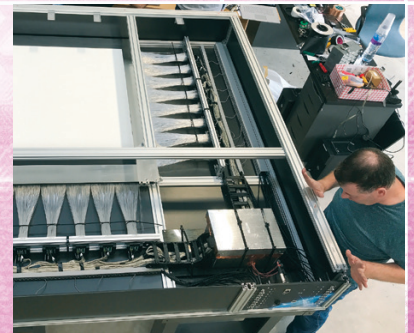


ОБЗОР ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

2019



IAEA

Международное агентство по атомной энергии

Фото на обложке предоставили: КАЭГ; «Гезельшафт фюр нуклеар-сервис мбх»;
МАГАТЭ; «Линкеос технолоджи лтд.»; «Сазерн ньюклар»

Обзор ядерных технологий — 2019

GC(63)/INF/2

Отпечатано МАГАТЭ в Австрии
Август 2019 года

IAEA/NTR/2019

Предисловие

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

В «Обзоре ядерных технологий — 2019» рассказывается о значительных событиях, происшедших в мире в 2018 году в следующих отдельных областях: энергетические применения, атомные и ядерные данные, применения ускорителей и исследовательских реакторов, ядерные методы в сфере организации производства продовольствия, использования почв и животноводства, диагностика и лечение рака, новые достижения в изучении изотопов в осадках, последствия подкисления океана и сохранение культурного наследия.

Проект «Обзора» был представлен Совету управляющих на его сессии в марте 2019 года в документе GOV/2019/4. Окончательный вариант был подготовлен с учетом обсуждения, состоявшегося в Совете управляющих, а также замечаний, поступивших от государств-членов.

Содержание

Резюме	1
Обзор ядерных технологий — 2019	1
Основной доклад.....	1
A. Энергетические применения.....	1
A.1. Ядерная энергетика сегодня.....	1
A.1.1. Страны, эксплуатирующие АЭС.....	3
A.1.2. Страны, расширяющие свои ядерно-энергетические программы	5
A.1.3. Страны, приступающие к развитию ядерной энергетики.....	7
A.2. Прогнозы развития ядерной энергетики.....	8
A.3. Топливный цикл.....	9
A.3.1. Начальная стадия топливного цикла.....	9
A.3.2. Обеспечение гарантированных поставок	12
A.3.3. Конечная стадия топливного цикла	13
A.4. Вывод из эксплуатации, восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами	14
A.4.1. Вывод из эксплуатации ядерных установок.....	14
A.4.2. Восстановительные мероприятия	15
A.4.3. Обращение с радиоактивными отходами.....	17
B. Атомные и ядерные данные.....	20
C. Применения ускорителей и исследовательских реакторов	22
C.1. Ускорители и соответствующие контрольно-измерительные приборы	22
C.1.1. Революционные технологии с использованием ионно-пучковой инженерии.....	22
C.1.2. Моделирование повреждения реакторных материалов с помощью ускорителей.....	22
C.1.3. Крупномасштабный мониторинг загрязнения воздуха с использованием ядерных аналитических методов	23
C.1.4. Полевые измерения для определения характеристик радиоактивного загрязнения поверхности.....	24
C.2. Исследовательские реакторы.....	25
C.2.1. Производство холодных нейтронов с использованием новых технологий замедлителей	28
D. Радиационные технологии.....	29
D.1. Мюонная томография: использование космических лучей	29
D.1.1. Области применения.....	30
E. Здоровье человека.....	32
E.1. Калибровка современных рентгеновских маммографов	32
E.1.1. Общие сведения.....	32
E.1.2. Характеристики излучения	32
E.1.3. Дозиметры	33

E.1.4. Калибровки.....	33
E.1.5. Перспективы.....	34
E.2. Радиоуправляемая хирургия в лечении гинекологических раковых заболеваний.....	35
E.2.1. Общие сведения.....	35
E.2.2. Рак шейки матки.....	35
E.2.3. Рак эндометрия.....	35
E.2.4. Рак яичников.....	36
E.2.5. Будущие тенденции.....	36
F. Продовольствие и сельское хозяйство.....	37
F.1. Новые события, указывающие на изменение парадигмы в области облучения пищевых продуктов и фитосанитарного облучения.....	37
F.2. Использование ядерных технологий для быстрой адаптации к изменению климата сельскохозяйственных культур и систем земледелия.....	40
F.2.1. Использование маркерной мутационной селекции для ускоренного выведения климатически оптимизированных сортов растений.....	41
F.2.2. Использование рентгеновской компьютерной томографии для высокопроизводительного неинвазивного фенотипирования растений.....	43
F.3. Инновационное применение изотопных и ядерных методов в питании животных.....	43
F.3.1. Использование ядерных методов для анализа и улучшения питания пастбищных животных.....	44
F.3.2. Н-алканы помогают оценить потребление пищи, усвояемость и пищевые предпочтения.....	45
F.3.3. БИК-спектроскопический анализ остаточных питательных веществ в фекалиях помогает оценить содержание питательных веществ в пище, самостоятельное потребление пищи и пищевые предпочтения.....	45
F.3.4. Энерго-дисперсионная рентгеновская флюоресценция позволяет точно определить содержание минералов в фураже.....	46

Резюме

1. На конец 2018 года во всем мире насчитывалось 450 действующих ядерных энергетических реакторов, а общемировая генерирующая мощность АЭС достигла рекордных 396,4 ГВт (эл.): по сравнению с 2017 годом рост составил 5 ГВт (эл.). В течение 2018 года к энергосети были подключены девять реакторов, семь реакторов были окончательно остановлены и началось сооружение пяти реакторов. Согласно ближайшим и долгосрочным прогнозам, средоточием роста по-прежнему будет Азия, где находится 35 из 55 строящихся реакторов и 58 из 68 реакторов, подключенных к энергосетям с 2005 года.

2. Из 30 государств-членов, в которых в настоящее время эксплуатируются атомные электростанции (АЭС), 14 либо сооружают новые реакторы, либо завершают ранее приостановлено строительство. Еще 28 стран изучают возможность включения ядерной энергетики в национальную структуру энергопроизводства, разрабатывают соответствующие планы или уже активно работают над их осуществлением. Четыре страны, приступающие к развитию ядерной энергетики, начали строительство своих первых АЭС, несколько других стран находятся на продвинутых этапах подготовки инфраструктуры.

3. Согласно подготовленным в 2018 году Агентством высоким прогнозам роста глобальной мощности ядерной энергетики, к 2030 году будет достигнуто увеличение на 30% по сравнению с текущими уровнями и к 2050 году мощность вырастет почти в два раза, а в случае низких прогнозов ядерная мощность продолжит сокращаться в течение примерно десяти лет, после чего к 2050 году восстановится до уровня 2030 года. В недавнем специальном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата были представлены пути сокращения выбросов, которые указывают на то, что вклад ядерной энергетики в смягчение последствий изменения климата необходимо существенно увеличить.

4. В 26-м издании публикуемой раз в два года «Красной книги» продемонстрировано, что мировых запасов урана более чем достаточно для удовлетворения прогнозируемых потребностей в нем в обозримом будущем независимо от того, какую роль в конечном счете будет играть атомная энергетика в удовлетворении будущего спроса на электроэнергию и в достижении глобальных климатических целей. Однако низкие цены на уран по-прежнему ограничивают способность компаний инвестировать средства в геолого-разведочные работы, проведение технико-экономических исследований и строительство новых объектов. Мировые мощности по конверсии, обогащению и изготовлению топлива превышают объем спроса, указанный как в высоком, так и в низком прогнозе общей установленной мощности АЭС.

5. Что касается Банка низкообогащенного урана (НОУ) МАГАТЭ, в феврале 2018 года вступило в силу соглашение о транзите с Китаем, а в сентябре и ноябре 2018 года были подписаны договоры о перевозке с уполномоченными организациями из Российской Федерации и Казахстана, соответственно. Агентство подписало контракты на закупку НОУ с АО «Национальная атомная компания "Казатомпром"» и «Орано-Сикль».

6. На сегодняшний день из АЭС было выгружено около 400 000 тонн тяжелого металла в виде отработавшего ядерного топлива, около 25% этого объема подвергается переработке. Остальное хранится в бассейнах реакторов и во вне реакторных хранилищах отработавшего ядерного топлива, которых насчитывается 151 в 27 странах.

7. 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.

8. 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 Гане и Малайзии пройдены важные этапы в осуществлении новаторских проектов по скважинному захоронению изъятых из употребления закрытых радиоактивных источников. В мире функционируют пункты захоронения для всех других категорий радиоактивных отходов.

9. По всему миру продолжилось усиление безопасности на АЭС и исследовательских реакторах, а Агентство проводило многочисленные независимые экспертизы и оказывало консультативные услуги во всех областях безопасности. Как и раньше, государства-члены запрашивали у Агентства помощь в таких областях, как управление старением, управление внутренними и внешними опасностями, контроль загрязнения, учет опыта эксплуатации, разработка регулирующей основы для ядерно-энергетической программы и реакторов малой и средней мощности или малых модульных реакторов, а также вывод установок из эксплуатации и обращение с радиоактивными отходами.

10. В 2018 году было опубликовано несколько библиотек ядерных данных, которые важны для проведения исследований и разработок ядерных применений как в энергетике, так и в других отраслях. Начала работу Международная сеть по оценке ядерных данных (INDEN), цель которой — стимулировать проведение оценки сечений нейтронов тех нуклидов, которые имеют особую значимость для ядерных технологий.

11. Новые технологии и измерительные приборы, основанные на использовании ускорителей и ионных пучков, показали впечатляющие результаты в таких областях, как защищенная связь, моделирование повреждения материалов, мониторинг загрязнения воздуха, смягчение воздействия оксидов азота и оксидов серы на изменение климата и загрязнение окружающей среды и измерение поверхностного загрязнения.

12. В 55 странах находящиеся в эксплуатации 252 исследовательских реактора продолжают играть важную роль в поддержке работ, осуществляемых в медицинском, промышленном, образовательном и ядерно-энергетическом секторах. В семи странах сооружаются новые исследовательские реакторы, а в ряде других разрабатываются планы или рассматривается возможность их строительства. На сегодняшний день 98 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 2018 году малогабаритный реактор — источник нейтронов в Нигерии был переведен с ВОУ на НОУ-топливо, а облученное ВОУ-топливо было возвращено в Китай. Компания Curium, предлагающая решения в области ядерной медицины, завершила перевод планового производства на использование исключительно НОУ, и теперь примерно 75% всего реализуемого в мире молибдена-99 вырабатывается без использования ВОУ. Хотя непродолжительные отключения некоторых крупных перерабатывающих предприятий и установок по облучению мишеней из молибдена-99 в 2018 году привели к некоторому дефициту поставок на региональном уровне, усилия производителей и медиков-практиков позволили сгладить последствия колебаний в объемах производства.

13. Мюонная радиография — это развивающаяся технология, в которой используется природный радиационный фон, а именно мюоны космических лучей. Космические мюоны обладают примерно в 10 тысяч раз большей энергией, чем типовое рентгеновское излучение, и поэтому способны проникать в очень большие конструкции, не оставляя после себя радиационных доз, превышающих фоновый уровень. Методы мюонной радиографии можно использовать как неразрушающий инструмент для определения целостности крупных строительных конструкций, например зданий, мостов и тоннелей. Эти технологии также применимы в геофизике, археологии и в области ядерной безопасности и физической ядерной безопасности, а также обращения с радиоактивными отходами.

14. Каждый год миллионы женщин проходят низкодозовую рентгеновскую маммографию для выявления рака молочной железы. Главное в этом методе — использовать минимально возможную дозу облучения и при этом обеспечивать максимальное качество визуализации молочных желез любого размера и при любом составе ткани. Для этого в современных маммографах используется широкий спектр энергий пучка. Дозиметрические лаборатории вторичных эталонов помогают медицинским учреждениям обеспечивать прослеживаемость их доз до согласованных международных норм. Необходимо регулярно выполнять калибровку дозиметрического оборудования. Для точной дозиметрии рекомендуется использовать высококачественные ионизационные камеры, отличающиеся постоянством реагирования во всем диапазоне энергий пучка, которые применяются в клиниках.

15. Радиоуправляемая хирургия в лечении гинекологических раковых заболеваний позволяет снизить уровень краткосрочной и отдаленной морбидности по сравнению с полной лимфодиссекцией. Сигнальные лимфатические узлы играют ключевую роль в метастазировании, поэтому их выявление и биопсия принципиально важны в лечении многих видов рака. Биопсия сигнального лимфатического узла считается единственным надежным методом скрининга лимфоузлов на стадии микрометастазирования. Наиболее важным достижением в радиоуправляемом хирургическом лечении гинекологического рака является появление в операционных таких инструментов, как портативная гамма-камера.

16. Облучение пищевых продуктов — важная часть послепроизводственного процесса, которая обеспечивает отсутствие в продуктах микробов, вызывающих пищевое отравление, вредителей и портящих микроорганизмов, что позволяет увеличить их срок хранения. Традиционно работа по облучению пищевых продуктов нередко передается на аутсорсинг отдельным крупным предприятиям, однако появление новых облучателей и смежных технологий открывает возможности для использования новых подходов. Благодаря новым технологиям уменьшается размер электронно-лучевых генераторов и генераторов рентгеновского излучения, а новые разработки в области облучения при помощи ускорителя заряженных частиц свидетельствуют о том, что в будущем устройства для облучения может быть проще монтировать на конвейерах по упаковке пищевых продуктов.

17. Масштабные потери сельскохозяйственных культур, вызванные изменением климата, требуют разработки инновационных схем селекции в целях обеспечения глобальной продовольственной безопасности. Сочетание таких методов, как мутационная селекция растений, маркерная селекция и высокопроизводительное фенотипирование, дает мощный инструмент для быстрой адаптации растений к изменению климата. Создаются экономически эффективные технологические процессы для выявления индуцированных мутаций, вызывающих тот или иной фенотип, и эти технологии и методики все активнее осваиваются государствами-членами.

18. Согласно прогнозу, к 2050 году общемировой спрос на пищевые продукты животного происхождения вырастет на 60–70%. Чтобы удовлетворить этот спрос, потребуется технологическая интенсификация производственных систем в животноводстве. Будет необходимо в два раза увеличить доступность кормовых ресурсов и пастбищных угодий. Инновационное применение изотопных и ядерных технологий позволит сформировать набор данных о потреблении кормов, пищевых предпочтениях и содержании питательных веществ в травах, потребляемых сельскохозяйственными животными, чтобы разрабатывать надлежащие стратегии управления кормлением и выпасом. Исследования в области питательных микроэлементов могут создать базу для использования необходимых минеральных добавок в целях максимального улучшения здоровья животных и повышения их продуктивности.

Обзор ядерных технологий — 2019

Основной доклад

А. Энергетические применения

А.1. Ядерная энергетика сегодня

1. По состоянию на 31 декабря 2018 года в мире эксплуатировалось 450 ядерных энергетических реактора суммарной мощностью 396,4 ГВт (эл.)¹ (см. таблицу А-1), что является самым высоким показателем за все время. Это приблизительно на 8 ГВт (эл.) превышает суммарную мощность 2017 года. Из общего числа находящихся в эксплуатации реакторов 82,2% — это реакторы с легководным замедлителем и теплоносителем, 10,9% — реакторы с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем, 3,1% — легководные реакторы с графитовым замедлителем и 3,1% — газоохлаждаемые реакторы. Три установки представляют собой быстрые реакторы с жидкометаллическим теплоносителем. На 376 легководных реакторах было произведено почти 89% электроэнергии, вырабатываемой на АЭС.

2. В 2018 году к сети было подключено девять новых реакторов с водой под давлением (PWR): семь в Китае («Хайян-1», «Хайян-2», «Саньмэнь-1», «Саньмэнь-2», «Тайшань-1», «Гяньвань-4» и «Янцзян-5») и два в Российской Федерации (первый энергоблок Ленинградской АЭС-2 и четвертый энергоблок Ростовской АЭС). Были окончательно остановлены семь реакторов: на Тайване, Китай, — «Цзиньшань-1»; в Японии — «Иката-2», «Охи-1», «Охи-2» и «Онагава-1»; в Российской Федерации — энергоблок 1 Ленинградской АЭС; в Соединенных Штатах Америки — Ойстер-Крик).

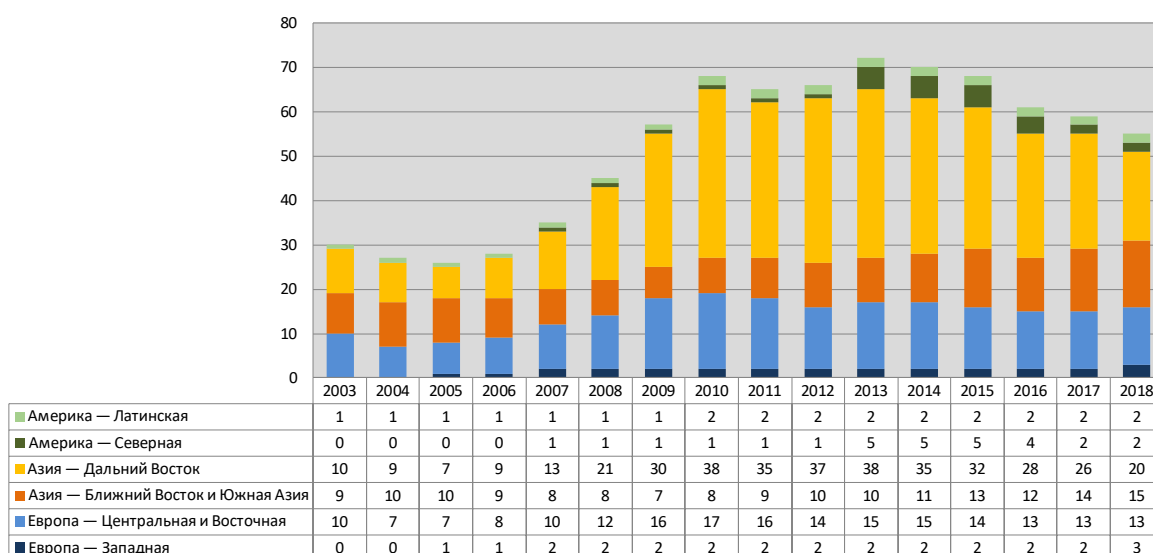


РИС. А-1. Число строящихся реакторов по регионам

(Источник: Информационная система по энергетическим реакторам МАГАТЭ

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

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

3. По состоянию на 31 декабря 2018 года на стадии строительства находилось 55 реакторов. Началось строительство АЭС «Аккую-1» (Турция), второго энергоблока Курской АЭС (Российская Федерация), «Руппур-2» (Бангладеш), «Шин-Кори-б» (Республика Корея) и «Хинкли-Пойнт С-1» (Соединенное Королевство). Согласно прогнозам, рост мощностей, а также развитие ядерной энергетики в краткосрочной и долгосрочной перспективе будет происходить преимущественно в Азии (рис. А-1), где строится 35 реакторов. В Азии также находятся 58 из 68 новых реакторов, подключенных к энергосетям в период с 2005 года.

Таблица А-1. Действующие и строящиеся ядерные энергетические реакторы в мире (по состоянию на 31 декабря 2018 года)^а

СТРАНА	Действующие реакторы		Строящиеся реакторы		Электроэнергия, произведенная на АЭС в 2018 году		Суммарный опыт эксплуатации на конец 2018 года	
	Число энергоблоков	Всего МВт (эл.)	Число энергоблоков	Всего МВт (эл.)	ТВт·ч	% от общего объема производства	Годы	Месяцы
АРГЕНТИНА	3	1 633	1	25	6,5	4,7	85	2
АРМЕНИЯ	1	375			1,9	25,6	44	8
БАНГЛАДЕШ			2	2160				
БЕЛАРУСЬ			2	2 220				
БЕЛЬГИЯ	7	5 918			27,3	39,0	296	7
БОЛГАРИЯ	2	1 966			15,4	34,7	165	3
БРАЗИЛИЯ	2	1 884	1	1 340	14,8	2,7	55	3
ВЕНГРИЯ	4	1 902			14,9	50,6	134	2
ГЕРМАНИЯ	7	9 515			71,9	11,7	839	7
ИНДИЯ	22	6 255	7	4 824	35,4	3,1	504	11
ИРАН, ИСЛАМСКАЯ РЕСПУБЛИКА	1	915			6,3	2,1	7	4
ИСПАНИЯ	7	7 121			53,4	20,4	336	1
КАНАДА	19	13 554			94,4	14,9	750	6
КИТАЙ	46	42858	11	10982	277,1	4,2	322	11
КОРЕЯ, РЕСПУБЛИКА	24	22 444	5	6700	127,1	23,7	547	5
МЕКСИКА	2	1 552			13,2	5,3	53	11
НИДЕРЛАНДЫ	1	482			3,3	3,1	74	0
ОБЪЕДИНЕННЫЕ АРАБСКИЕ ЭМИРАТЫ			4	5 380				
ПАКИСТАН	5	1 318	2	2 028	9,3	6,8	77	5
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ	36	27 252	6	4573	191,3	17,9	1 298	6
РУМЫНИЯ	2	1 300			10,5	17,2	33	11
СЛОВАКИЯ	4	1 814	2	880	13,8	55,0	168	7
СЛОВЕНИЯ	1	688			5,5	35,9	37	3
СОЕДИНЕННОЕ КОРОЛЕВСТВО	15	8 923	1	1 630	59,1	17,7	1 604	7
СОЕДИНЕННЫЕ ШТАТЫ АМЕРИКИ	98	99 061	2	2 234	808,0	19,3	4 408	6
ТУРЦИЯ			1	1 114				
УКРАИНА	15	13 107	2	2 070	79,5	53,0	503	6
ФИНЛЯНДИЯ	4	2 784	1	1 600	21,9	32,4	159	4
ФРАНЦИЯ	58	63 130	1	1 630	395,9	71,7	2 222	4
ЧЕШСКАЯ РЕСПУБЛИКА	6	3 932			28,3	34,5	164	10

СТРАНА	Действующие реакторы		Строящиеся реакторы		Электроэнергия, произведенная на АЭС в 2018 году		Суммарный опыт эксплуатации на конец 2018 года	
	Число энергоблоков	Всего МВт (эл.)	Число энергоблоков	Всего МВт (эл.)	ТВт·ч	% от общего объема производства	Годы	Месяцы
ШВЕЙЦАРИЯ	5	3 333			24,5	37,7	219	11
ШВЕЦИЯ	8	8 613			65,9	40,3	459	0
ЮЖНАЯ АФРИКА	2	1 860			10,6	4,7	68	3
ЯПОНИЯ	38	36 476	2	2 653	49,3	6,2	1 863	2
Итого ^{b,c}	450	396 413	55	56 643	2563,0		17 880	11

а. Данные из Информационной системы Агентства по энергетическим реакторам (ПРИС) (www.iaea.org/pris).

б. Примечание. Суммарные показатели включают следующие данные по Тайваню, Китай: 4 энергоблока мощностью 3444 МВт (эл.) в эксплуатации; 2 энергоблока мощностью 2600 МВт (эл.) в стадии строительства; на АЭС выработано 26,7 ТВт час электроэнергии, что составляет 11,4% общего объема ее производства.

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

А.1.1. Страны, эксплуатирующие АЭС

4. По состоянию на конец 2018 года из 450 эксплуатируемых АЭС 66% находились в эксплуатации более 30 лет. В настоящее время на все большем числе АЭС осуществляются программы по обеспечению долгосрочной эксплуатации и управлению старением.

5. Венгрия почти закончила продление периода эксплуатации своих реакторов. Управление по атомной энергии Венгрии выдало разрешение на продление эксплуатации четырех энергоблоков АЭС «Пакш» на 20 лет свыше их первоначальной лицензии на 30 лет. Начало строительства двух дополнительных энергоблоков на АЭС «Пакш» (так называемый проект «Пакш-2») намечено на конец 2020 года, а начало коммерческой эксплуатации ожидается в 2026 и 2027 годах.

6. В мае 2018 года в Исламской Республике Иран были начаты работы по стабилизации грунта на запланированном месте строительства энергоблока 2 АЭС «Бушер» мощностью в 1050 МВт (эл.), первого из двух запланированных. Предполагается, что энергоблоки 2 и 3 АЭС «Бушер» будут подключены к энергосети в 2026 и 2027 годах, соответственно.

7. В Канаде начались работы по реконструкции второго энергоблока АЭС «Дарлингтон». Цель реконструкции всех четырех энергоблоков CANDU, которая должна быть завершена в 2026 году, — обеспечить эксплуатацию АЭС до 2055 года. В августе 2018 года АЭС «Пикеринг» была выдана лицензия на эксплуатацию в течение 10 лет, причем она предусматривает три этапа: постоянная коммерческая эксплуатация до 2024 года; работы по стабилизации, такие как разгрузка и обезвоживание активной зоны после останова; безопасное хранение под наблюдением.

8. Британское правительство, намеренное наращивать ядерный потенциал в рамках своей стратегии 2017 года «Чистый рост», приняло меры для содействия строительству новых АЭС, и промышленность предлагает создать до 17,8 ГВт (эл.) новых мощностей. Ведется работа по подготовке площадки для строительства первого реактора на АЭС «Хинкли-Пойнт С», запуск которого намечен на 2025 год.

9. В июле 2018 года была завершена модернизация АЭС «Козлодуй» в Болгарии, благодаря которой срок ее эксплуатации может быть продлен до 2051 года. В июне 2018 года кабинет отменил решение 2012 года о прекращении строительства АЭС «Белене», в результате чего проект был вновь запущен, а работа на площадке продолжена.

10. В 2018 году в Мексике проводились изыскания возможности повышения установленной мощности АЭС «Лагуна-Верде».

11. В июле 2018 года Армения подтвердила проведение работ по продлению эксплуатационного периода второго энергоблока АЭС «Мецамор».

12. Румыния планирует дополнительно повысить ядерногенерирующие мощности путем создания и ввода в эксплуатацию энергоблоков 3 и 4 на АЭС «Чернаводэ». В мае 2018 года было принято решение остановить в 2026 году первый энергоблок АЭС «Чернаводэ» для реконструкции.

13. В августе 2018 года Южная Африка опубликовала свой последний комплексный план в отношении ресурсов и национального развития, согласно которому роста потенциала в области ядерной энергии не предвидится до 2030 года.

14. В мае 2018 года чешская энергетическая компания ЧЭЗ провела исследование, в ходе которого не было выявлено принципиальных препятствий с точки зрения безопасности или техники для эксплуатации энергоблоков на АЭС «Темелин» на протяжении 60 лет. Также в мае 2018 года правительство отложило решение о строительстве новых атомных энергоблоков.

15. В Бельгии планируется последовательно вывести из эксплуатации все АЭС к 2025 году. Согласно новой стратегии в сфере энергетики, принятой правительством в марте 2018 года, реактор «Дул-3» будет остановлен к 2022 году, «Тианж-2» — к 2023 году, а оставшиеся энергоблоки — в 2025 году. Ожидается, что в разрабатываемом в Испании комплексном национальном энергетическом и климатическом плане на 2021–2030 годы будет определена эволюция ядерной энергетики в структуре энергопроизводства страны, включая график закрытия АЭС. Германия по-прежнему проводит постепенный вывод из эксплуатации АЭС. Швейцария и Швеция сохраняют существующий атомный парк, работающий в плановом режиме.

16. Уровень эксплуатационной безопасности АЭС по-прежнему высок, о чем свидетельствуют показатели безопасности, информацию о которых собирает Агентство. На рис. А-2 показано количество внеплановых или аварийных остановов реакторов в автоматическом и ручном режимах на каждые 7000 часов (приблизительно один год) эксплуатации на каждую установку. Количество аварийных остановов является лишь одним из нескольких возможных и часто используемых показателей безопасности.

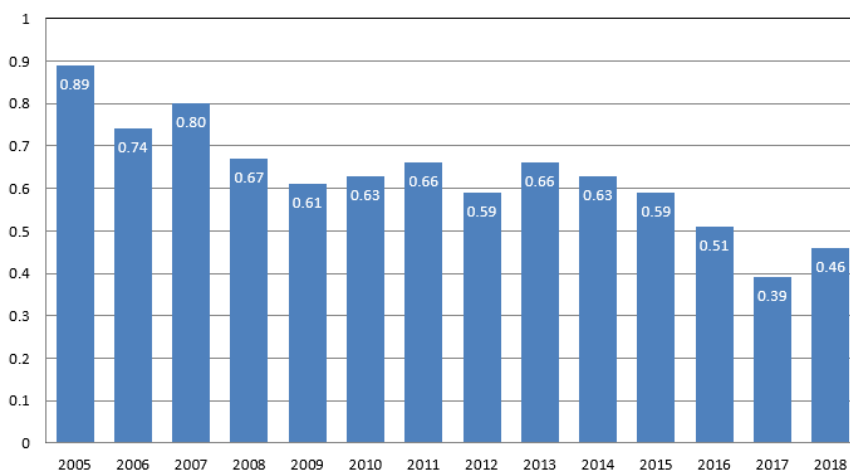


РИС. А-2. Средняя норма аварийных остановов: число остановов в автоматическом и в ручном режиме на каждые 7000 часов работы на каждую установку
(Источник: Информационная система по энергетическим реакторам МАГАТЭ

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

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

17. Из 30 государств-членов, эксплуатирующих АЭС, 11 ведут активные работы по строительству дополнительных атомных энергоблоков или расширению своих ядерно-энергетических программ. Из 55 текущих проектов по строительству реакторов 46 осуществляются в странах, уже имеющих ядерно-энергетическую программу: прежде всего в Индии (7), Китае (11) и Российской Федерации (6).

18. В настоящее время в Китае эксплуатируется 46 и сооружается 11 ядерных энергетических реакторов. В 2018 году к энергосети было подключено семь энергоблоков («Саньмэнь-1», «Саньмэнь-2», «Тайшань-1», «Хайян-1», «Хайян-2», «Янцзян-5» и «Тяньвань-4»). Китайский регулятор в сфере энергетики, Национальное управление по энергетике, планирует поставить цель — нарастить объем ядерных мощностей до 120–150 ГВт (эл.) к 2030 году. Китай также планирует к 2030 году построить 30 реакторов за рубежом.

19. В Российской Федерации в эксплуатации находится 37 ядерных энергетических реакторов, и в настоящее время строится еще 6 реакторов. Согласно последней Федеральной целевой программе Российской Федерации предполагается, что доля ядерной энергетики в электроснабжении к 2030 году составит 25–30%, к 2050 году — 45–50%, а к концу столетия — 70–80%. В апреле 2018 года Россия завершила строительство плавучей атомной электростанции «Академик Ломоносов», которая должна войти в строй в 2019 году.

20. Проект строительства АЭС «Олкилуото-3» с реактором EPR в Финляндии вступил в стадию работ по вводу в эксплуатацию по завершении «холодных» и «горячих» функциональных испытаний. Коммерческую эксплуатацию планируется начать в конце 2019 года. Финляндия имеет четыре действующих энергоблока и планирует расширить свою программу. Были продлены лицензии на эксплуатацию первого и второго энергоблоков «Олкилуото», благодаря чему стала возможна их эксплуатация до 2038 года включительно. Проект «Ханхикиви-1» остается на стадии рассмотрения лицензии, при этом начало строительства планируется на 2019 год.

21. В плане по энергетической безопасности Пакистана установлена цель: производство 8800 МВт (эл.) атомной энергии к 2030 году, в том числе 1100 МВт (эл.) на реакторе с водой под давлением; ожидается, что его строительство начнется в 2020 году, а коммерческая эксплуатация — в 2025 году.

22. В Соединенных Штатах Америки насчитывается 98 действующих коммерческих ядерных реакторов. Продолжается строительство третьего и четвертого энергоблоков типа AP1000 на АЭС «Вогтль» в штате Джорджия; эксплуатацию планируется начать в 2021 и 2022 годах. В июле 2018 года было объявлено, что одноблочная АЭС «Дуэйн-Арнольд» в Айове будет окончательно остановлена в конце 2020 года, за пять лет до истечения срока действия лицензии на ее эксплуатацию. Операторы подали заявки на продление срока эксплуатации энергоблоков 3 и 4 АЭС «Тёрки-Пойнт» во Флориде, энергоблоков 2 и 3 АЭС «Пич-Боттом» в Пенсильвании и энергоблоков 1 и 2 АЭС «Сарри» в Вирджинии с 60 до 80 лет. США — первая страна, в которой рассматривается вопрос о продлении срока эксплуатации АЭС до 80 лет. В сентябре 2018 года после почти 49 лет коммерческой эксплуатации прекратила работу одноблочная АЭС «Ойстер-Крик».

23. В Аргентине ведутся работы по продлению срока службы и модернизации энергоблока АЭС «Эмбальсе». На 2022 год намечена пуско-наладка и ввод в эксплуатацию ММР Carem-25 мощностью 30 МВт (эл.). В апреле 2018 года ядерный регулирующий орган продлил лицензию на эксплуатацию АЭС «Атуча-1» до 2024 года.
24. В марте 2018 года индийская «Ньюклар пауэр корпорейшн оф Индия лимитед» (НПКИЛ) и французская «Электрисите де Франс» (ЭДФ) подписали соглашение о строительстве запланированной АЭС «Джайтапур» с шестью реакторами EPR. В октябре Индия и Российская Федерация подписали соглашение о сооружении АЭС с шестью ВВЭР; место строительства будет определено позднее.
25. Правительство Бразилии намерено повысить производство атомной энергии и планирует возвести четыре новых реактора PWR, эксплуатация которых начнется в 2025–2030 годах. Строительство АЭС «Ангра-3» мощностью 1405 МВт (эл.) повторно началось в 2010 году; пуск изначально планировался на 2018 год, однако примерно на 60% готовности энергоблока прогресс остановился, и компания «Электронуклеар» планирует вновь начать строительство по модели, основанной на партнерстве. В мае в ходе экспертной оценки Агентства было установлено, что «Электронуклеар», государственный оператор АЭС «Ангра-1», достиг прогресса в управлении старением и готовности к длительной эксплуатации этого реактора.
26. Во Франции действуют 58 атомных энергоблоков, и до конца 2019 года планируется загрузить топливо в новый энергоблок на АЭС «Фламанвиль». Французское правительство заявляет, что стратегия развития атомной энергетики связана с целями, закрепленными в законе о переходе энергетического сектора к «зеленому росту» и многолетнем энергетическом плане, который предполагается принять до середины 2019 года. В проекте этого плана 2035 год установлен как крайний срок для сокращения доли атомной энергии в структуре производства электроэнергии страны до 50%. Для достижения этой цели к 2035 году будут закрыты 14 действующих реакторов. Правительство будет сотрудничать с ядерной отраслью в подготовке к 2021 году плана работы, который послужит основой для принятия решений о строительстве новых ядерных энергетических реакторов.
27. Согласно восьмому базовому плану спроса и предложения электричества в долгосрочной перспективе, подготовленному в декабре 2017 года, Республика Корея продолжит строительство пяти энергоблоков APR-1400 до 2023 года, однако строительства новых энергоблоков и продления срока эксплуатации существующих АЭС осуществляться не будет. В июне 2018 года оператор — Корейская компания по гидро- и ядерной энергетике — принял решение об останове второго по возрасту реактора в стране, «Ульсан-1», и основой для этого решения стал экономический анализ, проведенный в соответствии с государственной политикой энергетических преобразований. Этот реактор остановлен для планового технического обслуживания с мая 2017 года.
28. В июле 2018 года было объявлено, что третий энергоблок АЭС «Моховце» в Словакии, как ожидается, будет запущен во втором квартале 2019 года.
29. В июле 2018 года лицензия на эксплуатацию третьего энергоблока Ровенской АЭС на Украине была продлена на 20 лет, поэтому данная станция может продолжать работу до 2037 года. В 2018 году было завершено технико-экономическое обоснование продолжения строительства третьего и четвертого энергоблоков Хмельницкой АЭС. Согласно Энергетической стратегии Украины на период до 2035 года доля атомной энергетики в объеме производимой в стране электроэнергии составит к 2035 году 50%.

30. В июле 2018 года правительство Японии одобрило базовый энергетический план, согласно которому к 2030 году доля атомной энергии составит 20–22%. В июне 2018 года Токийская электроэнергетическая компания объявила план вывода из эксплуатации всех энергоблоков АЭС «Фукусима-дайни». В этом же месяце был вновь запущен четвертый энергоблок АЭС «Генкай» в соответствии с новыми регулирующими стандартами. В 2018 году было принято решение разрешить дальнейшую эксплуатацию третьего и четвертого энергоблоков АЭС «Охи» и второго энергоблока АЭС «Токай».

А.1.3. Страны, приступающие к развитию ядерной энергетики

31. Среди 28 государств-членов, которые изучают возможность включения ядерной энергетики в национальную структуру энергопроизводства, строят соответствующие планы или уже активно работают над их осуществлением, 19 государств приступили к проведению исследований по вопросам создания инфраструктуры ядерной энергетики, 5 государств уже приняли решение и готовят необходимую инфраструктуру и 5 государств подписали контракты и находятся в стадии подготовки или уже приступили к строительству.

32. В Объединенных Арабских Эмиратах (ОАЭ) продолжается строительство всех четырех реакторов АЭС «Барака». В конце 2019 — начале 2020 года планируется ввести в эксплуатацию первый энергоблок, а через год — второй. В 2018 году по запросу ОАЭ была проведена миссия по Комплексному рассмотрению ядерной инфраструктуры (ИНИР) третьего этапа. В Беларуси продолжается строительство первой АЭС в Островце, и ввод в эксплуатацию первого и второго энергоблоков намечен на 2019 и 2020 годы, соответственно. В Бангладеш была произведена первая заливка бетона в основание второго энергоблока АЭС «Руппур». Ввод в эксплуатацию первого и второго энергоблоков ожидается в 2024 и 2025 годах, соответственно. Планируется также проект строительства второй АЭС. В Турции вышло постановление о вступлении в силу нового ядерного законодательства. Началось строительство АЭС «Аккую», и ввод в эксплуатацию первого энергоблока ожидается в 2023 году. В Египте идет рассмотрение лицензии на площадку для строительства четырехблочной АЭС в Эд-Дабаа. Ожидается, что строительство начнется в 2020 году, а ввод в эксплуатацию первого энергоблока намечен на 2026 год. Египет запросил проведение миссии ИНИР второго этапа в октябре 2019 года.

33. Саудовская Аравия планирует одновременное строительство одного ММП и двух традиционных АЭС. Идут закупки для строительства двух традиционных АЭС. Ожидается, что строительство ММП начнется в 2020 году, первой крупной АЭС — в 2021 году, а ее ввод в эксплуатацию намечен на 2028 год. В июле 2018 года прошла миссия ИНИР второго этапа. В Иордании также разрабатывается двунаправленная ядерно-энергетическая программа: выбор к 2019 году и внедрение в 2027–2028 годах технологии ММП общей мощностью, в зависимости от спроса на электроэнергию, от 200 до 600 МВт (эл.), и, наиболее вероятно, после 2030 года — сооружение большого PWR мощностью около 1000 МВт (эл.). В октябре 2018 года Узбекистан подписал с Российской Федерацией соглашение о строительстве своей первой АЭС с двумя энергоблоками общей мощностью до 2400 МВт (эл.). Нигерия планирует четыре реактора по принципу «строительство-владение-эксплуатация-передача»; запуск первого энергоблока намечен на 2027 год. В Кении ввод в эксплуатацию первой АЭС запланирован на 2027 год, если будет принято решение о разработке ядерно-энергетической программы. В ноябре 2018 года была проведена миссия по вопросам проектирования площадки с учетом внешних событий. Кения запросила проведение повторной миссии ИНИР в августе 2019 года. Недавно Кения выразила интерес в создании исследовательского реактора перед строительством АЭС. В Польше ввод в эксплуатацию первого энергоблока запланирован на 2030 год, если правительство примет решение о реализации ядерно-энергетической программы.

34. Государства-члены продолжают получать помощь, которую Агентство оказывает в формировании необходимой национальной ядерной инфраструктуры, руководствуясь веховым подходом, поддерживающим создание безопасных, надежных и устойчивых ядерно-энергетических программ. Она включает проведение независимой экспертизы и экспертных миссий, учебных курсов и предоставление инструментов моделирования, которые системно охватывают 19 вопросов, касающихся ядерной инфраструктуры. В 2018 году в Нигере, ОАЭ, Саудовской Аравии, Судане и на Филиппинах были проведены пять миссий ИНИР, и после их учреждения в 2009 году всего было проведено 27 миссий в 20 государствах-членах.

А.2. Прогнозы развития ядерной энергетики

35. Согласно прогнозам Агентства (рис. А-3), подготовленным в 2018 году в консультации с региональными экспертами и отражающим последнюю информацию о политике и рыночной конъюнктуре, нет гарантий, что атомная энергетика сохранит свое текущее положение в глобальном энергобалансе. Согласно низкому прогнозу на период до 2030 года общая установленная мощность производства электроэнергии снизится более чем на 10% по сравнению с 392 ГВт (эл.), производившимися в конце 2017 года. Согласно высокому прогнозу к 2030 году мощность вырастет на 30% до 511 ГВт (эл.). В более долгосрочной перспективе согласно низкому прогнозу мощность продолжит снижаться примерно в течение десяти лет, а затем к 2050 году вернется к показателям 2030 года; доля атомной энергетики в мировом производстве энергии снизится до 2,8% по сравнению с текущим показателем в 5,7%. Согласно высокому прогнозу к 2050 году установленная мощность достигнет 748 ГВт (эл.), составив 5,8% мирового производства энергии.

36. Большая разница между низким и высоким прогнозами обусловлена неопределенностью, связанной с заменой большого числа реакторов, запланированной примерно на 2030 год и позднее, в особенности в Северной Америке и Европе.

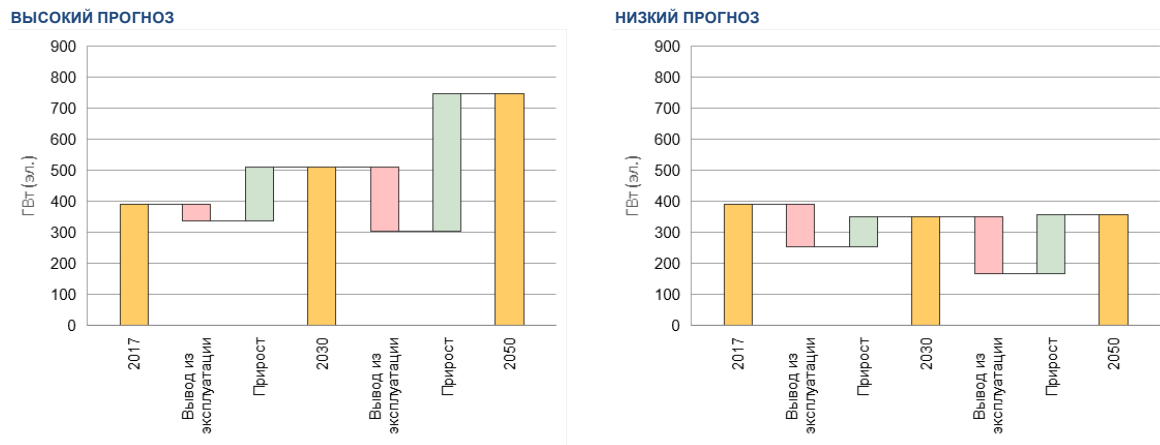


РИС. А-3. Высокий (слева) и низкий (справа) прогнозы общемировой мощности ядерной энергетики.

(Источник: *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050*, IAEA Reference Data Series No. 1, 2018)

37. Необходимость значительного расширения роли атомной энергетики в смягчении последствий изменения климата отражена в путях сокращения выбросов, представленных в недавнем специальном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению

климата, озаглавленном Global Warming of 1.5°C («Глобальное потепление на 1,5°C»)². Согласно большинству сценариев сокращения выбросов, ведущих к сдерживанию процесса глобального потепления до 1,5°C, доля атомной энергетики к 2050 году увеличивается: например, предполагается, что в четырех сценариях, представленных в разделе «Резюме для директивных органов», производство электроэнергии на АЭС вырастет к 2030 году по меньшей мере на 59%, а к 2050 году — до 501% по сравнению с 2010 годом.

38. Интерес к атомной энергии также по-прежнему силен в развивающихся странах, в особенности в Азии, где такие страны, как Индия и Китай стремятся удовлетворить быстро растущий спрос на электроэнергию и одновременно снизить выбросы ПГ. Ввиду этого международные переговоры по вопросам изменения климата, ведущиеся в рамках Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата, включая 24-ю сессию Конференции сторон (КС 24), прошедшую в декабре в Катовице, Польша, представляют важную возможность подчеркнуть потенциальную роль низкоуглеродной атомной энергетики в борьбе с глобальными климатическими и энергетическими проблемами.

А.3. Топливный цикл

А.3.1. Начальная стадия топливного цикла

Ресурсы и производство урана

39. В 26-м издании публикации Uranium 2018: Resources, Production and Demand («Уран — 2018: ресурсы, производство и спрос»)³ совместно подготавливаемой раз в два года Агентством по ядерной энергии ОЭСР и МАГАТЭ (так называемой «Красной книге») показано, что мировых запасов урана более чем достаточно для удовлетворения прогнозируемых потребностей в нем в обозримом будущем, независимо от того, какую роль в конечном итоге будет играть атомная энергия в удовлетворении будущего спроса на электроэнергию и достижении глобальных климатических целей. Тем не менее в этом докладе отмечается, что потребуются значительные инвестиции и технические экспертные знания для обеспечения того, чтобы урановые ресурсы доставлялись на производство своевременно, в том числе из рудников, в настоящее время переведенных в ремонтно-эксплуатационный режим.

40. Спотовые цены на уран оставались в 2018 году относительно невысокими и обычно держались в диапазоне от 47 до 59 долл. за килограмм, что чуть выше показателей 2017 года; на протяжении года сохранялась тенденция к незначительному росту. Низкие цены значительно ограничивали возможности компаний по изысканию средств для проведения разведки, технико-экономических исследований и осуществления новых проектов строительства. Как и раньше, многие урановые проекты были приостановлены или осуществлялись с низким уровнем финансирования. Некоторые проекты, осуществление которых было начато или которые находились на продвинутых стадиях строительства, сохранялись в законсервированном состоянии, или их разработка была снижена. Таким образом, общемировой объем добычи в 2018 году скорее всего будет аналогичен показателю 2017 года, который составил 59 342 тонны урана (т U), что меньше заявленного показателя 2016 года.

41. Лидирующим производителем урана в мире оставался Казахстан, получающий свой уран практически полностью методом подземного выщелачивания. После периода быстрого роста объемов добычи в 2000–2016 годах производство снизилось в 2017 году до 23 400 т U; ожидается, что в 2018 году будет достигнут аналогичный показатель.

² IPCC, Global Warming of 1.5°C, 1 October 2018, <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>

³ Опубликовано в декабре 2018 года по адресу <https://www.oecd-nea.org/ndd/pubs/2018/7413-uranium-2018.pdf>

42. В Канаде, которая занимает второе место по масштабам производства урана, в 2017 году на руднике «Сигар-Лейк» была достигнута полная производственная мощность 6925 т U; ожидается, что в 2018 году будет достигнут аналогичный показатель. Вместе с тем, объявленная в силу сохраняющегося низкого спроса и низких цен на уран в ноябре 2017 года приостановка на десять месяцев добычи на руднике «Мак-Артур-Ривер» и переработки на предприятии «Ки-Лейк», в 2018 году была продлена на неопределенный срок.

43. В Намибии на рудниках «Рёссинг» и «Хусаб» добыча велась весь 2018 год, в то время как урановый рудник «Лангер-Хайнрих» в мае 2018 года был переведен в ремонтно-эксплуатационный режим в связи с длительным периодом низких цен на уран. На других намибийских урановых месторождениях продолжалась ограниченная работа по технико-экономическому обоснованию.

44. В Австралии в 2018 году объем добычи методом подземного выщелачивания на урановом руднике «Фор-Майл» составил примерно 1500 т U. На проекте «Рейнджер» производство ведется исключительно из запасов руды, а операции по добыче и переработке должны прекратиться к январю 2020 года. В целом в Западной Австралии на нескольких урановых месторождениях были приостановлены работы или проводились некоторые дополнительные изыскания, но твердые даты в отношении строительства и открытия зафиксированы не были.

45. Продолжался процесс проведения технико-экономических и экологических исследований и получения разрешений в связи с проектом по добыче редкоземельных элементов, благородных металлов и урана на месторождении Кванефельд в Гренландии, Королевство Дания.

46. Китай продолжал увеличивать расходы на разведку и разработку урановых месторождений как в стране, так и за рубежом. В декабре 2018 года Китайская национальная урановая корпорация согласилась приобрести долю в 69% в руднике «Рёссинг», принадлежащему компании «Рио-Тинто»; это самый старый работающий рудник открытого типа, на котором добыто больше всего урана.

47. В целях подготовки своего обязательного заключения, необходимого для выдачи разрешения на строительство в Саламанке завода по производству уранового концентрата, испанский Совет по ядерной безопасности продолжил анализ документации по данному урановому проекту. Это одно из разрешений, необходимых для начала работы этого предприятия.

48. На руднике «Энхенью» в бразильском штате Баия ведется работа по подготовке технико-экономического обоснования и проработка вопросов регулирования в отношении еще одного открытого карьера недалеко от истощенного рудника «Кахеуейра».

Конверсия и обогащение

49. Нынешние мощности по конверсии и обогащению более чем достаточны для удовлетворения глобального спроса несмотря на то, что рынок сегментирован, а производство сконцентрировано на нескольких поставщиках.

50. В сентябре 2018 года в рамках проекта «Комюрекс II» компания «Орано» открыла в Трикастене, Франция, свой новый завод по конверсии. Спроектированный с применением самых современных технологий, завод «Филипп Кост» отличается очень низким уровнем потребления химикатов и энергии. На трех пламенных реакторах будет производиться до 15 000 т гексафторида урана (UF₆) в год.

51. Основной молекулярный метод лазерного обогащения урана — SILEX с использованием UF₆. В июне 2018 года австралийская компания «Силекс системс» решила не приобретать контрольный пакет акций компании «Глобал лазер энричмент» (ГЛЭ) —

совместного предприятия «Дженерал электрик» (ДЭ), «Хитати» и «Камеко». В «Силекс системс» заявили, что несмотря на позднюю стадию переговоров с ДЭ и «Хитати», с экономической моделью ГЛЭ связано слишком много рисков.

Изготовление топлива

52. В январе 2018 года американские компании «Лайтсбридж» и «Фраматом, инк.» занимающиеся технологиями ядерного топлива, основали «Энфишн» — совместное предприятие с равными долями участия, которое будет заниматься разработкой, лицензированием и коммерциализацией тепловыделяющих сборок (ТВС), содержащих современное металлическое топливо производства «Лайтсбридж». В этом топливе, изготавливаемом из циркониево-уранового сплава, используется уникальный состав и геометрия топливных стержней, что, по словам компании, положительно сказывается на экономичности, эффективности и безопасности существующих и будущих АЭС.

53. В январе 2018 года компания «Вестингауз электрик» объявила о подписании контракта с компанией «Энергоатом» на продление поставок ядерного топлива для реакторов ВВЭР на Украине с 2020 до 2025 года.

54. «Вестингауз» и его восемь европейских партнеров по консорциуму объявили в марте 2018 года об успешном завершении проекта, финансировавшегося Европейским союзом, который был направлен на диверсификацию поставки ядерного топлива для спроектированных в России реакторов ВВЭР-440 в Европе.

55. В марте 2018 года в первом энергоблоке АЭС «Эдвин И. Хатч» в США начались испытания со свинцом с использованием устойчивых к авариям ТВС производства «Глоубал ньюклар фьюэл» (ГНФ); их оболочка выполнена из сплава железа, хрома и алюминия (IronClad) и циркония с покрытием (ARMOR). В мае 2018 года шведское энергопредприятие «Ваттенфаль» выбрало совместное предприятие «ГЕНУСА», образованное испанской компанией ENUSA и ГНФ, в качестве поставщика топлива для восьми перезагрузок АЭС «Форсмарк» в 2020–2023 годах.

56. В апреле 2018 года российская топливная компания «ТВЭЛ» (входит в Государственную корпорацию по атомной энергии «Росатом») подписала соглашения с Организацией по атомной энергии Ирана и Ядерно-энергетической производственной и проектной компанией о замене топливных сборок конструкции УТВС на кассеты с топливом ТВС-2М в реакторе ВВЭР-1000 АЭС «Бушер» в Исламской Республике Иран в 2020 году. В августе «ТВЭЛ» поставил первую партию модифицированного ядерного топлива ТВСА-Т.mod.2 для реактора ВВЭР-1000 на АЭС «Темелин» в Чешской Республике. На Ростовской АЭС в Российской Федерации в реактор ВВЭР-1000 была загружена экспериментальная партия топливных сборок конструкции ТВС-2М с антидебризовым фильтром, разработанной в рамках осуществляемого в этой стране проекта «Нулевой уровень отказа ядерного топлива».

57. В мае 2018 года испанская ENUSA и компания «Вестингауз электрик» подписали рамочное соглашение о сотрудничестве с целью совместной разработки устойчивого к авариям топлива EnCore, созданного «Вестингауз». В данном топливе сочетаются такие решения, как хромированные оболочки из циркониевого сплава, оболочки из карбида кремния и топливные таблетки из силицида урана (U_3Si_2).

58. В июне 2018 года Комбинат по производству ядерного топлива Индии объявил о намерении расширить свои мощности по производству топлива и реакторных компонентов в Хайдарабаде и Коте, чтобы удовлетворить спрос в связи с планируемыми новыми реакторами.

59. В августе 2018 года канадская компания «СНК-Лавалин» подписала с «Циньшань нуклеар пауэр компани-3» контракт на предоставление услуг по инженерно-техническому обеспечению, а также лицензионное соглашение в целях применения модифицированной 37-элементной топливной сборки, разработанной специально для CANDU-6, с использованием эквивалента природного урана (ЭПУ) и природного урана (ПУ). Это топливо предназначено для использования на блоках 1 и 2 третьей очереди АЭС «Циньшань» в китайской провинции Чжэцзян. Это будет первое коммерческое применение такой модифицированной топливной сборки, в которой используются как ЭПУ, так и ПУ.

60. В сентябре 2018 года компания «Фраматом» подписала контракт на поставку и установку хромированных твэлов в первом энергоблоке АЭС «Арканзас нуклеар уан» корпорации «Энтерджи» в конце 2019 года. «Ваттенфаль» также заключила с «Фраматом» контракт на поставку топлива для десяти перезагрузок ТВС, изготовленных на производственном объекте компании в Лингене, Германия, в 2021–2024 годах на энергоблоке 3 АЭС «Форсмарк» и энергоблоках 3 и 4 АЭС «Рингхальс».

61. В октябре 2018 года Национальное управление ядерной безопасности США уведомило о прекращении действия контракта консорциум, осуществлявший проект, который предусматривал сооружение установки по производству смешанного оксидного (МОХ) топлива, называемый также «проектом МОХ», на площадке «Саванна-Ривер» в Южной Каролине. Эта установка предназначалась для утилизации минимум 34 тонн оружейного плутония путем его преобразования в топливо для коммерческих атомных реакторов.

62. В декабре 2018 года на Горно-химическом комбинате в Железногорске, Российская Федерация, была произведена первая серийная промышленная партия МОХ-топлива для реактора на быстрых нейтронах БН-800.

А.3.2. Обеспечение гарантированных поставок

63. 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 (УМЗ) в Усть-Каменогорске, Казахстан.

64. В 2018 году вступило в силу соглашение о транзите с Китаем и были подписаны договоры о перевозке с уполномоченными организациями из Российской Федерации и Казахстана.

65. Ближится к завершению осуществление Плана конкретных мероприятий, при реализации которого были рассмотрены различные вопросы, в том числе касающиеся регулирующей базы Казахстана, обеспечения безопасности и физической безопасности на площадке.

66. Агентство подписало контракты на закупку НОУ с «Казатомпром» (Казахстан) и «Орано-Сикль» (Франция) с намерением обеспечить поставку НОУ на Склад НОУ МАГАТЭ до конца 2019 года.

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

А.3.3. Конечная стадия топливного цикла

Обращение с отработавшим топливом

68. На сегодняшний день из АЭС выгружено свыше 400 000 тонн тяжелого металла (т ТМ). Пока примерно 75% выгруженного топлива из коммерческих энергетических реакторов хранится или в реакторных бассейнах, или в хранилищах отработавшего ядерного топлива сухого и мокрого хранения вне реакторной площадки (ВРП). В настоящее время в 27 странах имеется 151 место хранения ВРП.

69. В феврале 2018 года в подземную контейнерную систему сухого хранения на выведенной из эксплуатации АЭС «Сан-Онофре» в США поступили первые партии загруженных контейнеров для хранения топлива. Был выбран вариант подземного хранения в силу его устойчивости к экстремальным сейсмическим явлениям. Также в феврале 2018 года Комиссия по ядерному регулированию США объявила, что она приняла поданную в марте 2017 года заявку на получение лицензии на создание установки для консолидированного промежуточного хранения отходов в округе Ли, штат Нью-Мексико. В хранилище также планируется использовать контейнерную систему подземного сухого хранения, в которой изначально будет храниться 8680 т ТМ отработавшего топлива.

70. В июле 2018 года министерство экологического перехода Испании запросило Совет по ядерной безопасности (СЯБ) приостановить выдачу заключения, касающегося заявки на получение лицензии на строительство планируемого централизованного хранилища высокоактивных отходов (ВАО) и отработавшего ядерного топлива. 25 июля 2018 года СЯБ одобрил программу мероприятий по указанной приостановке.

71. В августе 2018 года в Японии начались работы по удалению отработавшего топлива из заполненного бака хранения натрия в прототипе быстрого реактора-размножителя «Мондзю». С тепловыделяющих сборок удаляется остаточный натрий, после чего они перевозятся в бассейн выдержки отработавшего топлива, расположенный на площадке.

72. В мае 2018 года на АЭС «Борсселе» в Нидерландах была произведена первая выгрузка отработавшего МОХ-топлива, которое было помещено в приреакторный бассейн выдержки отработавшего топлива. Предполагается, что отработавшее МОХ-топливо будет храниться там четыре года до транспортирования. Нидерландская стратегия переработки не предполагает захоронения отработавшего топлива в геологических формациях, как было отмечено в опубликованном в январе 2018 года докладе о проекте «ОПЕРА».

73. В Японии высвобождается пространство в общем мокром хранилище отработавшего топлива в Фукусиме путем перемещения ТВС во временное сухое хранилище на площадке. Временное хранилище работает с апреля 2013 года и может хранить до 50 контейнеров для сухого хранения. В 2018 году операторы проходили практическое обучение по удаленной выгрузке топлива из бассейна выдержки отработавшего топлива третьего энергоблока и хранению топлива в централизованном мокром хранилище отработавшего топлива.

74. В Германии владение сухими хранилищами ВРП с 1 января 2019 года будет передано от энергетических компаний государственной компании БГЦ.

75. Остальное отработавшее топливо парка АЭС по всему миру (приблизительно 100 000 т ТМ) было переработано. Мировые производственные мощности способны перерабатывать примерно 5000 тонн обычного оксидного топлива в год, однако в настоящее время они задействованы не в полной мере.

76. Два завода по переработке топлива «Орано» UP2800 и UP-3 общей годовой мощностью в 1700 тонн, расположенные на мысе Аг во Франции, перерабатывают в среднем 1000–1100 т ТМ в год (всего с 1976 года было переработано свыше 34 000 тонн отработавшего ядерного топлива): извлеченный плутоний перерабатывается в МОХ-топливо на установке МЕЛОКС в комплексе «Маркуль». В 2018 году «Орано» приступила к выводу из эксплуатации своего завода первого поколения UP2-400.

77. В 2018 году после модернизации, проведенной в 2017 году, на заводе РТ-1 производственного объединения «Маяк» в Озерске, Российская Федерация, переработано свыше 25 т ТМ отработавшего топлива ВВЭР-1000. Помимо этого, была также завершена экспериментальная переработка отработавшего МОХ-топлива быстрого реактора БН-600. Была выдана лицензия на эксплуатацию первого опытно-демонстрационного центра по переработке отработавшего ядерного топлива на основе инновационных технологий в Горно-химическом комбинате в Красноярске, в котором в 2018 году была переработана одна тепловыделяющая сборка из ВВЭР-1000. Идет строительство второго опытно-демонстрационного центра мощностью 250 т ТМ/год; завершение строительства намечено на 2020 год.

78. В январе 2018 года Китай и Франция подписали соглашение о строительстве завода по переработке и рециклированию в Китае. В июне «Орано» и Национальная ядерная корпорация Китая начали подготовительные работы для строительства завода мощностью 800 т U/год.

79. «Джапан ньюклар фьюэл лимитед», оператор завода по переработке в Роккасё, объявил в конце декабря 2017 года о переносе окончания работ над установкой на три года, чтобы можно было выполнить дополнительные нормативные требования, такие как обеспечение локализации и сбора материала в случае тяжелой аварии.

80. В ноябре 2018 года прекратилась эксплуатация установки термально-оксидной переработки в Соединенном Королевстве. За время ее работы на ней было переработано 9300 т U оксидного топлива, в том числе топливо британского усовершенствованного газового реактора, зарубежных реакторов PWR и BWR, а также прототипов британских реакторов.

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

А.4.1. Вывод из эксплуатации ядерных установок

81. По состоянию на 31 декабря 2018 года в мире было окончательно остановлено либо выводится из эксплуатации 169 ядерных энергетических реакторов. Из них 17 реакторов были полностью выведены из эксплуатации, и еще ряд реакторов находятся на конечных стадиях процесса вывода из эксплуатации. Окончательно остановлены или находятся в стадии вывода из эксплуатации свыше 150 установок топливного цикла, а почти 130 установок выведены из эксплуатации. Более 120 исследовательских реакторов остановлены или находятся в стадии вывода из эксплуатации; более 440 исследовательских реакторов полностью выведены из эксплуатации.

82. Благодаря внедрению хорошо отработанных технологий и НИОКР достигаются постоянные усовершенствования, в основном в странах с развитыми ядерно-энергетическими программами. Например, был достигнут технический прогресс в организации дезактивации и сегментации компонентов основного контура на ряде АЭС Германии, Испании, Российской Федерации, Словакии, Франции и Швеции. В июле 2018 года в Италии прошла миссия МАГАТЭ по оказанию услуг по комплексной экспертизе программ обращения с радиоактивными отходами и отработавшим топливом, вывода из эксплуатации и восстановления окружающей среды (АРТЕМИС) с целью анализа планов «Согин» по демонтажу корпусов и внутренних частей

реакторов АЭС «Гарильяно» и «Трино». Данный анализ был продолжением работы, проделанной в ходе предыдущей миссии АРТЕМИС, которая проводилась в 2017 году с целью анализа общих планов вывода из эксплуатации всех площадок «Согин».

83. 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. Например, началась эксплуатация новой установки плазменной переработки отходов, которые образуются в результате вывода из эксплуатации АЭС «Козлодуй»; завершен снос градирен на АЭС «Богунце» и началась полноценная эксплуатация нового безопасного конфинмента энергоблока 4 Чернобыльской АЭС.

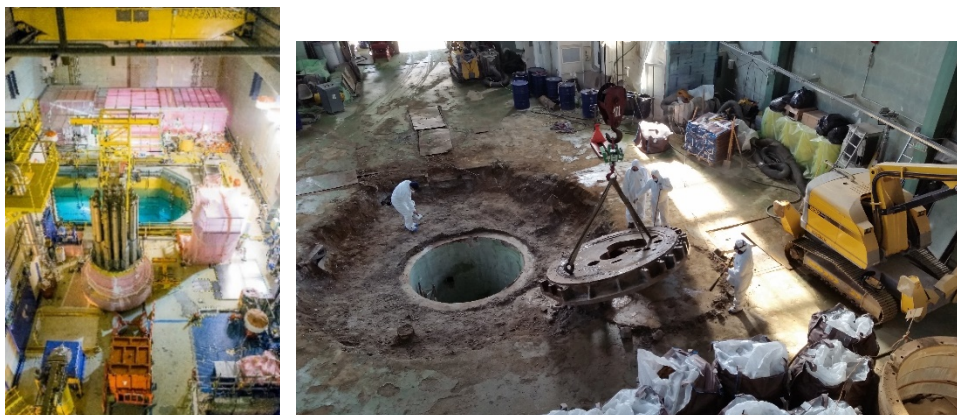


РИС. А-4. Демонтаж компонентов атомного энергетического реактора «Шо-А» во Франции (слева), и ход вывода из эксплуатации исследовательского реактора в Мэгуреле, Румыния (справа). (Фото: ЭДФ, МАГАТЭ)

84. Что касается вывода из эксплуатации исследовательских реакторов, то в настоящее время на продвинутой стадии находится демонтаж биологической защиты реактора ВВР-С мощностью 2 МВт (тепл.) в Мэгуреле около Бухареста, Румыния (рис. А-4). Гомогенный исследовательский реактор «Фотон» в Ташкенте, Узбекистан, был полностью снят с эксплуатации, площадка реактора выведена из-под регулирующего контроля и теперь доступна для использования в иных промышленных целях.

85. В октябре 2018 года Корпорация по содействию возмещению ядерного ущерба и выводу из эксплуатации Японии опубликовала Техничко-стратегический план на 2018 год по выводу из эксплуатации атомной электростанции «Фукусима-дайити» Токийской электроэнергетической компании. Продолжается работа по выводу из эксплуатации площадки «Фукусима-дайити»: завершено возведение непроницаемых стен со стороны суши («замораживаемые стены») и ведется подготовка к извлечению отработавшего топлива из бассейна выдержки отработавшего топлива в энергоблоке 3.

А.4.2. Восстановительные мероприятия

86. В 2018 году был достигнут прогресс в подготовке проектов реабилитации бывших урановых объектов в Центральной Азии. При финансировании Европейской комиссии был завершен проект «Проведение комплексной оценки воздействия на окружающую среду и технико-экономического обоснования управления бывшими объектами уранового производства Дегмай и Табошар в Таджикистане и их реабилитации». Интенсивная работа велась в рамках аналогичного проекта, финансировавшегося Европейской комиссией и касавшегося бывших объектов уранового производства в Майлуу-Суу в Кыргызстане. В рамках межправительственной целевой программы Содружества Независимых Государств (СНГ), технически возглавляемой Российской Федерацией, была обеспечена экологическая

безопасность хвостохранилища Каджи-Сай в Кыргызстане. Крупные инженерные работы продолжались на объектах Туяк-Суу и Дальнее. В ноябре 2018 года Совет глав правительств СНГ утвердил финансирование восстановительных мероприятий в Таджикистане, начало которых запланировано на 2020 год. Координация международной помощи странам Центральной Азии в реабилитации их бывших объектов уранового производства осуществляется Координационной группой по бывшим урановым объектам (КГБУО) под совместным руководством Агентства, Европейской комиссии и представителей стран — получателей помощи.

87. В 2018 году было завершено сооружение временного покрытия на последнем большом бассейне-хвостохранилище на площадке в Кульмиче в рамках проекта «Висмут» по экологической реабилитации — масштабного проекта реабилитации бывших объектов уранового производства в восточной части Германии (рис. А-5). Теперь все радиоактивные хвосты (178 млн куб. м) надежно закрыты. Работы по сооружению окончательного покрытия хвостохранилища в Кульмиче продлятся до 2028 года. На некоторых других площадках федеральная государственная компания «Висмут» переходит к реализации долгосрочных задач, в основном водоочистки и длительного наблюдения за восстановленными объектами, а также их технического обслуживания.



*РИС. А-5. Рекультивация бассейна-хвостохранилища в Кульмиче, Германия, 2018 год.
(Фото: «Висмут ГмбХ»)*

88. Япония регулярно сообщала о прогрессе, достигаемом в дезактивации за пределами площадки. На территории интенсивного контроля загрязнения, где измеренная мощность дозы в воздухе превышала 0,23 мкЗв/ч (эквивалентно более чем 1 мЗв/год), по состоянию на март 2018 года плановые мероприятия дезактивации были проведены во всех ответственных муниципалитетах. Все необходимые масштабные работы по дезактивации уже завершены везде, кроме зон, в которые затруднено возвращение населения.

89. В 2018 году государственная компания «Эмпрежа ди дезенвольвименту менейру» (ЭДМ), ответственная за программу реабилитации старых урановых рудников в Португалии, завершила экологическую реабилитацию бывших рудников в Кастележу, Формиге, Вале-ди-Видейре, Валеш и Повуа-ди-Сервайнш. В Ургейрисе ЭДМ продолжает вывод из эксплуатации старой установки для химической очистки, построенной в 1940-х годах для производства уранового концентрата, и недавно приступила к экологической реабилитации пяти других старых урановых рудников. Из 62 старых урановых рудников реабилитация пока проведена в 40; в настоящее время ведется их постреабилитационное обслуживание и постоянный мониторинг с применением по необходимости установок для активной и пассивной очистки воды.

А.4.3. Обращение с радиоактивными отходами

Обращение с изъятыми из употребления закрытыми радиоактивными источниками

90. Рассматривались различные варианты обращения с изъятыми из употребления закрытыми источниками (ИЗРИ), включая совместное захоронение с другими отходами в подходящих для этого пунктах. Выросло число вариантов рециклирования и возвращения в страну происхождения. В ряде стран, включая Гану, Малайзию и Филиппины, на разных стадиях разработки находятся проекты скважинного захоронения. Реализация проекта скважинного захоронения в Малайзии находится в стадии итогового анализа обоснования безопасности, и в начале 2019 года должно начаться бурение.

91. В 2018 году был осуществлен ряд успешных операций по удалению ИЗРИ из помещений пользователей и постановке их под контроль в надлежащих условиях хранения. Было завершено удаление всех оставшихся в Бразилии изъятых из употребления источников категории 1 и 2: последняя партия была отправлена в США. В рамках этой операции, самой масштабной на сегодняшний день с применением передвижной горячей камеры, был отправлен в страну происхождения или в компании на рециклирование 81 источник для телетерапии общей активностью 1093 ТБк (29 500 Ки). При финансировании со стороны Канады из Боливии, Парагвая, Перу, Уругвая и Эквадора было вывезено для рециклирования 27 ИЗРИ категории 1 и 2. Еще 3 ИЗРИ категории 1 и 2 были также вывезены из Ливана. Началось удаление источников категорий 1 и 2 в ряде других государств-членов, в том числе в Албании, Буркина-Фасо, на Кипре, в Непале, Северной Македонии и Тунисе.

92. В 2018 году был завершен ввод в эксплуатацию мобильного инструментария, который будет использоваться вместе с системой скважинного захоронения; планируется впервые задействовать его в Малайзии в начале 2019 года.

93. Были завершены операции по кондиционированию ИЗРИ в Вьетнаме, Гане, Гондурасе, Индонезии, Иордании, Кипре, Малайзии, Словении, Шри-Ланке и Чили, а местный персонал в этих странах прошел соответствующую подготовку по кондиционированию ИЗРИ. В двух государствах-членах национальные компетентные органы одобрили и выдали соответствующим структурам лицензии на проведение операций кондиционирования, которые помогут другим государствам-членам этого региона развиваться в будущем.

94. Была проведена первичная или повторная инвентаризация запасов ИЗРИ, а также используемых закрытых источников, в Антигуа и Барбуде, на Багамских Островах, Барбадосе, в Белизе, Доминике, Гайане и Папуа — Новой Гвинее.

95. Расширен доступ пользователей из государств-участников к Международному каталогу закрытых радиоактивных источников и устройств, что облегчает идентификацию обнаруживаемых на местах ИЗРИ. В 2018 году была начата работа по внесению в каталог дополнительных сведений об источниках и устройствах.

Обращение с радиоактивными отходами перед захоронением

96. В соответствии с подписанным в 2017 году с компанией «Согин» соглашением в феврале 2018 года дочерняя компания ЭДФ «Циклайф» начала операции по переработке 1800 тонн радиоактивно загрязненного металла, полученного при выводе из эксплуатации АЭС «Трино», «Гарильяно» и «Латина» в Италии.

97. На Чернобыльской АЭС начата переработка жидких радиоактивных отходов в рамках масштабных усилий по очистке места ядерной аварии 1986 года; операторы приступают к перемещению жидких ядерных отходов в место их долгосрочного хранения. На заводе по переработке жидких радиоактивных отходов в Чернобыле будет переработано 22 000 тонн воды, загрязненной в результате аварии, а также в результате эксплуатации трех других реакторов

АЭС. Ожидается, что на заводе по переработке сточных вод, заработавшем в январе 2018 года, будет производиться удаление радиоактивных загрязнителей из воды со скоростью примерно 2000 тонн в год в течение следующих 20 лет.

98. На АЭС «Козлодуй» в Болгарии началась эксплуатация установки по плазменной переработке, что способствует обработке ядерных отходов в рамках мероприятий по выводу из эксплуатации. Данная технология позволяет осуществлять обращение с отходами с минимальным риском радиоактивного загрязнения. В своем окончательном виде отходы представляют собой устойчивую массу, не содержащую органических компонентов и жидкостей; по сути, это химически инертный и аморфный стекловидный шлак. Более того, радиоактивные отходы, в прошлом кондиционировавшихся в битуминозных или бетонных матрицах, можно подвергать повторной обработке на плазменной установке и получать контейнеры с радиоактивными отходами, соответствующие критерии приемлемости Козлодуйского пункта приповерхностного захоронения. С помощью данной установки, применяющей плазменную технологию, можно значительно сократить объем радиоактивных отходов низкого и среднего уровней активности с реакторов 1–4 АЭС «Козлодуй», остановленных в 2002–2006 годах, а также действующих реакторов 5 и 6. Металлы в плазме плавятся и окисляются. Плавятся обломки бетона, песок, неорганические грануляты, изоляционный материал и асбест.

99. В апреле 2018 года на поврежденной АЭС «Фукусима-дайти» в Японии был запущен двухэтапный проект по демонстрации применения технологии остекловывания радиоактивных отходов. Первый этап предусматривает разработку и изучение состава матриц для кондиционирования устойчивых форм отходов. В лабораториях Комиссариата по атомной энергии и альтернативным источникам энергии Франции в Маркуле пройдут испытания в масштабах лаборатории (100 г), испытательного стенда (1 кг) и почти промышленного масштаба (100 кг). Второй этап проекта заключается в проведении технико-экономических обоснований реализации процесса, принципов эксплуатации и технического обслуживания, а также захоронения отходов.

100. Осуществлена первая передача жидких радиоактивных отходов из подземной емкости для отходов в «мегахранилище» — пункт захоронения отходов «Солтстоун» (ПЗОС) 6 на площадке «Саванна-Ривер», принадлежащей Министерству энергетики США. Конструкция этих ПЗОС позволяет им хранить пульпообразные низкоактивные отходы, получаемые при отверждении дезактивированных неопасных солевых отходов на площадке в Южной Каролине. Цилиндрические бетонные баки по своей конструкции аналогичны имеющимся в свободной продаже бакам для хранения воды и прочих жидкостей. ПЗОС 6, заверченный в прошлом году, представляет собой первое мегахранилище на площадке, которое в десять раз больше остальных ПЗОС. Диаметр ПЗОС 6 составляет примерно 114 метров, а высота — почти 13. Всего планируется построить семь подобных мегахранилищ для удовлетворения потребностей в захоронении отходов на площадке.

Захоронение радиоактивных отходов

101. В мире функционируют пункты захоронения радиоактивных отходов всех категорий, за исключением высокоактивных отходов и/или отработавшего топлива, отнесенного к разряду отходов. В число этих объектов входят пункты траншейного захоронения очень низкоактивных отходов (например, в Испании, Франции и Швеции) и низкоактивных отходов (НАО) в засушливых районах (например, в США и Южной Африке); приповерхностные инженерные сооружения для НАО (например, в Венгрии, Китае, Индии, Испании, Польше, Российской Федерации, Словакии, Соединенном Королевстве, Франции, Чешской Республике и Японии); и инженерные сооружения для низко- и среднеактивных отходов (НСАО), находящиеся в геологических формациях на различных глубинах (например, в Венгрии, Германии, Республике Корея, Норвегии, Российской Федерации, Финляндии и Чешской Республике).

102. Дополнительные пункты захоронения НСАО, например, в Бельгии (Дессель), Болгарии (Козлодуй-Радана), Германии (Конрад), Исламской Республике Иран (Талмеси), Канаде (Кинкардин), Литве (Стабатишкес), Румынии (Салиньи) и Словении (Врбина), а также пункт захоронения НАО в Канаде («Чок-Ривер») находятся на разных стадиях лицензирования или строительства.

103. Варианты захоронения отходов радиоактивных материалов природного происхождения зависят от национальных правил и варьируются от пунктов траншейного захоронения до подповерхностных инженерных сооружений, таких как в Норвегии.

104. Государственное предприятие по обращению с радиоактивными отходами Болгарии продолжает строительство пункта приповерхностного захоронения НАО на площадке «Радана», расположенной рядом с АЭС «Козлодуй».

105. В Исламской Республике Иран продолжается строительство пункта приповерхностного захоронения «Талмеси»; была проведена приемка емкостей с отходами для хранения на площадке до начала операций по захоронению.

106. В Финляндии компания по обращению с отходами «Посива» проводит полномасштабное испытание систем на месте — это условие для получения лицензии на эксплуатацию хранилища, которое строится в АЭС «Олкилуото». Это испытание должно продемонстрировать полную конфигурацию системы, которая необходима для размещения ТВС в медно-стальных контейнерах в шурфах, пробуренных в гранитной вмещающей породе в тоннелях для хранения специальной конструкции. Испытание включает в себя засыпку тоннелей для хранения бентонитовой глиной и сооружение окончательной системы герметизации с железобетонной пробкой. В ходе испытания будут задействованы две полноразмерных контейнера, оборудованных нагревающими элементами для моделирования остаточного тепловыделения, характерного для отработавшего ядерного топлива.

107. В январе 2018 года власти Швеции издали постановления, затрагивающие процесс лицензирования шведского пункта захоронения отработавшего топлива, предлагаемого Шведской компанией по обращению с отработавшим ядерным топливом (СКБ). Шведское управление по радиационной безопасности согласовало строительство пункта окончательного захоронения в Форсмарке, отметив, что СКБ располагает возможностями, необходимыми для безопасного проведения окончательного захоронения. Суд по делам земельных ресурсов и окружающей среды в своем заявлении отметил, что заявка СКБ в целом соответствует требованиям, необходимым для получения разрешения, однако еще сохраняются некоторые неопределенности, касающиеся коррозионной устойчивости медных контейнеров в долгосрочной перспективе. СКБ предоставляет дополнительную информацию в ответ на этот запрос.

108. Во Франции принято решение о глубоком геологическом захоронении высоко- и среднеактивных долгоживущих радиоактивных отходов (ВАО/САО-ДЖ) в келловейско-оксфордском аргиллите. Проект «Сижео» Национального агентства по обращению с радиоактивными отходами «Андра» направлен на реализацию этого решения в соответствии с законом, принятым в 2006 году. «Андра» завершает этап детального проектирования и работает над оптимизацией базисных показателей. После этапа технической экспертизы досье вариантов обеспечения безопасности Управление по ядерной безопасности (АСН) Франции провело в 2017 году общественные обсуждения проекта своего решения. Проанализировав полученные сведения, в январе 2018 года АСН вынесло решение о том, что проект в целом вышел на достаточный уровень технологического развития с точки зрения безопасности. Тем не менее, для одобрения заявки на строительство, которую «Андра» собирается подать в 2019 или в начале 2020 года, необходимы дополнительные сведения, касающиеся обоснования архитектуры

пункта захоронения, проектного исполнения и габаритов объекта для обеспечения его способности выдерживать воздействие опасных природных явлений, мониторинга пункта захоронения, предотвращения возможного воспламенения контейнеров с отходами на основе смол и действий в случае аварии.

109. В ноябре 2018 года Федеральный совет Швейцарии объявил свое решение о второй стадии секторального плана по созданию глубинных геологических хранилищ. Согласно этому решению швейцарская организации по обращению с радиоактивными отходами «Награ» при дальнейшем определении характеристик площадки может сосредоточиться на оставшихся трех возможных районах размещения площадки. Фактически это служит началом третьего и заключительного этапа, целью которого является подача заявки на получение лицензии на пункт геологического захоронения к 2024 году.

110. В декабре 2018 года правительство Соединенного Королевства опубликовало политику работы с общинами в рамках начала национального основанного на консенсусе процесса выбора площадки для пункта геологического захоронения.

В. Атомные и ядерные данные

111. В дополнение к базам данных, которые ведет МАГАТЭ, несколько агентств публикуют библиотеки ядерных данных, необходимые для любых исследований и разработок ядерных применений как в энергетике, так и в других отраслях⁴. Наиболее важные публикации в 2018 году указаны ниже.

- Опубликованная США библиотека ядерных данных ENDF/B-VIII содержит существенные изменения для нейтронных реакций с участием самых важных для ядерных применений нуклидов, в частности основных изотопов урана, железа, кислорода и водорода. Была проделана серьезная работа по оценке новых видов измерений количества актинидов в связи с ядерным делением, таких как спектр мгновенных нейтронов деления и среднее количество нейтронов деления. Библиотека ENDF/B-VIII прошла тщательную валидацию, особенно по контрольным показателям критичности.
- Библиотека ядерных данных JEFF-3.3, выпущенная АЯЭ/ОЭСР, в основном предназначена для использования при анализе европейских реакторов, в программном обеспечении реакторов, при анализе топливного цикла и термоядерном синтезе.
- Новый японский файл фотоядерных данных JENDL/PD-2016 содержит данные по ядерным реакциям, индуцированным фотонами, в том числе сечения фотопоглощения и фотоделения, сечения образования частиц и остаточных нуклидов, а также дважды дифференциальные сечения испускания частиц. В библиотеке содержатся данные по 2681 нуклиду с диапазоном энергий падающего фотона 1–140 МэВ.
- Другая японская библиотека JENDL/AD-2017 (файл сечений активации для вывода ядерных установок из эксплуатации) призвана удовлетворить потребности в оценке общего количества радиоактивного материала при выводе из эксплуатации ядерных установок.

⁴ См.: <https://www-nds.iaea.org/>.

- На смену библиотеке TENDL-2015 (библиотека оцененных ядерных данных на основе программы TALYS) выпущена версия TENDL-2017⁵. В сборнике содержатся полные файлы данных в формате ENDF-6, в том числе данные о ковариации, по 2813 изотопам (стабильным или с периодом полураспада дольше 1 секунды) в отношении падающих нейтронов, фотонов, протонов, дейтронов, тритонов, гелия-3 и альфа-частиц с диапазоном падающей энергии до 200 МэВ.

112. Важным дополнением к существующим библиотекам данных о распаде могли бы служить данные спектроскопии полного поглощения гамма-излучения (TAGS), которые могли бы повлиять на расчеты остаточного тепловыделения и спектров антинейтрино. В этой связи важно рассмотреть текущее состояние TAGS и обсудить потребности в новых данных. В 2018 году Агентство завершило детальную оценку данных о распаде основных продуктов деления, способствующих остаточному тепловыделению, для широкого спектра топливных систем, результатом чего стала актуализация таблиц очередности измерений методами спектроскопии полного поглощения гамма-излучения и гамма-спектроскопии высокого разрешения; отчет об оценке будет опубликован в 2019 году.

113. В 2018 году начала работу Международная сеть по оценке ядерных данных (INDEN), цель которой — стимулировать проведение оценки сечений нейтронов тех нуклидов, которые имеют особую значимость для ядерных технологий (рис. В-1). Эта сеть позволит ядерным физикам согласовывать свою работу в области инновационных измерений и имитационных моделей для получения максимально качественных таблиц данных по ядерным реакциям для легких нуклидов (например, углерода и азота), конструкционных материалов (таких как хром и никель) и важных актинидов (например, изотопов плутония). Помимо фундаментального улучшения качества ядерных данных, будет осуществляться непосредственная валидация обновлений библиотек ядерных данных по интегральным контрольным показателям критичности для энергии как тепловых, так и быстрых нейтронов. В проекте преимущественно участвуют специалисты из Китая, европейских стран, Японии и США, а Агентство играет роль координатора.

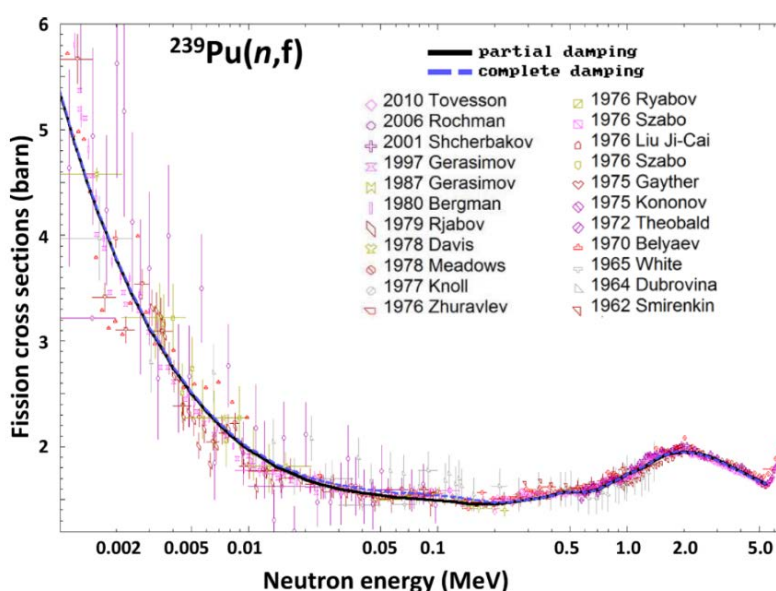


Рис. В-1. Текущий статус сечений для U-235, исследуемых в рамках совместного проекта INDEN.

⁵ См.: https://tendl.web.psi.ch/tendl_2017/tendl2017.html.

С. Применения ускорителей и исследовательских реакторов

С.1. Ускорители и соответствующие контрольно-измерительные приборы

С.1.1. Революционные технологии с использованием ионно-пучковой инженерии

114. Благодаря последним достижениям в технологии ускорителей появилась возможность создавать оптически активные дефекты атомного размера в широком спектре материалов: от широкозонных полупроводников (таких как алмаз, карбид кремния, нитрид галлия) до двумерных материалов (например, гексагонального нитрида бора) (рис. С-1). Эти системы формируют перспективную платформу в новой области однофотонной эмиссии, применяемой в защищенной связи (распределение защищенных ключей за счет получения однофотонных состояний) и в клеточном мечении/зондировании. В настоящее время в рамках международного сотрудничества и при поддержке Агентства разрабатывается ряд методов ионной имплантации. В ближайшее время можно ожидать появления революционных инноваций в квантово-защищенной связи и биотехнологиях.

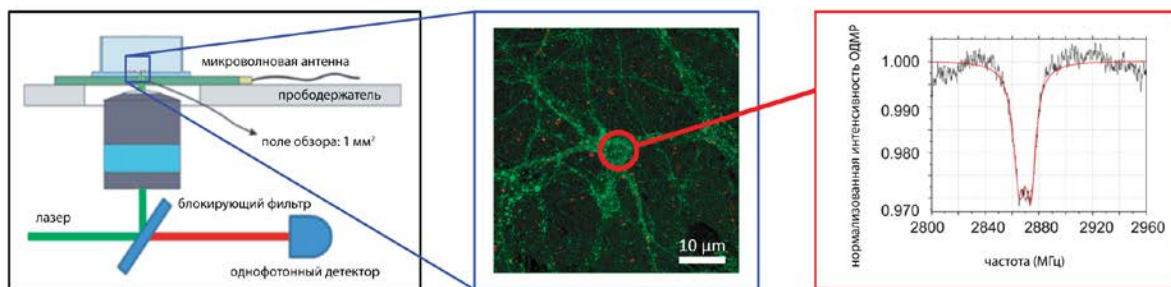


Рис. С-1. Применение ионных пучков для создания люминесцентных нанодIAMONDOV, поглощаемых живыми нейронными клетками при культивировании: схема экспериментальной установки для визуализации и получения сигналов (слева); карта конфокальной микроскопии, на которой отмечены поглощенные клетками люминесцентные нанодIAMONDOV (в центре); оптически детектируемый магнитный резонанс от нанодIAMONDOV (справа). (Предоставлено Паоло Оливеро, Туринский университет и Итальянский национальный институт ядерной физики и Итальянский национальный институт метрологических исследований.)

С.1.2. Моделирование повреждения реакторных материалов с помощью ускорителей

115. При правильном подборе и настройке ионные пучки позволяют экспериментально моделировать повреждения, которые наносят материалам тепловые и быстрые нейтроны, присутствующие в ядерных и термоядерных реакторах. В настоящее время не существует нейтронных источников, предназначенных для управляемого термоядерного синтеза, которые обеспечивали бы достаточно высокий поток для имитации условий облучения первой стенки термоядерного реактора, поэтому в качестве альтернативы применяются ускорители ионного пучка, позволяющие в максимально возможной степени воспроизводить микроструктурные изменения и состав материалов для детального изучения их микроструктурных свойств. Можно, например, использовать один, два или три электростатических ускорителя с диапазоном от нескольких сот киловольт до нескольких мегавольт, соединенные в одно-, двух- или трехпучковой конфигурации, чтобы баллистически повреждать конструкционные материалы и одновременно имплантировать в них трансмутационные элементы (такие как гелий и водород), которые являются основными продуктами реакции под действием нейтронов в указанных материалах.

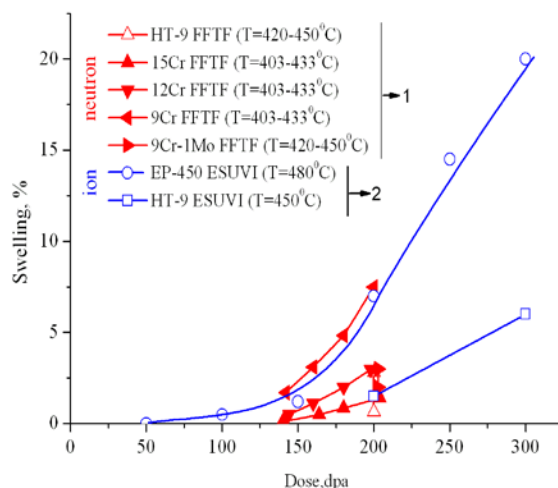


Рис. С-2. Сравнение разбухания материалов при облучении быстрыми нейтронами (отмечено красным) и ионными пучками (отмечено синим) в зависимости от разных доз поражения (числа смещений на атом). (Предоставлено В. Воеводиным, Харьковский физико-технический институт.)

116. Однако для полной сертификации такого метода необходимо согласованно провести типовые международные испытания, чтобы проверить воспроизводимость их результатов на различных площадках, рекомендовать оптимальную практику использования ускорителей и определить, в какой мере облучение ионными пучками может использоваться в целях быстрого предварительного отбора конструкционных материалов для будущих ядерных установок. В этой связи Агентство выступает координатором⁶ глобального кругового эксперимента по сравнению микроструктур повреждений стали Т91, получаемых под действием различных ускорителей ионных пучков, а также по сравнению действия ускорителей с результатами облучения того же материала в российском исследовательском реакторе на быстрых нейтронах БОР-60.

С.1.3. Крупномасштабный мониторинг загрязнения воздуха с использованием ядерных аналитических методов

117. Загрязнение воздуха — это общемировая проблема, влияющая на состояние окружающей среды и здоровье людей, и контроль качества воздуха играет важную роль в снижении уровня выбросов. Однако для того, чтобы выявлять источники загрязнения, затрагивающего население крупных городов, и уточнять пути его трансграничного переноса, специалистам не хватает данных. В целях разработки более качественных компенсационных стратегий и инструментов государства-члены при поддержке МАГАТЭ используют ядерные аналитические методы и другие вспомогательные методики для определения химического состава аэрозольных частиц (рис. С-3). Эта информация служит для идентификации основных источников загрязнения (распределения по источникам) и измерения их удельного веса в наблюдаемом загрязнении (инвентаризации). Существует несколько методов, которые пригодны для многоэлементного анализа, не разрушают пробы (что позволяет использовать их для дальнейшего анализа) и обеспечивают высокую скорость получения информации по примерно двадцати химическим элементам, значимым с точки зрения определения источников. Самыми распространенными из этих методов являются ионно-пучковый (ИПА), рентгенофлуоресцентный (РФА) и нейтронно-активационный анализ (НАА).

⁶ Проводится на основе предыдущего проекта координированных исследований МАГАТЭ «Моделирование на ускорителях и теоретическое моделирование радиационных эффектов в конструкционных материалах», результаты которого опубликованы в 2018 году.

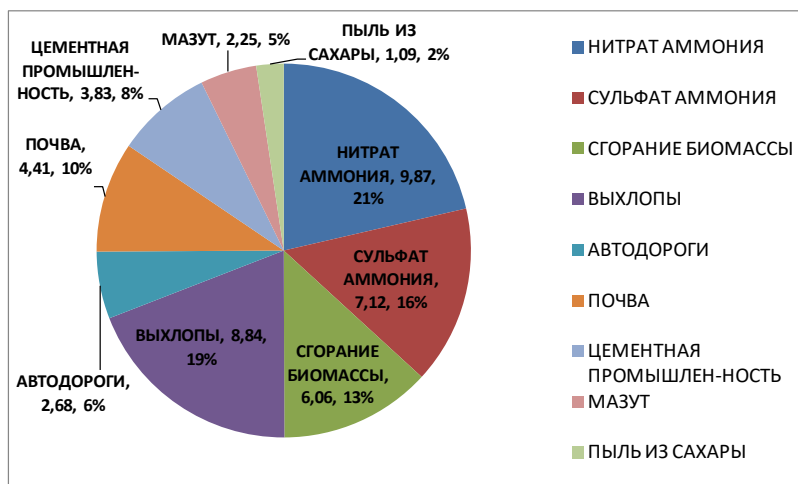


Рис. С-3. Пример расчета относительной важности отдельных источников загрязнения (инвентаризации источников) на основе химического анализа проб, выполненного с использованием различных ядерных методов. (Источник: МАГАТЭ)

118. О важности этой темы и растущем интересе к ней также свидетельствовало проведенное Агентством аттестационное испытание с использованием проб городской пыли, осевшей на воздушных фильтрах. В проекте приняли участие более 40 аналитических лабораторий из 33 государств-членов, а его результаты были представлены в рамках процедур обеспечения и контроля качества.

С.1.4. Полевые измерения для определения характеристик радиоактивного загрязнения поверхности

119. Добыча и переработка урана — это ресурсоемкая отрасль, и во многих странах, где регулирующий контроль проводится не в соответствии с действующими международными нормами, она оставляет после себя радиационно загрязненные площадки. К значительному накоплению радиоактивных материалов природного происхождения приводит и добыча других полезных ископаемых, в том числе нефтяных месторождений. Также загрязнение возникает вследствие ядерных и/или радиологических аварий и испытаний ядерного оружия. Например, только в Центральной Азии насчитывается более 50 хвостохранилищ, а общий объем хвостов и породных отвалов превышает 800 млн тонн. В принципе такие объекты могут подвергать граждан воздействию ионизирующего излучения, приводящего к негативным последствиям для здоровья.

120. Наличие современных портативных контрольно-измерительных приборов, свободный доступ к географическим информационным системам и развитие средств геостатистического моделирования дают много возможностей для проведения полевых обследований различных объектов окружающей среды при самых разных экологических сценариях и условиях. Технологии полевых исследований достигли высокого уровня эффективности анализа и имеют много преимуществ по сравнению с более традиционными методами: это, в том числе, возможность быстрого определения концентрации/активности загрязняющих веществ, их пространственного распределения и необходимых мероприятий, выявления очагов и снижения затрат на расследования. Проведение измерений на месте при необходимости может также улучшить методику отбора проб для обеспечения высокой точности лабораторного анализа.

121. Деятельность Агентства в 2018 году в этой области включала проведение по запросу государств-членов следующих мероприятий: полевой демонстрации возможностей радиологического картирования для вывода из-под регулирующего контроля площадки

радиационно-технологического комплекса «Фотон» после удаления с нее радиоактивных отходов (Узбекистан); демонстрации возможностей систем радиологического картирования, основанных на использовании БПЛА, для проведения замеров на площадках при возникновении ядерной аварийной ситуации (Бразилия); помощи в проведении национальных учебных курсов по радиологическим измерениям, полевым технологиям и методикам (Мексика) (рис. С-4).

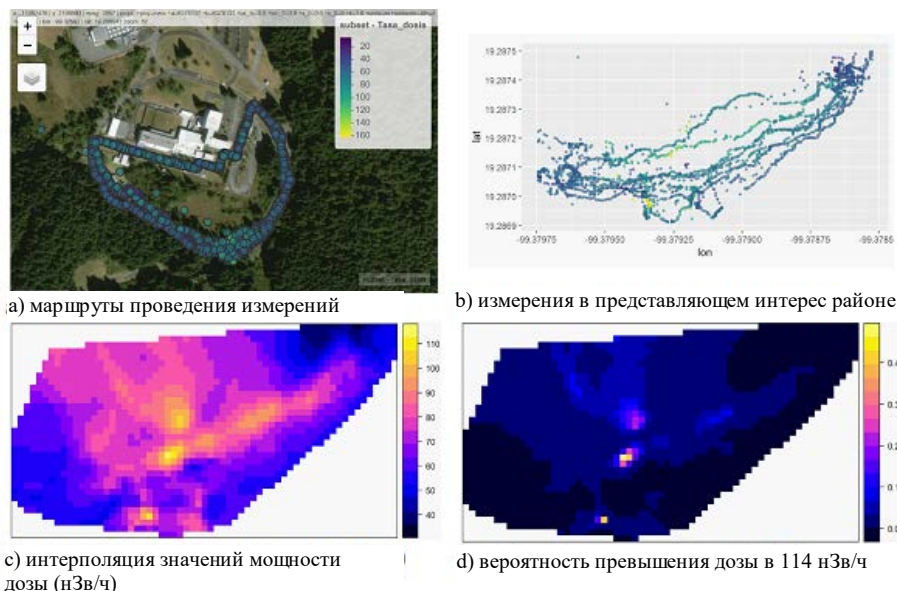


Рис. С-4. Пример результатов практических занятий по измерению на местах, проведенных в ходе национальных учебных курсов в рамках проекта ТС МЕХ7011. На картах показаны маршруты проведения измерений, интерполяция значений мощности дозы по всей обследуемой территории, а также оценка вероятности превышения заданного уровня. (Источник: МАГАТЭ)

С.2. Исследовательские реакторы

122. В таблице С-1 указаны наиболее распространенные сферы применения исследовательских реакторов. Их мощность может варьироваться от нуля (например, в случае критической или подкритической сборки) до приблизительно 200 МВт (тепл.). В отличие от энергетических реакторов, исследовательские реакторы отличаются гораздо большим разнообразием конструкций и могут работать в разных режимах — стационарных или импульсных.

Таблица С-1. Распространенные области применения исследовательских реакторов во всем мире⁷.

Тип применения ^а	Число исследовательских реакторов ^б	Число государств-членов, в которых имеются такие установки
Обучение/подготовка кадров	163	53
Нейтронно-активационный анализ	119	53
Производство радиоизотопов	84	44
Нейтронная радиография	72	40
Облучение материалов/топлива	68	29

⁷ Согласно базе данных МАГАТЭ по исследовательским реакторам: <http://nucleus.iaea.org/RRDB/>.

Тип применения ^a	Число исследовательских реакторов ^b	Число государств-членов, в которых имеются такие установки
Рассеяние нейтронов	47	31
Геохронология	25	22
Трансмутация (легирование кремния)	23	20
Трансмутация (драгоценные камни)	19	15
Нейтронная терапия, в основном НИОКР	14	12
Прочие применения ^c	119	36

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

^b Из 239 учтенных исследовательских реакторов (по состоянию на 31 декабря 2018 года 226 эксплуатировались, 13 были временно остановлены).

^c Другие применения включают калибровку и тестирование контрольно-измерительных приборов, эксперименты с биологической защитой, измерение ядерных данных, экскурсии для широкой публики и семинары.

123. Как следует из базы данных МАГАТЭ по исследовательским реакторам, в 67 странах был построен 841 исследовательский реактор, из которых в эксплуатации находятся 252 реактора в 55 странах. Наибольшее количество работающих исследовательских реакторов (59) находится в Российской Федерации, за ней следуют США (50), Китай (17) и Япония (9). Среди мирового парка исследовательских реакторов 66 установок работают на мощности 5 МВт и выше, генерируя нейтронные потоки большой плотности для применения в высокопроизводительных изделиях и услугах.

124. Без исследовательских реакторов невозможно производство радиоизотопов для медицины и промышленности, генерирование пучков нейтронов для исследований материалов и неразрушающих испытаний, оказание услуг по анализу данных и облучению частному и государственному секторам, а также проведение исследований в сфере культурного наследия и окружающей среды. Операторам исследовательских реакторов Агентство рекомендует разрабатывать и обновлять стратегические планы использования установок. За последние три года Агентству были переданы стратегические планы по 38 установкам для получения дальнейших рекомендаций по их устойчивому и эффективному использованию.

125. Срок работы половины находящихся в эксплуатации исследовательских реакторов превышает 40 лет. Их жизненный цикл может превышать 60 лет, однако для этого первостепенное значение имеет своевременная реализация надлежащих программ по управлению их старением, ремонту и модернизации. Ввиду общей тенденции к сокращению финансирования таких объектов, а также недостаточного планирования замещения мощностей принципиальное значение приобретает внедрение эффективных систем управления и реализация программ эксплуатации, обслуживания и управления жизненным циклом, чтобы установки могли выполнять свои задачи экономически эффективным образом. В связи с этим в Бангладеш, Демократической Республике Конго, Португалии и Узбекистане были проведены независимые экспертизы для оценки эксплуатации и технического обслуживания исследовательских реакторов. В отношении нескольких из 56 исследовательских реакторов, находящихся в режиме постоянного останова в 22 государствах-членах, в ближайшем будущем планируется начать подготовку к выводу из эксплуатации. В июне 2018 года владельцы Халденского кипящего водо-водяного реактора в Норвегии выполнили его постоянный останов; тем самым была выведена из строя крупная установка по испытанию топлива и материалов. В марте после 61 года эксплуатации был также остановлен канадский национальный исследовательский универсальный реактор — крупный производитель медицинских радиоизотопов.

126. Продолжается сооружение новых исследовательских реакторов в Аргентине, Индии, Республике Корея, Российской Федерации, Саудовской Аравии, Украине и Франции. Ряд государств-членов приняли официальные планы по строительству новых реакторов; в их числе Беларусь, Бельгия, Боливия, Вьетнам, Замбия, Нигерия, Нидерланды, США, Таджикистан (завершение строительства реактора «Аргус-ФТИ») и Таиланд. Вопрос о строительстве новых исследовательских реакторов рассматривают и другие страны, такие как Азербайджан, Бангладеш, Гана, Кения, Малайзия, Монголия, Мьянма, Нигер, Объединенная Республика Танзания, Сенегал, Судан, Тунис, Филиппины, Эфиопия и Южная Африка. Во Вьетнаме и в Нигерии Агентством проведены первые две независимые экспертизы по комплексной оценке ядерной инфраструктуры исследовательских реакторов (ИНИР-ИР), направленные на обеспечение поддержки и методической помощи государствам-членам, приступающим к строительству новых исследовательских реакторов. Миссия по подготовке к ИНИР-ИР была проведена в Замбии. В сентябре 2018 года пущен в эксплуатацию исследовательский реактор бассейнового типа мощностью 2 МВт, построенный на территории северной площадки Центра атомных исследований им. Бхабхи в Тромбее (Индия).

127. Государства-члены, которые планируют создавать или сохранять свои ядерные мощности для реализации научных и технологических программ, в том числе в области ядерной энергетики, продолжают интересоваться доступом к исследовательским реакторам. В этой связи в 2018 году Агентство провело консолидацию и расширение своих инициатив и инструментов: реакторной интернет-лаборатории — средства дистанционного обучения в основном для лиц, получающих академическое образование (в 2018 году продолжились трансляции для стран Африки, Европы, Латинской Америки и Карибского бассейна); региональных школ по исследовательским реакторам (RRRS) для фундаментальной подготовки; Инициативы в области восточноевропейских исследовательских реакторов (EERRI) по углубленному практическому обучению, прежде всего молодых специалистов; системы международных центров МАГАТЭ на базе исследовательских реакторов (ISERP) для специальной, углубленной подготовки молодых и старших специалистов, которая в настоящее время предлагается на шести установках в Бельгии, Российской Федерации, США и Франции.

128. Французский Национальный институт ядерных наук и технологий для обучения и подготовки кадров по реакторной физике и эксплуатации реакторов ввел в действие новую мультимодальную платформу «Усовершенствованная виртуальная активная зона».

129. Некоторым государствам-членам трудно и далее обеспечивать безопасное, надежное и экономичное обращение с отработанным ядерным топливом (ОЯТ) исследовательских реакторов и его хранение, а также выбрать приемлемые варианты действий на конечных стадиях топливного цикла, которые должны соответствовать требованиям по нераспространению и национальным политическим, экономическим, природоохранным и техническим требованиям и ограничениям. Многие страны, в которых имеются один или несколько исследовательских реакторов, но нет собственной крупной ядерно-энергетической программы, сталкиваются с проблемой окончательного захоронения относительно небольших объемов ОЯТ; они могут оказаться вынужденными принимать решение относительно будущего их исследовательских реакторов в свете ограниченной продолжительности международных программ возврата ОЯТ исследовательских реакторов. Под руководством Агентства предпринимаются коллективные усилия по выработке моделей поддержки принятия решений, призванных помочь государствам-членам выбрать наиболее подходящие для них варианты.

130. 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 ноябре 2018 года малогабаритный реактор — источник нейтронов (МРИН) в Нигерии был переведен с ВОУ на НОУ-топливо, а облученное

ВОУ топливо в декабре было возвращено в Китай. В рамках программы по возврату ВОУ топлива в США был осуществлен возврат или была подтверждена утилизация примерно 4415 кг свежего и отработавшего ВОУ топлива, а в рамках программы возврата топлива российского происхождения осуществлен возврат примерно 2280 кг топлива.

131. В январе 2018 года ведущая компания — разработчик решений в области ядерной медицины «Кьюриум» завершила перевод производства мишеней на использование исключительно НОУ, и теперь примерно 75% всего реализуемого в мире молибдена-99 вырабатывается без использования ВОУ. Непродолжительные перебои в работе некоторых глобальных переработчиков и установок по облучению мишеней из молибдена-99 в 2018 году привели к некоторому дефициту поставок на региональном уровне. Усилия органов, координирующих работу системы снабжения, и крупных международных производителей, а также эффективные усилия практикующих врачей, направленные на смягчение последствий, позволили несколько сгладить воздействие колебаний в объемах производства. В 2018 году компания по производству медицинских радиоизотопов «Нортстар» в США начала выпускать молибден-99 без использования мишеней из ВОУ.

132. В октябре 2018 года федеральное правительство Бельгии приняло решение выделить значительные финансовые средства (в период 2019–2020 годов) на разработку инновационной технологии производства молибдена-99 на базе ускорителей, которая позволяет не использовать ВОУ. В сентябре 2018 года правительство решило также существенными, масштабными инвестициями (в период 2019–2037 годов) поддержать разработку многоцелевого гибридного исследовательского реактора для высокотехнологичных применений (MYRRHA). MYRRHA — это электроядерная установка, которая в основном будет использоваться для изучения трансмутации, разработки медицинских радиоизотопов следующего поколения и исследований в области усовершенствованных материалов.

С.2.1. Производство холодных нейтронов с использованием новых технологий замедлителей

133. Холодные замедлители производят нейтроны с очень низкой энергией, при этом используются тщательно отобранные материалы, находящиеся при криогенных температурах. Такие нейтроны особенно полезны для материаловедческих исследований. Среди инновационных решений в генерации холодных нейтронных пучков — создание гранулированных твердых замедлителей, один из которых используется в импульсном исследовательском реакторе ИБР-2 при ОИЯИ в Дубне. В твердых холодных замедлителях, которые обычно изготавливаются из метана, в результате радиолиза образуется газообразный водород и происходит разбухание, способное повредить бак замедлителя. Но шариковый замедлитель, используемый в системе ОИЯИ в Дубне (рис. С-5), производится из более радиационно-стойких углеводородов, постоянно нагнетается в бак и легко удаляется по истечении его срока службы, что уменьшает вероятность повреждения. Этот инновационный подход применяется в настоящее время к разным источникам нейтронов: как к исследовательским реакторам, так и к ускорителям. Кроме того, по результатам проекта координированных исследований МАГАТЭ, завершено в 2018 году, был сделан ряд других важных выводов в отношении инновационного проектирования, прототипирования и полноразмерного испытания таких передовых замедлителей.

134. Еще одним крупным новшеством стала разработка жидких холодных замедлителей. Для этого требуется с помощью катализаторов (например, параводорода) выделять в жидком водороде одно ядерное спиновое состояние. В таких конструкциях полезные холодные нейтроны могут перемещаться на довольно большие расстояния без дальнейшего взаимодействия, что позволяет конструировать малогабаритные холодные замедлители (пальцеобразные, плоские), вокруг которых можно эффективнее расположить устройства рассеяния нейтронов.

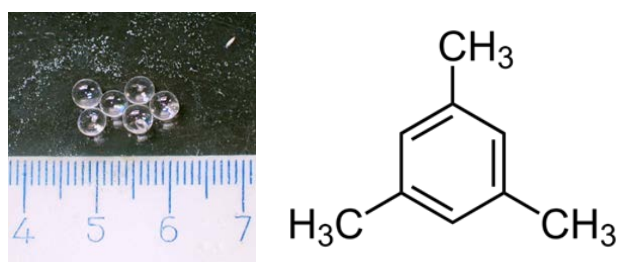


Рис. С-5. Изображение шариков, изготавливаемых и используемых в ОИЯИ в Дубне для замедления быстрых нейтронов (слева), и схема их молекулярной структуры. (Предоставлено ОИЯИ)

Д. Радиационные технологии

Д.1. Мюонная томография: использование космических лучей

135. Мюонная радиография — это развивающаяся технология, в которой используется природный радиационный фон, а именно мюоны космических лучей. На Земле мюоны космических лучей возникают при взаимодействии высокоэнергетических первичных космических лучей с атмосферой. По свойствам они схожи с электронами, но имеют намного большую массу. Космические мюоны обладают примерно в 10 тысяч раз большей энергией, чем обычное рентгеновское излучение, и эта энергия в основном высвобождается в процессе ионизации. Такие частицы могут проникать в очень большие конструкции. Они заряжены и по мере прохождения через материю теряют энергию, оставляя ионизационный след. Это позволяет обнаруживать их сцинтилляционными и ионизационными детекторами и измерять их следы (треки).

136. Основное преимущество этого метода, основанного на рассеянии или поглощении мюонов, заключается в возможности выявлять колебания плотности материалов с большим атомным номером в закрытом объеме (даже в монолите) без повреждений и без использования какого-либо радиоактивного источника. Для мюонной радиографии требуются как минимум две детекторные плоскости, позволяющие определять треки обнаруженных космических мюонов и часто для большего разрешения и эффективности используются три или четыре детекторные плоскости. Малые объекты могут отображаться посредством реконструкции мюонных траекторий до и после взаимодействия с объектом, в то время как для больших целей двухмерное изображение формируется путем сравнения потока с контрольным измерением. Результаты мюонной радиографии могут быть не только двухмерными: вращая сам объект или детекторы вокруг него и комбинируя изображения одного и того же объема, полученные от нескольких детекторов, можно создавать трехмерные изображения.

137. Эта технология находит разнообразные применения по всему миру: это и измерение толщины магмы вулкана на километровой глубине, и поиск еще не обнаруженных полостей в египетской пирамиде⁸ и выявление подземных сооружений в Неаполе, Италия⁹. Как показывают результаты, мюоны можно использовать как новый инструмент изучения строительных конструкций, например зданий, мостов и тоннелей. В последние годы на эту тему появляется все больше публикаций.

⁸ Morishima, K. et al., Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons, Nature 552, 386–390 (2017).

⁹ Saracino, G. et al., Imaging of underground cavities with cosmic-ray muons from observations at Mt. Echia (Naples), Scientific Reports 7:1181 (2017).

D.1.1. Области применения

138. Спектр применений этого метода визуализации продолжает расширяться и включает такие области, как геолого-геофизические исследования, ядерная и физическая ядерная безопасность, строительство и археология. В этих областях мюонная томография может быть подходящим методом визуализации при сочетании определенных условий: присутствия противорадиационного экрана, невысоких требований к разрешению и наличия времени. На рисунке D-1 показаны некоторые из возможных применений.

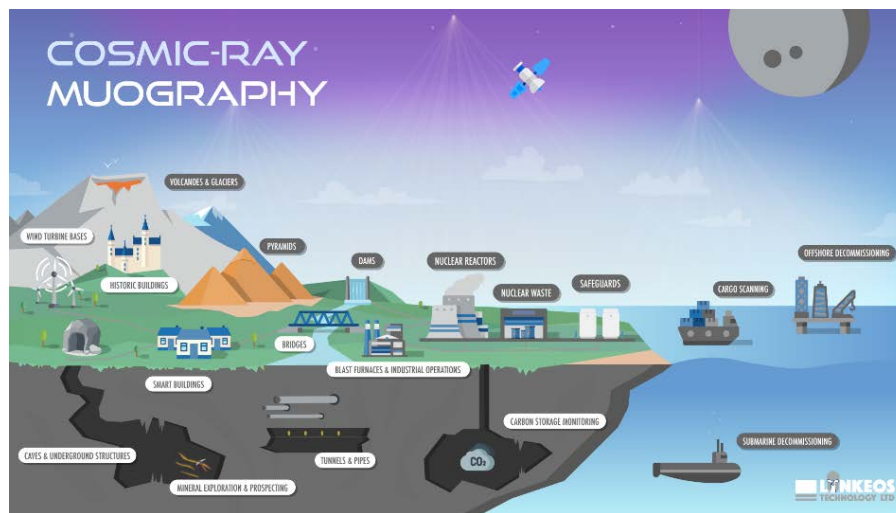


Рис. D-1. Инфографика, иллюстрирующая разнообразные сферы применения мюонной томографии (Источник: Lynkeos Technology Ltd., Соединенное Королевство)

139. В геофизике самым типичным применением этого метода является получение изображений внутреннего строения вулканов. В частности, этот метод использовался вулканологами в Италии, Франции и Японии^{10, 11, 12}. С помощью этой технологии можно предсказывать извержения вулканов и, таким образом, заблаговременно готовиться к стихийным бедствиям и минимизировать их последствия. На рис. D-2 показано первое высококачественное мюографическое изображение вулкана Сакураджима (Япония).

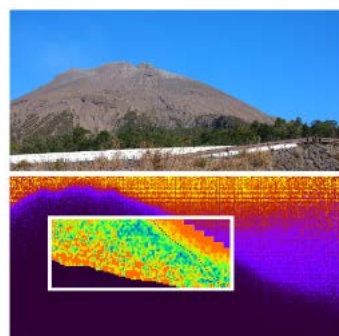


Рис. D-2. Успешная визуализация извергающегося вулкана. На нижней врезке показано внутреннее строение вулкана в разрешении 10×10 м (Фото: Л. Олах и соавт.⁹, Токийский университет, Япония)

¹⁰ D'Alessandro, R., Volcanoes in Italy and the role of muon radiography, Phil. Trans. R. Soc., Volume 377, Issue 2137, Jan. 2019.

¹¹ Oláh, L., Investigation of the limits of high-definition muography for observation of Mt. Sakurajima, Phil. Trans. R. Soc., Volume 377, Issue 2137, Jan. 2019.

¹² Oláh, L., Tanaka, H. K. M., Ohminato, T., and Varga, D., High-definition and low-noise muography of the Sakurajima volcano with gaseous tracking detectors, Scientific Reports 8 3207 (2018) 1–13.

140. Сейчас перед научным сообществом стоит задача создания систем мюонной томографии для промышленных применений. Такое промышленное оборудование, как доменные и вращающиеся печи, подвержено внутреннему износу, который с трудом поддается оценке существующими методами. Эти установки имеют достаточно большие размеры, чтобы визуализировать как пропускание, так и рассеяние мюонов, и оба эти метода можно использовать для количественной оценке износа. Таким образом, мюонная томография позволяет совершенствовать диагностику и делать производственные процессы предприятий более эффективными с точки зрения энергопотребления и затрат. К другим инженерно-строительным применениям относятся мониторинг состояния исторических зданий, крупных конструкций (мостов, ветряных турбин), а также, возможно, нефтепромысловых сооружений. После недавнего обрушения моста в Генуе (Италия) инженерно-строительные применения могут получить новый толчок к развитию.

141. Другие важные применения мюонной радиографии относятся к области ядерной безопасности и физической ядерной безопасности. То, что радиоактивные материалы и отходы хранятся в специальных экранированных контейнерах, не пропускающих радиацию, означает, что для просвечивания их содержимого невозможно использовать такой же вид излучения. Способность мюонной радиографии отличать ядерное топливо от других металлов имеет решающее значение для ее применения в сфере физической ядерной безопасности, например при досмотре грузов спецслужбами¹³, а также для применений, связанных с гарантиями МАГАТЭ, например для контроля контейнеров сухого хранения и определения характеристик радиоактивных отходов прошлой деятельности, имеющих сложную геометрию^{14, 15}.

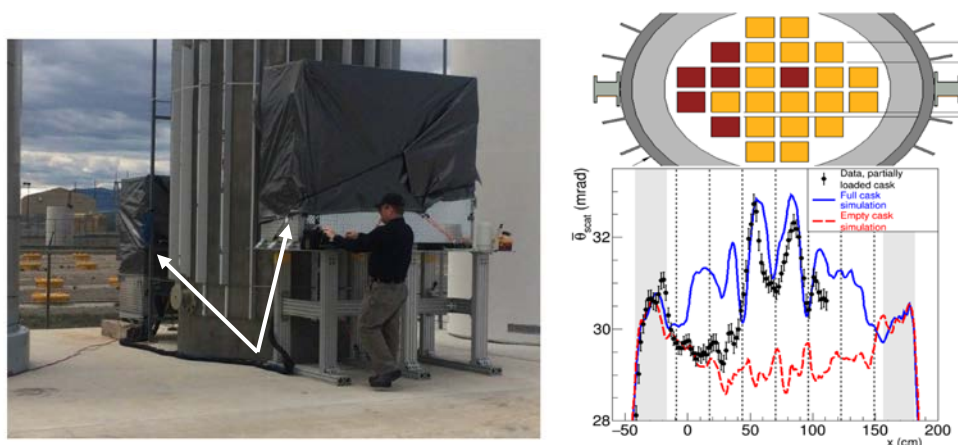


Рис. D-3. Фотография детекторов мюонных треков, расположенных на двух сторонах частично загруженных контейнеров MC-1 (слева). Схема расположения недостающих (выделены красным) и загруженных (выделены желтым) пучков твэлов (справа сверху). Экспериментальный сигнал (черный) в сравнении с расчетами по методу Монте-Карло для полностью загруженного (синий) и пустого (красный) контейнеров (справа внизу). (Фото: Кристофер Моррис, Лос-Аламосская национальная лаборатория, США.)

¹³ Durham, J. M., et al., Verification of Spent Nuclear Fuel in Sealed Dry Storage Casks via Measurements of Cosmic-Ray Muon Scattering, Phys. Rev. Applied 9 044013 (2018).

¹⁴ Morris, C. L., et al., Application of muon tomography to fuel cask monitoring, Phil. Trans. R. Soc., Volume 377, Issue 2137, Jan. 2019.

¹⁵ Yang, G., et al., Novel muon imaging techniques, Phil. Trans. R. Soc., Volume 377, Issue 2137, Jan. 2019.

142. Одним из первых потенциальных применений мюонной томографии, судя по всему, был поиск специальных ядерных материалов внутри грузовых контейнеров. Важными применениями в сфере ядерной безопасности также стали визуализация содержимого контейнеров для ядерных отходов и обеспечение качества процессов обработки таких отходов¹⁶. На площадке в Селлафилде (Соединенное Королевство) недавно была установлена такая демонстрационная система. Наконец, космическими мюонами можно просвечивать и сами ядерные реакторы. В Японии группа исследователей работает над визуализацией расплава ядерного топлива в реакторах АЭС «Фукусима-дайити», опираясь на имитационные модели, которые указывают на возможность такой визуализации¹⁷.

143. Ожидается, что технология мюонной радиографии найдет свое место среди других методов визуализации, учитывая ее особые преимущества: отсутствие радиационной дозы, превышающей естественный фон, способность проникать в объекты большой толщины и возможность измерения как плотности, так и атомного номера. Главным недостатком этой технологии является то, что для многих применений необходима длительная экспозиция.

Е. Здоровье человека

Е.1. Калибровка современных рентгеновских маммографов

Е.1.1. Общие сведения

144. Маммография — это метод визуализации тканей груди с помощью низкодозового рентгеновского излучения для скрининга и диагностики рака груди. Он используется в программах скрининга населения для выявления рака груди на ранних стадиях, и в ходе этого процесса большое число женщин подвергается облучению. При проведении этого обследования важно точно подбирать дозу облучения, чтобы оптимизировать соотношение риска и пользы. Всемирная организация здравоохранения считает ключевым критерием успешного внедрения маммографии как метода визуализации обеспечение качества (ОК). С помощью ОК в маммографической системе можно менять как дозу облучения, так и его характеристики (спектры) в целях повышения качества изображения при сохранении дозы облучения на как можно более низком уровне.

145. Важную роль в процессе такой оптимизации играет точная дозиметрия. Дозиметрическое оборудование, используемое для этих измерений, должно проходить калибровку в авторитетной калибровочной лаборатории. Калибровка должна соотноситься с Международной системой единиц, чтобы все дозы, измеренные в разных учреждениях, могли быть проверены по единому международному эталону и, следовательно, их можно было легко сравнить. Как правило, за это отвечают дозиметрические лаборатории вторичных эталонов (ДЛВЭ), которые проводят прослеживаемую калибровку для нужд больниц.

Е.1.2. Характеристики излучения

146. Для проведения пленочной маммографии традиционно использовались рентгеновские трубки с молибденовым анодом и молибденовым фильтром. Эта характеристика излучения используется как эталон в клинической дозиметрии и калибровке. В современных маммографах

¹⁶ Mahon, D., et al., First-of-a-Kind Muography for Nuclear Waste Characterisation, Phil. Trans. R. Soc., Volume 377, Issue 2137, Jan. 2019.

¹⁷ Miyadera, H., et al., Imaging Fukushima Daiichi reactors with muons, AIP Advances 3 052133 (2013).

используется более широкий спектр характеристик излучения, которые достигаются путем применения различных комбинаций анода и фильтра, а также выбора напряжения на трубке. В цифровых маммографических системах нередко используются рентгеновские трубки с вольфрамовым анодом. С клинической точки зрения это позволяет получать изображение более высокого качества при более низкой дозе для пациента.

147. Характеристики излучения, используемые ДЛВЭ, стандартизированы и в настоящее время основаны на комбинациях анода и фильтра из молибдена. Сложность состоит в том, чтобы полностью охватить используемый в клинической практике спектр характеристик излучения, обеспечив точность измерения во всех клинических ситуациях. Рентгеновские трубки с молибденовым анодом необходимы только для калибровки маммографов, тогда как вольфрамовые аноды, как правило, используются в других видах рентгеновской диагностической радиологии, а также для калибровки соответствующего оборудования. Экономически это может быть невыгодно для ДЛВЭ, так как им приходится приобретать рентгеновские аппараты с молибденовым анодом только для калибровки маммографов.

Е.1.3. Дозиметры

148. Традиционно в медицинской дозиметрии использовались ионизационные камеры. Отклик ионизационных камер, как правило, практически не зависит от энергии падающего пучка. Поэтому они могут использоваться в измерениях в отношении широкого спектра различных характеристик пучка излучения (энергий). В качестве показателя определенной характеристики пучка излучения используется слой половинного ослабления (СПО). Таким образом, для некоторых характеристик излучения могут быть рассчитаны коэффициенты калибровки ионизационных камер, а для других энергий коэффициенты могут быть получены путем интерполяции различных значений СПО. Это значит, что точная дозиметрия может быть проведена в отношении полного спектра различных характеристик излучения, используемых в маммографах в больницах.

149. В последнее время расширяется клиническое использование полупроводниковых дозиметров, которые постепенно приходят на смену ионизационным камерам, так как благодаря более компактному размеру такими дозиметрами проще пользоваться. Кроме того, они позволяют измерять некоторые другие количественные показатели (например, СПО, напряжение на трубке) с помощью лишь одного измерения. Однако зависимость отклика от энергии у них изначально сильнее, чем у ионизационных камер. Поэтому для смягчения этого эффекта производители разрабатывают множество методов внутренней компенсации с учетом характеристики излучения. Однако многие пользователи не понимают в полной мере, на чем основаны такие корректировки. Это является источником дополнительных трудностей при проведении дозиметрии и калибровки дозиметров, используемых в маммографии.

Е.1.4. Калибровки

150. Дозиметрическое оборудование должно регулярно проходить калибровку в ДЛВЭ. При проведении калибровки отклик дозиметра сравнивается с национальными прослеживаемыми эталонами и для дозиметра определяется коэффициент калибровки. Как правило, ДЛВЭ не в состоянии проводить калибровку для множества возможных характеристик пучка излучения, используемых в клинической практике.

151. В случае калибровки ионизационных камер вариабельность характеристик излучения не является проблемой, поскольку их отклик практически не зависит от энергии излучения. Однако с полупроводниковыми дозиметрами дело обстоит иначе в силу большей зависимости их показателей от энергии излучения.

Е.1.5. Перспективы

152. Дозиметрическая лаборатория Агентства (ДОЛ) предоставляет членам сети ДЛВЭ МАГАТЭ/ВОЗ доступ к полному спектру характеристик излучения, которые могут потребоваться при дозиметрии в маммографии. В ДОЛ была проведена калибровка нескольких типов дозиметров. Как свидетельствуют полученные в ДОЛ результаты (рис. Е-1), некоторые новые полупроводниковые дозиметры очень хорошо компенсируют изменения (корректируют показанное значение) характеристик излучения. Это значит, что они могут использоваться для проведения измерений в отношении большого спектра характеристик излучения, применяемых в клинической практике.

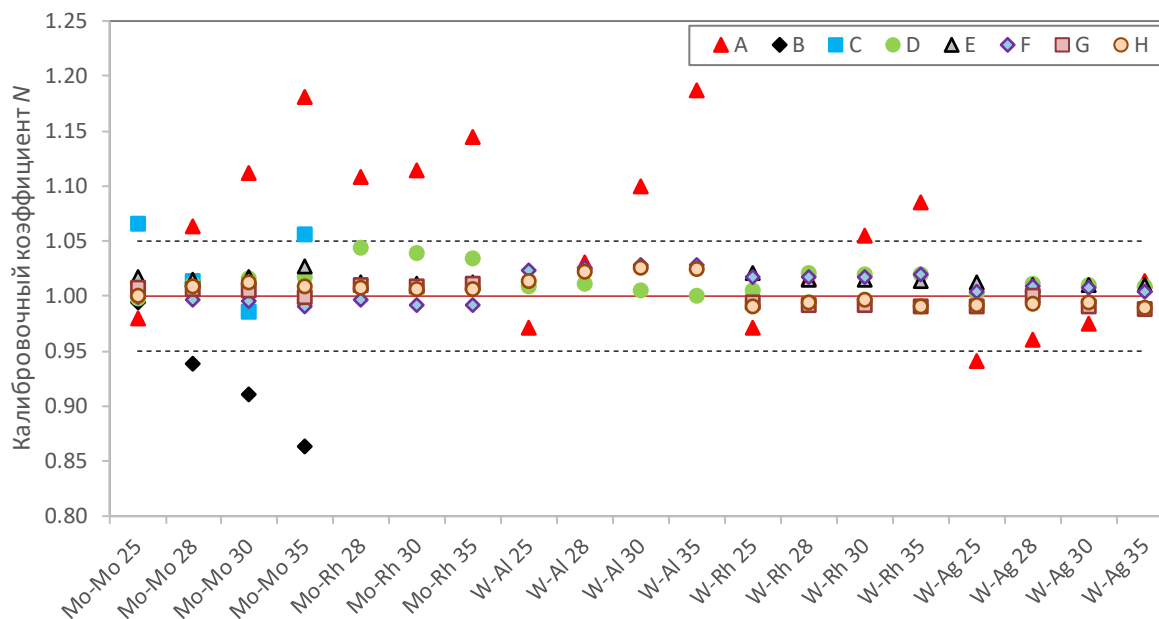


РИС. Е-1. Калибровочный коэффициент N (мГр/мГр), измеренный в Дозиметрической лаборатории Агентства для восьми полупроводниковых дозиметров (А–Н), как функция характеристик излучения.

153. Однако ДЛВЭ в государствах-членах далеко не всегда в состоянии работать со всеми этими характеристиками излучения и проводить калибровку дозиметров, используемых в маммографии. Поэтому производителям полупроводниковых дозиметров рекомендуется разработать стандартизированный метод, который можно будет использовать для калибровки их дозиметров в стандартизированных условиях.

154. Использование устройств с молибденовым анодом и молибденовым фильтром для генерации эталонного набора характеристик излучения в целях калибровки используемых в маммографии дозиметров не соответствует современным клиническим тенденциям. Таким образом, должны быть разработаны новые эталонные характеристики излучения, предполагающие использование вольфрамового анода. У полупроводниковых дозиметров должен иметься режим калибровки, при котором эти эталонные характеристики излучения могли бы использоваться таким образом, чтобы можно было проверить и подтвердить качество работы дозиметра с любыми клинически используемыми характеристиками излучения. Это позволит избежать ошибок при проведении дозиметрии и будет способствовать повышению качества диагностики и скрининга рака груди по всему миру.

Е.2. Радиоуправляемая хирургия в лечении гинекологических раковых заболеваний

Е.2.1. Общие сведения

155. Раковые заболевания — одна из основных причин смертности во всем мире. В случае злокачественных заболеваний вульвы, эндометрия и шейки матки использование радиоуправляемой хирургии позволяет снизить уровень краткосрочной и долгосрочной тяжести заболевания по сравнению с полной лимфодиссекцией.

156. Сигнальный лимфатический узел (СЛУ) — это первый региональный лимфатический узел, который напрямую отводит лимфу от первичной опухоли. Поэтому СЛУ считаются первыми лимфоузлами, в которых появляются метастатические клетки лимфатической системы. В онкологической хирургии (при лечении рака груди и меланомы) выявление и биопсия СЛУ стали рутинной процедурой, которая способствует минимизации хирургического вмешательства.

157. Выявление СЛУ позволяет прогнозировать состояние лимфоузлов и может способствовать снижению заболеваемости по причине избыточного лечения. Кроме того, поскольку выявить микрометастазы при помощи визуализации невозможно, биопсия СЛУ считается единственным надежным методом скрининга лимфатических узлов и выявления микрометастазирования в региональных лимфоузлах.

Е.2.2. Рак шейки матки

158. Рак шейки матки является третьим по частоте гинекологическим раком в развитых странах. При этом в развивающихся странах это наиболее распространенный вид рака и основная причина смертности среди женщин детородного возраста. Как правило, он распространяется локально на соседние органы таза, но может распространяться и на местно-региональные лимфатические узлы, а в редких случаях наблюдается гематогенное метастазирование в легкие, печень, костную ткань или головной мозг. Полезность выявления СЛУ в случае рака шейки матки изучалась на большой выборке из 507 женщин и в рамках обзоров, охватывавших 831 пациента. Использование этого комбинированного метода показало частоту обнаружения 93,5% и 96%, высокую диагностическую ценность отрицательного результата (94% и 97%) и относительное число ложно негативных заключений 8%. Один из важных результатов заключается в высокой частоте обнаружения и высокой диагностической ценности отрицательного результата в случае опухолей размером менее 2 см (94% по сравнению с 84% и 99% по сравнению с 89%).

Е.2.3. Рак эндометрия

159. Рак эндометрия — это наиболее часто встречающееся злокачественное новообразование женской половой системы в развитых странах. Поражение тазовых или параортальных лимфоузлов ухудшает прогноз, а пятилетняя выживаемость в этом случае составляет 44–52%. В случае рака эндометрия высокого риска (G3, поражение миометрия >50%) или гистологических типов опухолей высокого риска (светлоклеточный тип, серозный папиллярный тип, карциносаркома) стандарт оказания медицинской помощи предполагает хирургическое стадирование, включая лимфаденэктомию тазовых и параортальных лимфоузлов. Но в случае рака эндометрия низкого риска частота поражения лимфоузлов очень невелика, и четкого консенсуса в плане оказания помощи пока нет. У некоторых пациентов гистологическая степень злокачественности может быть изменена с высокодифференцированной и повышена после проведения патологического исследования опухоли целиком. В этом случае предварительное хирургическое стадирование дает определенные преимущества.

160. Диагностика поражения лимфоузлов может изменять ход лечения и определять использование адьювантной терапии. Кроме того, важно подчеркнуть тот факт, что для большинства пациентов, проходящих лечение от рака эндометрия, характерен высокий хирургический риск по причине ожирения и сопутствующих расстройств. В этой связи, если выявление СЛУ позволит избегать систематической лимфаденэктомии даже в случае пациентов с опухолями высокого риска, это может способствовать значительному снижению послеоперационных осложнений. Выявление СЛУ может не только обеспечить проведение хирургического стадирования без увеличения числа осложнений, которые могут возникать после полной лимфаденэктомии, но и повысить чувствительность стадирования благодаря использованию иммунохимических методов в отношении отдельных лимфоузлов. Хотя было проведено несколько исследований по выявлению СЛУ при раке эндометрия, на данный момент достаточных для валидации научных доказательств нет.

Е.2.4. Рак яичников

161. Частота вовлечения лимфатических узлов на ранних стадиях рака яичников невелика и составляет от 5,1% до 15%. Лимфаденэктомия тазовых и параортальных лимфоузлов увеличивает время операции и вероятность осложнений. Однако при раке яичников следует рассматривать возможность выявления СЛУ.

Е.2.5. Будущие тенденции

162. К числу наиболее важных достижений в лечении гинекологического рака относится внедрение таких внутриоперационных инструментов, как портативная гамма-камера. Это устройство позволяет проводить визуализацию в процессе операции в целях локализации СЛУ до резекции. После удаления лимфоузла может быть сделано дополнительное изображение операционного поля для подтверждения успешности резекции, свидетельством чего является отсутствие активности. Эта процедура занимает от 5 минут (в случае рака вульвы и рака шейки матки) до 15 минут (в случае рака эндометрия), что относительно немного с учетом общей длительности операции.

163. Гиперметаболическое поведение гинекологических видов рака обуславливает целесообразность диагностики рецидивирующих образований и их локализации под контролем позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ). Рецидив заболевания, легко диагностируемый с помощью ПЭТ/компьютерной томографии, может представлять собой массивный процесс в брюшной полости, лечение которого должно проводиться с помощью химиотерапии, либо небольшой изолированный опухолевый очаг. В подобных случаях портативный внутриоперационный ПЭТ-зонд может направлять действия хирурга во время операции и использоваться для выявления опухолевой массы и ее дифференциации от нормальных или рубцовых тканей. Проведение хирургической операции под контролем ПЭТ особенно полезно для выявления непальпируемых поражений или поражений, закрытых фиброзной тканью. Основная техническая сложность заключается в высоком физиологическом накоплении контраста окружающими тканями, такими как ткани печени, селезенки, почек, мочевого пузыря и т.д. В силу такой высокой активности, а также низкого пространственного разрешения некоторых устройств этот метод не подходит для резекции края поражения. Одним из преимуществ такого рода операций является снижение хирургических осложнений благодаря прямой локализации поражения с помощью зонда и уменьшению размера разреза. Перед операцией рекомендуется сделать ПЭТ в целях локализации опухолевых очагов и составления плана резекции.

164. Несмотря на потенциальные преимущества этой процедуры, операции под контролем ПЭТ пока не слишком широко распространены. Основные проблемы заключаются в следующем: а) неспецифичность локализации, поскольку зонд может выявлять как опухолевые, так и воспалительные очаги; б) технические сложности, которые описаны выше, в связи с высокой накопительной активностью брюшной полости (минимальное рекомендуемое соотношение очаг/фон составляет 1,5:1), а также в связи с тем, что размер зонда не позволяет использовать лапароскопию; в) облучение персонала, хотя определенный в некоторых исследованиях ежегодный максимум для подобных операций составляет 260 часов; г) финансовые причины.

165. Недавно началось тестирование нового индикаторного вещества для гинекологических злокачественных новообразований, особенно рака шейки матки. Новое оборудование для визуализации представляет собой многоспектральную флуоресцентную камеру, с помощью которой в процессе операции можно визуализировать этот индикатор. Флуоресцентный индикатор (индоцианин зеленый) вводится в начале операции на органах таза и визуализируется в ее ходе.

Г. Продовольствие и сельское хозяйство

Г.1. Новые события, указывающие на изменение парадигмы в области облучения пищевых продуктов и фитосанитарного облучения

166. Долгое время идея облучения пищевых продуктов на месте, в рамках обычной коммерческой деятельности была только мечтой. Сегодня эта работа нередко передается на аутсорсинг отдельным крупным предприятиям под управлением специалистов-подрядчиков. Однако появление новых облучателей, дозиметрических систем и применений создает возможности для использования нового подхода. Благодаря новым технологиям уменьшается размер электронно-лучевых генераторов и генераторов рентгеновского излучения, а новые разработки в области облучения при помощи ускорителя заряженных частиц позволяют с большей легкостью устанавливать устройства для облучения на конвейерах по упаковке продуктов питания или на предприятиях по производству продовольствия.

167. Облучение — это обработка продуктов питания путем их просвечивания ионизирующим излучением. Лучи могут проникать через упаковку и пищевой продукт так же, как рентгеновское излучение проникает через тело человека, но, в отличие от рентгеновского излучения, цель в данном случае заключается в том, чтобы при помощи энергии инициировать определенные изменения без существенного повышения температуры. Таким способом могут обрабатываться твердые, расфасованные и даже замороженные пищевые продукты. При этом негативные последствия для продуктов минимальны, а упаковка защищает их после обработки. Однако этот процесс требует материальных и временных затрат, и поэтому производители не облучают пищевые продукты без необходимости. Облучение проводится только в том случае, если оно выгодно с точки зрения поддержания либо повышения качества продукта. В качестве примера можно привести следующие цели: уничтожение бактерий, которые могут вызвать пищевое отравление; сокращение числа микроорганизмов, вызывающих порчу продуктов, благодаря чему продукты дольше остаются свежими; предотвращение прорастания без использования химикатов (например, в случае имбиря, ямса, чеснока, лука и картофеля); проведение фитосанитарной обработки для предупреждения распространения инвазивных организмов (мух, долгоносиков, клещей и других насекомых, а также потенциально слизней, улиток и даже нежелательных семян). Последняя цель особенно важна с точки зрения международной торговли

свежими овощами и фруктами, вместе с которыми могут путешествовать вредители, укореняясь в новых местах обитания и нанося там ущерб местной окружающей среде и сельскому хозяйству. В то время как на использование химических веществ для фумигации накладывалось все больше ограничений из медицинских и/или экологических соображений, облучение не оставляет вредных химических следов и оказывает минимальное вредное воздействие на качество пищевых продуктов.

168. Для проведения облучения требуются мощные источники ионизирующего излучения, обращаться с которыми нужно грамотно. Большая часть пищевых продуктов облучается с помощью гамма-излучения, источником которого является кобальт-60. Энергия гамма-излучения кобальта-60 составляет 1,17 и 1,33 МэВ при нулевой массе. Поэтому оно может проникать в большие объемы крупногабаритных грузов (например, грузовые поддоны с мешками специй могут быть облучены за один раз). Источник излучения ослабевает примерно на один процент в месяц (период полураспада кобальта-60 составляет примерно пять лет). Поэтому для получения того же объема энергии (дозы облучения) время воздействия необходимо немного корректировать каждый месяц. Со временем требуется пополнение источника.

169. Иногда облучение пищевых продуктов производится с помощью излучения электронного пучка (ЭП). Энергия ЭП может достигать 10 МэВ; каждый электрон в электронном пучке имеет общий отрицательный электрический заряд и небольшую, но измеримую массу. Хотя это означает, что ЭП можно включить, когда это необходимо, направить и сфокусировать с помощью магнитных полей, это также означает, что они активно взаимодействуют и сталкиваются с атомами в пищевых продуктах, быстро передавая энергию высокой интенсивности на сравнительно коротком расстоянии. Поэтому ЭП не проникают глубоко и подходят для облучения упакованных продуктов толщиной в несколько сантиметров.

170. Существенно меньше продуктов питания обрабатываются рентгеновским излучением. В ходе этого процесса производится бомбардировка электронным пучком металлической мишени для превращения кинетической энергии электронов в рентгеновское излучение, как правило, с энергией до 5 МэВ, но в некоторых странах до 7,5 МэВ. Имея нулевую массу, рентгеновские лучи обладают такой же проникающей способностью, как и гамма-лучи, так что рентгеновским излучением можно за один раз обработать большие поддоны с крупногабаритными грузами. Однако при воздействии ЭП с металлической мишенью теряется большое количество энергии, превращаясь в тепло, и лишь несколько процентов ее преобразуется в рентгеновское излучение.

171. ЭП и рентгеновские лучи генерируются с помощью специальных устройств, а различные характеристики и интенсивность пучка могут устанавливаться посредством изменения настроек этих устройств или путем внесения конструктивных изменений. В отличие от кобальта-60, эти источники могут быть при необходимости выключены. Кроме того, как свидетельствует история, эти устройства открывают широкий простор для технологических инноваций.

172. Однако какой бы источник облучения ни использовался — радионуклид или облучатель с ускорителем заряженных частиц, — современная бизнес-модель, как правило, предполагает, что объект, на котором проводится облучение, — это самостоятельная организация, оказывающая подобные услуги другим сторонам на условиях подряда. Коммерческие облучательные установки нередко располагаются на основных торговых путях или в транспортных узлах, например в грузовых терминалах морских портов и аэропортов. Сама установка представляет собой, по сути, большой склад, в центре которого находится облучатель. На этом складе пищевые продукты попадают из сектора необлученных товаров (зоны приемки товаров) в облучательную камеру, где они в течение фиксированного времени подвергаются воздействию пучка излучения и, следовательно, конкретной минимальной дозы излучения, а затем попадают

в сектор облученных товаров (зону выдачи товаров). Здесь товары находятся до того момента, пока не будет подтверждено, что они прошли надлежащую лучевую обработку. Для этого проверяется зафиксированное время воздействия и подтверждающие это показания дозиметров, которые сопровождали товары в ходе всего процесса. После подтверждения того, что пищевые продукты были должным образом облучены, производится их отправка в соответствии с указаниями владельца.

173. Использование этого устоявшегося способа обработки, скорее всего, продолжится. Однако благодаря новым технологиям облучатели становятся миниатюрнее, и, хотя в настоящее время в таких уменьшенных облучателях устанавливаются низкоэнергетические источники излучения, они используются в промышленности для стерилизации упаковочного материала, медицинского оборудования и биологических проб на заводах в рамках обычного производственного процесса. Со временем эти небольшие электронно-лучевые генераторы и генераторы рентгеновского излучения могут стать более мощными и, следовательно, более пригодными для облучения пищевых продуктов. Возможно, в будущем благодаря таким разработкам пищевые продукты можно будет облучать на упаковочных конвейерах, в ходе производства или при сборе урожая свежих овощей и фруктов. Пришло время заложить прочное техническое основание для смены парадигмы в области электронно-лучевого и рентгеновского облучения, чтобы в конечном итоге предложить новые бизнес-возможности в сфере облучения пищевых продуктов и фитосанитарного облучения. В сотрудничестве с Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных Наций Агентство стремится к ускорению исследований и разработок с целью раскрыть потенциал практического применения электронно-лучевых и рентгеновских методов для создания новых и усовершенствованных способов облучения продуктов питания.

174. В настоящее время в США проводятся исследования в целях разработки низкоэнергетического (160 кэВ) рентгеновского облучателя в портативном корпусе¹⁸, который будет генерировать ионизирующее излучение для облучения фруктов в ящиках в целях уничтожения насекомых-вредителей в порядке карантинной обработки. В Республике Корея проводятся исследования по оценке воздействия низкоэнергетического рентгеновского излучения на микробиологические, физико-химические и органолептические свойства (цвет, вкус, запах и текстуру) пищевых продуктов. Идея заключается в том, чтобы использовать небольшие корпусные рентгеновские устройства в больницах для обеспечения безопасности пищевых продуктов для пациентов высокого риска (например, с ослабленным иммунитетом). Исследователи из Польши и Японии ведут совместную работу над новым подходом к облучению пищевых и сельскохозяйственных продуктов, который связан с ограниченной проникающей способностью электронов с энергией менее 300 кэВ. Это новый способ уничтожения бактерий, плесени и дрожжевого грибка на поверхности пищевых продуктов. Было проведено сравнение такого метода обработки с традиционным облучением при помощи ЭП (10 МэВ) черного перца горошком, белого перца горошком и душистого перца горошком. В плане сокращения и уничтожения микробов поверхностная обработка оказалась не менее эффективной, чем традиционное облучение¹⁹.

175. Также идет работа над созданием инструментов для облучательных установок на базе ускорителей заряженных частиц. В Китае прошла проверку концепция рентгеновского устройства для сканирования упакованных продуктов перед радиационной обработкой на

¹⁸Follett, P., Kirk, R., A portable cabinet X-ray machine to control insects in exported fruit https://www.cherrygrowers.org.au/assets/PASE_Portable_X-ray_Machine.pdf

¹⁹ Gryczka, U., Migdał, W., Bulka, S., The effectiveness of the microbiological radiation decontamination process of agricultural products with the use of low energy electron beam, *Radiation Physics and Chemistry* 143 (2018) 59–62.

предмет соответствия упаковки спецификации, что необходимо для надлежащего электронно-лучевого облучения²⁰. Во Вьетнаме ведется работа над аналогичной концепцией, но для сканирования упакованных продуктов перед электронно-лучевой обработкой используется гамма-излучение из небольших коллимированных источников кобальта-60. Оба устройства были опробованы на коммерческих ЭП-облучателях. Как было установлено, они позволяют быстро измерять массовую толщину (ключевой параметр в ЭП) и точно предсказывать распределение дозы от ЭП-облучения, используя разные алгоритмы. Благодаря этому можно быстро оценить эффективность ЭП-облучения, а путем моделирования перед проведением обработки как таковой можно оптимизировать конфигурацию продукта. В рамках новейшего научного исследования в Китае проводится тестирование системы, которая моделирует распределение дозы в трех измерениях, что может коренным образом изменить дозиметрию в области радиационной обработки.

176. В 2015 году группа компаний «Бюлер», занимающаяся инженерным обеспечением пищевой промышленности, наладила стратегическое партнерство с производителем небольших электронно-лучевых ламп «КОМЕТ». Совместно они выпустили устройство для микробной деконтаминации сухеных продуктов с помощью низкоэнергетических ЭП²¹. Ряд этих новых устройств в настоящее время проходят оценку на различных объектах по обработке специй. Компания «Мевекс», поставщик услуг по электронно-лучевой и рентгеновской обработке, разработала Mevex X-ray Box — компактную рентгеновскую систему с собственным защитным экраном для научных исследований и для коммерческой обработки в небольших масштабах товаров высокой стоимости, включая пищевые и сельскохозяйственные продукты. Облучатель вместе с экраном занимает примерно два квадратных метра площади и выпускается в модификациях с энергией до 2 МэВ. Он рассчитан на облучение дозами высокой мощности изделий не более 40 см высотой, размещаемых на поворотном столе диаметром 40 см. Китайская компания «НукТек», разработчик крупных электронно-лучевых и рентгеновских облучателей, работает над созданием новаторского устройства для определения массовой толщины, которое можно будет запустить в массовое производство и установить на ЭП-облучателях для оценки и проверки продуктов и, возможно, топографирования дозы перед облучением, что позволит сэкономить время и средства, а также повысить производительность.

Г.2. Использование ядерных технологий для быстрой адаптации к изменению климата сельскохозяйственных культур и систем земледелия

177. Засуха, экстремальные температуры, наводнения и скудность питательных веществ в почве или ее минеральная токсичность — все это влияет на урожайность как прямо (через воздействие на укоренение и рост растений), так и косвенно (через воздействие на характер и интенсивность биотических стрессов, таких как болезни, насекомые и сорняки). Если не принять надлежащих адаптационных мер в сфере растениеводства, изменение климата приведет к снижению урожайности, результатом чего станет утрата продовольственной безопасности и развал систем продовольственного снабжения, особенно в развивающихся странах. Кроме того, это может вызвать изменения в географическом распределении сельскохозяйственных культур.

²⁰ Qin, H., et al., Concept development of X-ray mass thickness detection for irradiated items upon electron beam irradiation processing, *Radiation Physics and Chemistry* 143 (2018), 8–13.

²¹ Hertwig, C., Meneses, N., Mathys, A., Cold atmospheric pressure plasma and low energy electron beam as alternative nonthermal decontamination technologies for dry food surfaces: A review, *Trends in Food Science & Technology* 77 (2018) 131–142.

178. Катастрофические потери сельскохозяйственных культур, вызванные изменением климата, требуют разработки инновационных схем селекции в целях обеспечения глобальной продовольственной безопасности. В постгеномную эру сочетание таких методов, как мутационная селекция растений, маркерная селекция и высокопроизводительное фенотипирование, представляет собой мощный инструмент, позволяющий быстро адаптировать растения к изменению климата. Как правило, целью селекции растений является повышение продуктивности сельскохозяйственных культур в условиях абиотических и биотических стрессов, с которыми они сталкиваются в каждый вегетационный период.

F.2.1. Использование маркерной мутационной селекции для ускоренного выведения климатически оптимизированных сортов растений

179. Мутационная селекция растений по-прежнему является самым быстрым способом создания новых генетических вариаций в целях быстрой адаптации к изменению климата. Ключевым фактором ускорения такой адаптации является совместное использование методов мутационной селекции и экономически эффективных методов высокопроизводительного генотипирования следующего поколения. Этот процесс помогает ученым изучить молекулярные основы генетических вариаций, создаваемых в ходе мутационной селекции, результатом чего является разработка и использование молекулярных маркеров, которые ускоряют отбор и выведение новых сортов. Таким образом, ускорению селекции способствуют технологии молекулярных маркеров, основанные на исследованиях по полногеномному поиску ассоциаций, а также на более прицельном выявлении, валидации и использовании генетических ассоциаций конкретной аллели/семейства генов/пути гена с фенотипическим поведением.

180. На данный момент Агентство совместно с ФАО разработало процедуру экономически эффективного выявления индуцированных мутаций, вызывающих тот или иной фенотип, и начало информировать об этой процедуре государства-члены в рамках программы стажировок. Уже разработаны молекулярно-биологические протоколы, и ведется работа по выделению вычислительных ресурсов, необходимых для анализа данных. Эта процедура способствует использованию подходов к генетическому картированию, в основе которых лежит секвенирование следующего поколения. Одним из важнейших достижений 2018 года стало первое применение молекулярно-маркерного анализа в лабораториях Агентства, в частности в отношении важного в кормовом отношении признака ячменя (оранжевая нижняя цветковая чешуя). Были выявлены мутации, вызывающие появление этого признака, и проведен маркерный анализ. В настоящее время в рамках программы селекции ячменя проводится анализ генотипирования, имеющий целью интрогрессирование признака оранжевой нижней цветковой чешуи на безостый озимый кормовой ячмень. Такой анализ позволяет сделать правильный прогноз фенотипа и, следовательно, полезен для маркерной селекции. Кроме того, проводится пилотное исследование с использованием скороспелого низкорослого сорго. Его задача состоит в том, чтобы попытаться картировать признаки путем полногеномного секвенирования нескольких сотен образцов из расщепляющейся популяции сорго, после чего должен быть проведен анализ различающихся генотипов в целях выявления каузальных генетических локусов (рис. F-1, F-2).

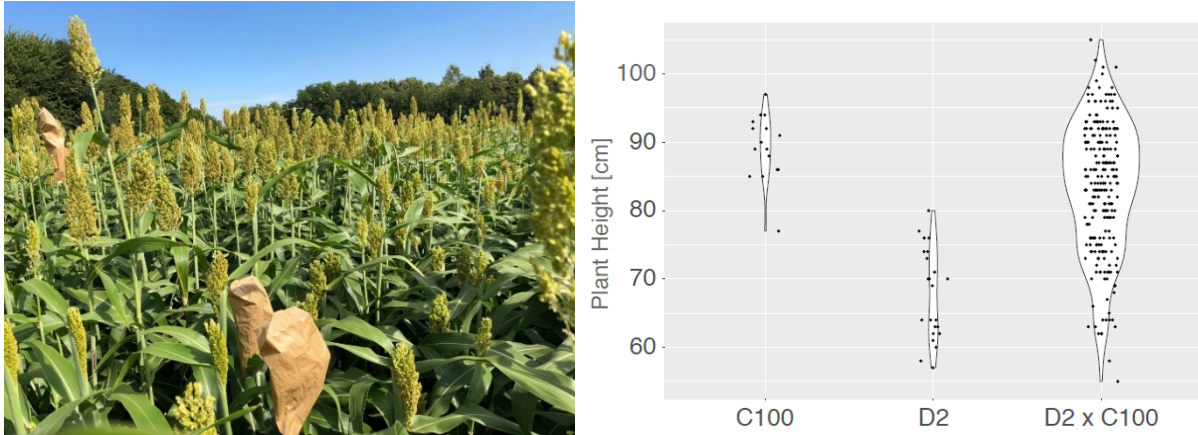


РИС. F-1. Растения, произрастающие в Зайберсдорфе, Австрия (лето 2018 года); менделевское расщепление мутантной карликовости. Справа показано распределение растений по высоте для диких сортов, мутантного сорта потомства F2.

181. Хотя мутационная селекция в сочетании с молекулярно-маркерной технологией является конечной целью с точки зрения ускорения адаптации сельскохозяйственных культур к изменению климата мутационная селекция сама по себе продолжает использоваться для адаптации сортов к неблагоприятным климатическим условиям. Благодаря получению технологии мутационной селекции в Пакистане недавно были выведены три мутантных сорта хлопчатника, которые адаптированы к высоким температурам и при этом дают стабильный урожай волокна нужного качества. Примерно 20% хлопковых полей в Пакистане сегодня засажены этими мутантными сортами, и этот показатель, как ожидается, увеличится в ближайшие 2–3 года до 30–40%. Аналогичным образом, фермеры в Замбии и Зимбабве недавно отметили увеличение урожайности вигны китайской на 10–20% благодаря использованию выведенных с помощью мутационной селекции сортов, которые отличаются повышенной устойчивостью к засухе и насекомым-вредителям.

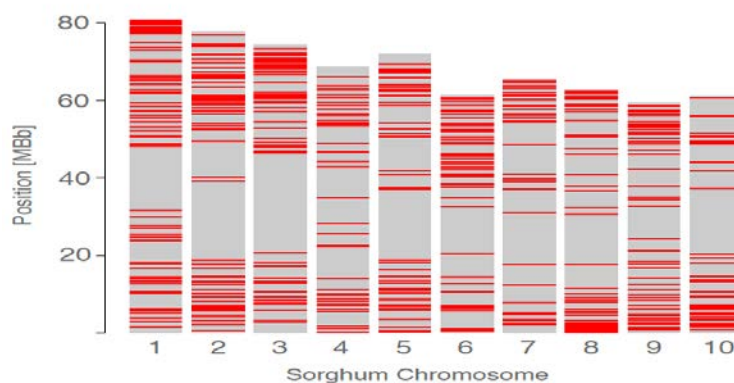


РИС. F-2. Распределение в хромосомах сорго однонуклеотидного полиморфизма и небольших инсерционно-делеционных мутаций, которые были выявлены с помощью полногеномного секвенирования шести мутантных линий.

Ф.2.2. Использование рентгеновской компьютерной томографии для высокопроизводительного неинвазивного фенотипирования растений

182. Сегодня отсутствие возможностей для проведения неинвазивного высокопроизводительного скрининга целых растений или тканей растений считается серьезным препятствием на пути улучшения сельскохозяйственных культур, особенно на этапе отбора более удачных образцов. Растет популярность ядерной магнитно-резонансной визуализации как средства изучения сосудистой системы растений, т. е. ксилемы и флоэмы, а также связанной с ней гидродинамики. Еще одна ядерная технология — рентгеновская компьютерная томография (КТ) — также часто используется сегодня в немедицинских целях, в том числе в растениеводстве, а получаемые с ее помощью оценки, позволяющие прогнозировать морфологические и анатомические признаки растений, все чаще используются в фенотипировании растений. К числу примеров использования рентгеновской КТ в растениеводстве относятся следующие: скрининг выживаемости растений в условиях нехватки воды; оценка устойчивости растений к затенению и улавливания света листьями; анализ болезней корневой системы; анализ развития корневой системы и взаимодействия корней. Преимущества этих технологий связаны в основном с их неинвазивным характером и способностью оценивать физиологические процессы в режиме реального времени. Продолжается совершенствование приборов фиксации изображений как на макроскопическом, так и на микроскопическом уровне, а масштабы высокопроизводительного использования рентгеновской КТ постепенно растут. Дополнение устоявшихся геномно-молекулярных схем, используемых в мутационной селекции растений, и действующих протоколов фенотипирования неинвазивными методами ядерной визуализации с высокой производительностью позволит разработать ускоренную схему мутационной селекции растений.

Ф.3. Инновационное применение изотопных и ядерных методов в питании животных

183. Согласно прогнозам, к 2050 году глобальный спрос на продукты животного происхождения вырастет на 60–70%²². Для того чтобы надлежащим образом решить колоссальную по масштабам задачу увеличения поставок молока, мяса, яиц и других съедобных животных продуктов в заданный срок, потребуется техническое перевооружение производственных систем в животноводстве. Для удовлетворения прогнозируемого спроса в области питания животных будет необходимо удвоить поставки кормов и фуража, а также площади пастбищ, лугов и выгонов надлежащего качества. Эта ситуация еще больше осложняется усилением конкуренции за пищевые ресурсы между человеком и животными, а также негативным влиянием животноводства на окружающую среду.

184. В настоящее время около 800 млн тонн зерновых культур (треть всего объема производства) используется в качестве корма для сельскохозяйственных животных, а к 2050 году этот показатель, как ожидается, превысит 1,1 млрд тонн²³. По оценкам, в 2006 году глобальные выбросы парниковых газов (ПГ), связанные с животноводством, составили 7,1 гигатонны эквивалента CO₂, или 14,5% всех антропогенных выбросов ПГ²⁴. Инновационные исследования и разработки, обеспечивающие интеграцию ядерных методов с традиционными технологиями, необходимы не только для совершенствования существующих систем стойлового кормления и выпаса, но и для расширения круга источников пищи и фуража за счет неиспользуемых лугов и

²² FAO, The future of food and agriculture: Trends and challenges (2017) FAO, Rome <http://www.fao.org/3/a-i6583e.pdf>

²³ Makkar, H. P. S., Review: Feed demand landscape and implications of food-not feed strategy for food security and climate change, *Animal* 12 (2018) 1744–1754.

²⁴FAO, Key facts and findings, <http://www.fao.org/news/story/en/item/197623/icode>

пастбищ, побочных продуктов производства и пищевых отходов, массового производства одноклеточных водорослей и аквапонного производства кормов, а также исследования других, менее известных и нетрадиционных источников кормов. Это поможет сформировать качественный массив данных и подготовить информацию для обоснованного принятия политических решений и привлечения потенциальных инвесторов.

185. Более 40% суши, за исключением Гренландии и Антарктиды, покрыто лугами, которые могли бы приносить пользу миллионам фермеров по всему миру, если бы их удалось приспособить для использования в качестве источника пищи для сельскохозяйственных животных²⁵. В тропиках основными видами сельскохозяйственных животных являются жвачные животные, и их продуктивность в значительной степени зависит от выпаса на естественных пастбищах (рис. F-3). Ядерные и изотопные методы могут использоваться для формирования массива данных об употребляемой пище, пищевых предпочтениях и содержании питательных веществ в травах и побегах, из которых состоит рацион животных. Такая информация необходима для принятия различных управленческих решений, в частности в целях оптимального распределения фуража между различными видами животных, выбора надлежащих видов растений для повторного засева деградировавших пастбищ и выгонов, а также разработки соответствующих стратегий использования пищевых добавок. Эффективное использование лугов также способствует повышению секвестрации углерода, мелиорации земель и продуктивности животноводства.



РИС. F-3. В Зимбабве совместный выпас животных, питающихся травой и побегами, является общепринятой практикой на общинных лугах.

F.3.1. Использование ядерных методов для анализа и улучшения питания пастбищных животных

186. Было установлено, что традиционные технологии, предполагающие проведение опытов по откорму *in-vivo*, анализ усвояемости *in-vitro* и броматологический анализ источников пищи и кормов для животных, используемых в системе стойлового кормления, неэффективны как средство оценки самостоятельного потребления корма и пищевых предпочтений пастбищных животных. Последние достижения в разработке инструментов и протоколов совместного применения инновационных ядерных и традиционных технологий открывают возможности для решения тех задач, которые требуют анализа и оценки потребления пищи животными на разнородно засеянных пастбищах, их пищевых предпочтений и усвояемости.

187. Совместно с государствами-членами Агентство занимается разработкой инструментов в области питания животных, которые позволят обеспечить интегрированное применение компонентно-специфических стабильных изотопов углерода-13, получаемых из длинноцепочечных *n*-алканов, и спектроскопии в ближней инфракрасной области (БИК-спектроскопии) для оценки потребления пищи жвачными сельскохозяйственными животными, их пищевых предпочтений, состава рациона и усвояемости.

²⁵ Suttie, J. M., Reynolds, S. G., Batello, C., Grasslands of the World (2005) Rome, FAO
<http://www.fao.org/docrep/008/y8344e/y8344e05.htm>

Это помогает оптимизировать потребление питательных веществ сельскохозяйственными животными путем использования пищевых добавок в процессе выпаса, предупреждая чрезмерное стравливание пастбищ и выгонов.

Ф.3.2. Н-алканы помогают оценить потребление пищи, усвояемость и пищевые предпочтения

188. На поверхности всех высших растений, составляющих основу питания животных, есть слой воска (состоящий из н-алканов), который значительно различается у разных видов. С помощью количественного анализа этих веществ из разных видов растений можно понять, какие из них входят в рацион того или иного животного. Таким образом, н-алканы используются как фекальные маркеры для оценки усвояемости растений, а анализ таких данных вместе с данными о каловыделении позволяет оценить потребление пищи животными. Источником н-алканов, используемых в качестве фекальных маркеров, может быть еда (внутренние маркеры) либо они могут вводиться перорально (внешние маркеры). С помощью н-алканов можно дифференцировать множество растений, потребляемых жвачными животными, однако далеко не все. В частности, невозможно провести различие между десятками растений, которые произрастают на разнородно засеянных пастбищах. Решить эту задачу можно с помощью обогащения н-алканов изотопами углерода. Совместное использование н-алканов и углерода-13 доказало свою высокую эффективность для оценки потребления пищи, состава рациона и усвояемости. После омыления, извлечения и очистки компонентно-специфических изотопов углерода (углерод-13/углерод-12) проводится их анализ методом газовой хроматографии/сжигания/масс-спектрометрии изотопных соотношений. Кроме того, для определения содержания углерода-13, была успешно использована многообещающая инновационная лазерная технология — внутрирезонаторная лазерная спектроскопия — благодаря чему измерения обеспечивались в более сжатые сроки и упрощалась предварительная обработка образцов.

Ф.3.3. БИК-спектроскопический анализ остаточных питательных веществ в фекалиях помогает оценить содержание питательных веществ в пище, самостоятельное потребление пищи и пищевые предпочтения

189. БИК-спектроскопический анализ предполагает освещение образцов пищи или фекалий светом ближней части инфракрасного диапазона широкого спектра (используется множество длин волны или частот). Такой свет может поглощаться, передаваться, отражаться или рассеиваться рассматриваемым образцом. Длина волны обычно находится в пределах 800–2500 нм. Интенсивность светового излучения как функция волны измеряется до и после взаимодействия с образцом, после чего рассчитывается вызванное образцом диффузное рассеивание, которое представляет собой комбинацию поглощения и рассеивания. БИК-спектроскопия позволяет получить качественные данные по сырому белку, содержанию клетчатки, доле растительных видов и морфологических компонентов, самостоятельному потреблению пищи и ее усвояемости. При сравнении анализа разделенных образцов с помощью мокрого химического метода и БИК-спектроскопии с использованием двойного слепого метода стандартные отклонения в случае БИК-спектроскопии были на 60–85% меньше. Это указывает на то, что при БИК-спектроскопии совершается меньше человеческих ошибок и получаемые данные отличаются меньшим разбросом значений, чем при традиционном мокром химическом анализе²⁶.

²⁶ De Ondarza, M. B., Ward, R., Accurate analysis: NIRS versus wet chemistry, Hoards Dairyman (February 2013) 129, <http://www.foragelab.com/Media/Accurate%20analysis%20NIRS%20versus%20wet%20chemistry.pdf>

190. БИК-спектроскопия стала универсальным методом, который не требует подготовки образца, позволяет сократить затраты и время анализа, а также сканировать образец через стекло и упаковочный материал.

Ф.3.4. Энерго-дисперсионная рентгеновская флюоресценция позволяет точно определить содержание минералов в фураже

191. На фураж приходится значительная доля рациона жвачных животных. Однако концентрация в нем минеральных веществ может сильно различаться, влияя на продуктивность и здоровье животных. Энерго-дисперсионная рентгеновская флюоресценция (ЭДРФ) — это неразрушающий метод спектроскопии многоминерального состава, обеспечивающий простоту, точность и последовательность при проведении минералогического анализа. Этот метод предполагает сканирование высушенных и измельченных образцов фуража, полученных из самых разных свежих растений, сена или силоса, при 20–40 кэВ с использованием алюминиевого фильтра и калибровки при помощи надлежащего программного обеспечения, например Bruker SpectraEDX («Брукер», Гамбург, Германия)²⁷. При определении концентрации обычных минеральных веществ в рационах жвачных животных (натрия, магния, фосфора, серы, хлора, кальция, калия, марганца, железа, меди и цинка) коэффициент детерминации варьировался от 0,93 до 0,99, тогда как коэффициент вариации находился в допустимых пределах (5–14%). ЭДРФ может применяться в полевых условиях в различных животноводческих системах для определения концентрации минеральных веществ. Полученные данные могут служить основой для использования минеральных добавок в целях улучшения здоровья и повышения продуктивности животных.

192. Питание — это основа прибыльного и устойчивого животноводства. Оно влияет на рост, здоровье, благополучие, продуктивность животных и на качество продукции. На питание приходится более 70% расходов в животноводстве. Питание не только зависит от доступности ресурсов, но и само оказывает непосредственное влияние на ресурсную бузу (пастбища, луга и окружающую среду). Для того чтобы удовлетворить постоянно растущий спрос на продукты животного происхождения, необходимо повышать продуктивность животноводства и ограничивать его воздействие на окружающую среду. Для достижения этой цели можно задействовать все три описанные выше технологии, которые при условии их валидации и совместного использования могут дать полную информацию о содержании питательных веществ в пище и фураже, а также о доступности пищи и фуража, их привлекательности для животных и усвояемости, так как именно эти факторы влияют на превращение питательных веществ в энергию и обеспечивают рост, здоровье и продуктивность. С помощью методов, предполагающих использование углерода-13 и n-алканов, можно определить, какие растения были употреблены в пищу, ЭДРФ дает представление о минеральном составе рациона, а БИК-спектроскопия позволяет оценить состав остаточных питательных веществ в фекалиях животных. В настоящее время БИК-спектроскопия используется у откармливаемых в стойле животных для оценки потребления пищи, структуры рациона и содержания питательных веществ. Что касается пастбищных животных, то метод на основе углерода-13 и технология ЭДРФ могут использоваться вместе с БИК-спектроскопией. Совместное применение всех трех методов позволяет комплексно оценить содержание питательных веществ в пище, потребление пищи и состав рациона (рис. F-4). Кроме того, технологии БИК-спектроскопии и ЭДРФ отличаются мобильностью, требуют минимального технического обслуживания, не требуют

²⁷ Berzaghi, P., Lotto, A., Mancinelli, M., Benozzo, F., Technical note: Rapid mineral determination in forages by X-ray fluorescence, *Journal of Dairy Science* 101 (2018) 9967–9970.

подготовки образцов, и для них характерна более низкая доля человеческих ошибок по сравнению с мокрым химическим анализом. В будущем будет разработан интегрированный подход к использованию этих трех технологий, что позволит определять количество и качество употребленной пищи.

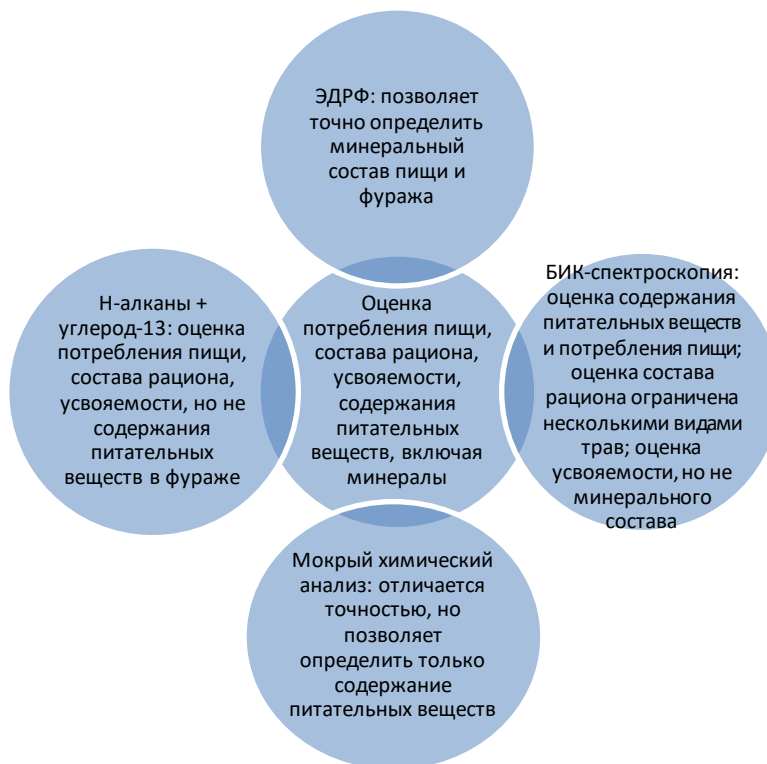


РИС. F-4. Валидация с помощью математического алгоритма совместного использования БИК-спектроскопии с технологией n-алканов и данными их стабильных изотопов углерода, а также задействование энерго-дисперсионной рентгеновской флюоресценции для проведения минералогического анализа обеспечивают комплексное мобильное решение, позволяющее проводить анализ пищи и фуража и оценивать питание животных.



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(63)/INF/2