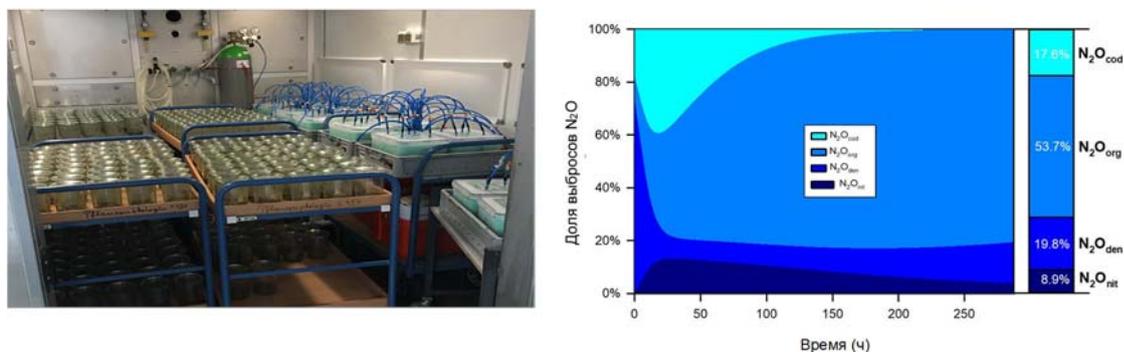


Рис. F-6: Вид лабораторной инкубационной установки для проведения исследования по отслеживанию азота-15N (слева) и результаты исследования по отслеживанию азота в целях определения последовательности выбросов N_2O с постоянно покрытого травянистой растительностью угодья; N_2O_{nit} = нитрификация, N_2O_{den} = денитрификация, N_2O_{org} = гетеротрофная нитрификация, N_2O_{cod} = кодификация. (Источник: Müller et al. (2014)²⁸).

Ф.3.4. Новое в области измерения NH_3 в масштабах поля

254. Отсутствие недорогих и технологически простых методов измерения означало, что во всем мире раньше проводились лишь ограниченные полевые исследования для измерения потерь NH_3 . Теперь уже существует несколько высокотехнологичных методов, таких как аэродинамические

²⁶ Müller, C., et al., Quantification of N_2O emission pathways via a ^{15}N tracing model. Soil Biology and Biochemistry 72 (2014) 44–54.

²⁷ 26: Moser, G., et al., Explaining the doubling of N_2O emissions under elevated CO_2 in the Giessen FACE via in-field ^{15}N tracing. Global Change Biology 24 (2014) 3897–3910.

²⁸ Müller, C., et al., Quantification of N_2O emission pathways via a ^{15}N tracing model, Soil Biology and Biochemistry 72 (2014) 44–54.

трубы, внутрирезонаторная лазерная спектроскопия и микрометеорологические методы. Однако эти методы являются дорогостоящими и для их применения нужны высококвалифицированные полевые технические специалисты. Из-за этого они оказываются недоступными для многих развивающихся стран и организаций, желающих провести измерения потерь NH_3 в условиях различных систем ведения сельского хозяйства.

255. Для разработки недорогого и надежного метода измерения NH_3 МАГАТЭ совместно с Бразильской корпорации сельскохозяйственных исследований («Эмбрапа») и Институтом агрономических наук Параны (ИАПАР) разработало простую емкость NH_3 из пластиковой бутылки.



Рис. F-7: Вид простой открытой емкости, используемой для измерения испарения NH_3 .
 Подробно эта емкость была описана в работах Araújo et al. (2009)²⁹ и Jantalia et al. (2012)³⁰.

256. Для проверки и подтверждения точности этого недавно разработанного метода измерения NH_3 был использован метод азота-15. На поверхность лизиметров, установленных в промежутках между рядами посевов кукурузы, наносилась мочевины, помеченная азотом-15. На каждый лизиметр были установлены сделанные из ПЭТ-бутылок открытые емкости (рис. F-7) с четырьмя различными концентрациями нанесения азота с различными расстояниями между емкостью и поверхностью почвы, а также с функцией перемещения камеры в течение периода мониторинга или без нее (наблюдение в статике или в динамике).

257. Этот способ использования простой открытой емкости является подходящим и надежным методом для проведения количественной оценки потерь NH_3 в результате испарения из сельскохозяйственных почв, при этом затраты на производство одной такой емкости составляют менее 1 долл. США. В настоящее время и развитые, и развивающиеся страны внедряют этот новый метод измерения NH_3 в целях содействия мониторингу и реагированию на воздействие связанных с животноводством и сельским хозяйством выбросов NH_3 на окружающую среду. Его эффективность была сопоставлена с несколькими другими существующими методологиями в этой области, использующими метод азота-15, которые дали очень похожие результаты. В итоге он стал стремительно завоевывать признание благодаря своей практичности, точности и надежности, и уже успешно используется учеными в Бразилии, Испании, Исламской Республике

²⁹ Araújo, E.S., et al., Calibration of a semi-opened static chamber for the quantification of volatilized ammonia from soil, *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 44(7) (2009) 769–776.

³⁰ Jantalia, C.P., et al., Nitrogen source effects on ammonia volatilization as measured with semi-static chambers, *Agronomy Journal* 104(6) (2012) 1595–1603.

Иран, Чили, Китае, Коста-Рике, Пакистане, Соединенных Штатах Америки и Чили. С помощью этого прибора можно точно измерять потери NH_3 в целях ведения сельского хозяйства методами, не причиняющими климатического ущерба, для того чтобы еще больше сокращать выбросы парниковых газов и смягчать воздействие на окружающую среду.

Ф.3.5. Заглядывая в будущее

258. Учитывая такой прогресс в области измерительного оборудования и моделирования ожидается продолжение исследований и разработок в области проведения полевых экспериментов, а также в целях продвижения конкретных применений на уровне агроэкосистем. Новый ПКИ по этой теме будет начат в 2020 году в целях дальнейшего углубления понимания сложных процессов выбросов ПГ и подготовки большего количества вариантов смягчения последствий в результате сокращения выбросов ПГ, а также вариантов секвестрации углерода.



IAEA

Международное агентство по атомной энергии

www.iaea.org

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

GC(64)/INF/2