

Шестидесятая очередная сессия

Обзор ядерных технологий – 2016

Доклад Генерального директора

Резюме

- В ответ на просьбы государств-членов Секретариат ежегодно подготавливает всеобъемлющий обзор ядерных технологий. Ниже прилагается доклад нынешнего года, в котором освещаются заметные события, происшедшие в 2015 году.
- В "Обзоре ядерных технологий – 2016" рассматриваются следующие отдельные области: энергетические применения, усовершенствованные ядерные и термоядерные системы, применения ускорителей и исследовательских реакторов, ядерные методы в промышленности, визуализация тела человека в здравоохранении, достижения в области борьбы с переносимыми насекомыми болезнями и рациональное использование почв.
- В данный документ были внесены изменения, с тем чтобы в максимально возможной степени учесть конкретные замечания Совета управляющих и другие замечания, полученные от государств-членов.

Обзор ядерных технологий – 2016

Доклад Генерального директора

Резюме

1. В конце 2015 года во всем мире насчитывалось 441 действующий ядерный энергетический реактор и общемировая генерирующая мощность АЭС составляла 382,9 ГВт (эл.). Пять реакторов были окончательно остановлены, десять реакторов подключены к энергосетям – наивысший показатель с 1990 года – и начато строительство восьми новых реакторов. Как и прежде, перспективы роста в краткосрочной и долгосрочной перспективе связывались прежде всего с Азией, особенно с Китаем. Из всех 68 строящихся реакторов 45 находились в Азии, и там же размещались 39 из 45 реакторов, которые были подключены к энергосетям в период после 2005 года.

2. Сегодня ядерно-энергетическими мощностями располагают 30 стран, и примерно такое же число стран изучают возможность включения ядерной энергетики в национальную структуру энергопроизводства, строят соответствующие планы или уже активно работают над этим. Из 30 стран, эксплуатирующих АЭС, 13 сооружают новые станции, либо активно завершают ранее приостановленные проекты строительства, а 12 планируют построить новые станции или завершить приостановленные проекты строительства. По прогнозам, выполненным Агентством в 2015 году, к 2030 году мощность ядерной энергетики при низком сценарии возрастет примерно на 2% и при высоком сценарии – на 70%. Все большее признание получает роль ядерной энергетики в уменьшении выбросов парниковых газов. Уже обеспечивая значительный вклад в смягчение последствий изменения климата благодаря исключению выбросов почти 2 млрд тонн углекислого газа ежегодно, ядерная энергетика может непосредственно способствовать достижению целей в области устойчивого развития, поставленных Организацией Объединенных Наций.

3. На атомных электростанциях (АЭС) всего мира продолжали совершенствоваться системы безопасности. Агентство опубликовало доклад МАГАТЭ об аварии на АЭС "Фукусима-Дайити". На Дипломатической конференции договаривающиеся стороны Конвенции о ядерной безопасности (КЯБ) приняли Венское заявление о ядерной безопасности, включающее ряд принципов предотвращения аварий с радиологическими последствиями и смягчения таких последствий в случае их возникновения.

4. Мировые обогатительные мощности по-прежнему превосходили совокупный годовой спрос, а другие звенья топливного цикла функционировали на более или менее постоянном уровне. С подписанием в августе 2015 года Соглашения с принимающим государством (СПГ) и сопутствующих технических соглашений с Казахстаном была окончательно сформирована необходимая нормативная база для создания банка низкообогащенного урана (НОУ) МАГАТЭ.

5. Объемы отработавшего ядерного топлива, находящегося на хранении, достигли примерно 266 000 т ТМ, при этом темпы его накопления составляют около 7000 т ТМ/год. Переработка отработавшего топлива коммерческих реакторов по-прежнему осуществлялась на 10 установках в пяти государствах-членах.

6. Ожидается, что в ближайшие годы предстоит выполнить значительный объем работы по выводу объектов из эксплуатации: во всем мире 157 ядерных энергетических реакторов были окончательно остановлены либо выводятся из эксплуатации. Более 56% всех действующих реакторов находятся в строю уже более 30 лет, а около 15% из них – более 40 лет. Хотя некоторые из этих реакторов могут продолжать работать и далее, многие установки будут выведены из эксплуатации в ближайшие два десятилетия. Кроме того, выведены из эксплуатации или находятся на этапе вывода из эксплуатации более 480 исследовательских реакторов и критических сборок и несколько сотен других установок топливного цикла.

7. Была выдана первая лицензия на строительство пункта для глубокого геологического захоронения отработавшего ядерного топлива – объекта "Онкало" в Финляндии. В мире функционируют пункты захоронения для всех других категорий радиоактивных отходов. В нескольких странах серьезно рассматриваются различные варианты захоронения и удаления изъятых из употребления закрытых радиоактивных источников (ИЗРИ), включая совместное захоронение с другими отходами в приемлемых пунктах, рециклирование, возвращение в страну происхождения и захоронение в специально пробуренных скважинах. В результате успешного проведения в 2015 году операций по удалению ИЗРИ многие такие источники были помещены на хранение в надлежащих условиях.

8. В ряде государств-членов продолжались работы по исследованиям, разработке и внедрению усовершенствованных атомных реакторов. В мире растет интерес к разработке и внедрению реакторов на быстрых нейтронах. Проявляется также растущий интерес к реакторам малой и средней мощности или модульным реакторам (РМСМ) в связи с необходимостью обеспечения гибкого производства электроэнергии, повышения уровня безопасности с помощью пассивных средств безопасности, а также повышения экономической доступности. Существует примерно 50 проектов и концептов РМСМ, и три реактора находятся в стадии строительства.

9. В ряде государств-членов широкий интерес вызывает использование ядерной энергии для неэлектрических применений, таких как для опреснение морской воды, производство водорода, централизованное теплоснабжение, добыча нефти третичными методами и другие промышленные применения.

10. На площадке Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР) продолжались работы по строительству реактора с целью обеспечения выработки энергии путем реализации управляемого термоядерного синтеза, т.е. путем решения величайшей инженерной задачи XXI века.

11. Ускорители протонов или ионного пучка высокой энергии становятся все более востребованными в таких областях, как физика элементарных частиц, ядерная и нейтронная физика, а также трансмутация долгоживущих ядерных отходов.

12. В мире примерно половина из 246 действующих в 55 странах исследовательских реакторов и критических установок имеют срок службы свыше 40 лет. Основными задачами, стоящими перед сообществом пользователей исследовательских реакторов, являются управление старением, обеспечение устойчивости поставок топлива, определение вариантов обращения с отработавшим топливом и повышение эффективности использования исследовательских реакторов. Такие инициативы, как "Реакторная интернет-лаборатория",

создание международного центра МАГАТЭ на базе исследовательского реактора, а также региональные сети и объединения призваны содействовать развитию международного сотрудничества в области создания потенциала, включая образование и подготовку кадров. В восьми странах строятся новые исследовательские реакторы, а в ряде других стран разрабатываются планы или изучается вопрос о строительстве новых установок, которые станут основными национальными установками, способствующими развитию инфраструктуры и программ в области ядерной науки и технологий, включая ядерную энергетику.

13. Продолжалась деятельность по сведению к минимуму используемого высокообогащенного урана (ВОУ), включая возвращение ВОУ топлива исследовательских реакторов в страну происхождения. В осуществлении программы возврата ВОУ топлива американского и российского происхождения за прошедшие годы были достигнуты заслуживающие высокой оценки результаты. Узбекистан стал еще одной страной в числе 28 стран¹, ранее имевших ВОУ, которые сейчас стали свободными от ВОУ.

14. В 2015 году большого дефицита медицинского изотопа молибден-99 не было, однако на перерабатывающих установках и старых исследовательских реакторах эксплуатационные проблемы по-прежнему возникали. Благодаря изменениям в структуре спроса, успехам в повышении КПД и диверсификации поставок отрасль успешно справлялась с незначительными незапланированными останками в производстве.

15. Ядерные методы широко используются в промышленных процессах для исследования сложных физических и химических явлений, в том числе износа, массопереноса, коррозии и эрозии. В случаях, когда поверхности не являются легкодоступными или скрыты под вышележащими структурами, ядерный метод тонкослойной активации позволяет эффективно измерять и контролировать износ и коррозию. Ультратонкослойная активация обеспечивает чувствительность измерения потерь поверхностного слоя порядка нескольких нанометров.

16. Предусматривается использование новых радиационно-обработанных продуктов, таких как радиационно-синтезированные наноразмерные материалы различных форм и размеров (наночастиц, нановолокон, нанопор) для создания активной упаковки продуктов питания и раневых перевязочных материалов, а также для применения в качестве средств доставки лекарственных препаратов. Разрабатывается "активная" или "умная" упаковка с превосходными газобарьерными свойствами, которая способна предотвращать поступление кислорода и выход инертных газов из упаковки пищевых продуктов, тем самым продлевая срок годности продуктов. Пленка такого рода может быть изготовлена путем внедрения в ее структуру особых наночастиц, которые могут содержать ферменты, антибактериальные агенты и другие компоненты, помогающие сдерживать деградацию пищевых продуктов и их порчу.

17. В области печати и нанесения покрытий потребность в технологиях, снижающих загрязнение окружающей среды и позволяющих избегать попадания деградированных побочных продуктов в потребительские товары обусловила появление слаботочных электронных ускорителей с энергией пучка менее 300 кэВ для нанесения покрытий. Использование в покрытиях, красках и клеях отверждаемых излучением мономеров и олигомеров с их полимеризацией и последующей сшивкой исключает применение летучих органических соединений. Новейшая разработка нового поколения компактных и простых в эксплуатации излучателей электронного пучка с ускоряющим напряжением в диапазоне от 80 до 200 кВ и шириной участка обработки до 60 см может дополнительно способствовать внедрению этой технологии.

¹ Плюс Тайвань, Китай.

18. В сфере здравоохранения значительный интерес проявляется к ведущейся разработке инструментов оценки композиционного состава тела, так как имеющиеся данные свидетельствуют о том, что отдельные компоненты состава тела оказывают значительное влияние на возникновение риска появления хронических болезней, прогрессирование заболевания и реакцию на лечение. В настоящее время используются три метода визуализации для оценки состава тела: двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия (ДРА), количественная компьютерная томография (ККТ) и магнитно-резонансная томография (МРТ). Двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия обеспечивает одновременное получение изображений в двух различных энергетических уровнях рентгеновского излучения и является очень точным методом измерения минеральной плотности костной ткани, костной массы, жировой массы, мышечной массы мягких тканей и жира в процентах.

19. Недавно в качестве новых платформ были предложены двух- и трехмерные (2D и 3D) системы сканирования поверхностей всего тела для оценки состава тела, и благодаря своей высокой доступности, низкой стоимости и большому объему данных по регионам тела эти системы могут быть эффективными инструментами оценки регионального состава тела. Измерения с использованием 3D-сканеров поверхности характеризуются очень высокой точностью, и 2D-измерения формы тела могут быть выполнены с использованием стандартного цифрового фотоаппарата. Недавно было показано, как индексы жировой и безжировой массы тела могут быть определены на базе простых силуэтов всего тела, которые можно легко получать с помощью обычных камер, подобных камерам, встроенным в мобильные телефоны, и, таким образом, двумерные оптические измерения состава тела могут с успехом использоваться в широком диапазоне полевых применений.

20. Комплексное применение радиационных, генетических и симбионтных методов борьбы с комарами – переносчиками болезней может способствовать снижению соответствующего бремени болезней. Пилотные проекты показывают, что метод стерильных насекомых (МСН) можно интегрировать с другими методами борьбы с целью эффективного подавления популяций комаров. Для реализации МСН и других связанных с этой технологией мероприятий по подавлению популяций комаров требуется обеспечивать массовое производство насекомых, однако при этом важно, чтобы в природную среду выпускались только самцы комаров, так как переносчиками болезней являются исключительно самки этих насекомых. Разделение по признаку пола на основе полового диморфизма и использования кровяного корма с отравляющими добавками с целью выбраковки самок в процессе производственного разведения насекомых возможно лишь в небольшом масштабе, однако для простого и надежного отделения самок комаров при разведении насекомых в массовом масштабе необходимы эффективные и устойчивые линии с генетическим определением пола. В настоящее время продолжается работа по выявлению новых морфологических или условных летальных маркеров у *Anopheles arabiensis*, *Aedes albopictus* и *Aedes aegypti* в целях получения эффективных линий с генетическим определением пола.

21. Наряду с обычным МСН, в котором применяется облучение, в настоящее время проводится оценка *Wolbachia* – рода симбиотических бактерий, наследуемых по материнской линии, которые в изобилии имеются у насекомых, в качестве дополнительного инструмента подавления значительных популяций комаров-переносчиков в некоторых районах посредством использования эффекта цитоплазматической несовместимости (метода несовместимых насекомых – МНН). В условиях отсутствия устойчивых линий с генетическим определением пола предложение объединить МСН с подходом, основанным на использовании *Wolbachia*, представляется решением, имеющим большой потенциал в качестве эффективной и биологически безопасной технологии борьбы с популяциями комаров – переносчиков болезней, так как эта технология позволяет устранять риски, связанные с выпуском в

окружающую среду фертильных и способных к передаче болезней самок. Динамический подход к подавлению популяций, объединяющий МСН с другими совместимыми методами в программе борьбы с насекомыми-вредителями в масштабах района, возможно, является единственным способом устойчивого регулирования численности популяций комаров и потенциальным средством борьбы со многими болезнями, переносчиками которых они являются.

22. Деграция почв в результате ненадлежащей практики ведения сельского хозяйства приводит к утрате плодородной почвы и потерям урожайности сельскохозяйственных культур. Утрата пахотных земель и отложение осадков и загрязнение рек и озер также представляют собой серьезную угрозу для окружающей среды, экономического и социального развития. До 1,4 миллиарда человек могут быть подвержены воздействию, которое оказывает на них процесс деградации земель, и стоимость потерь экосистемных услуг, согласно оценкам, составляет 10,6 триллиона долларов в год.

23. В стратегиях, помогающих оценивать эрозию почвы и количественно определять эффективность мер по сохранению почв, уже давно используются измерения радионуклидов, содержащихся в выпадениях (РНВ), таких как цезий-137, источником которых являются проведенные в прошлом испытания термоядерного оружия, и геогенных радиоизотопов природного происхождения, таких как свинец-210, а также космогенных радиоизотопов, таких как бериллий-7. Недавно разработанный криминалистический метод стабильных изотопов, основанный на изучении ассоциированных с компонентно-специфическими стабильными изотопами (КССИ) сигнатур характерных биомаркеров органической части почвы, позволяет различать и определять источники отложений. Связывая характерные признаки КССИ, свидетельствующие о происхождении отложений, с данными по РНВ, касающимися их перераспределения в почве и отложениях, исследователи могут получить точный и эффективный инструмент для определения происхождения отложений с целью выявления зон, подверженных процессам эрозии почвы. Применение указанных комплексных изотопных подходов может позволить сельским общинам принимать конкретные и эффективные смягчающие меры для сведения к минимуму потерь плодородия почв, урожайности сельскохозяйственных культур и ухудшения качества воды.

Обзор ядерных технологий – 2016

Основной доклад

А. Энергетические применения

А.1. Ядерная энергетика сегодня

1. По состоянию на 31 декабря 2015 года в мире эксплуатировался 441 ядерный энергетический реактор суммарной мощностью 382,9 ГВт (эл.)² (см. таблицу А-1). Это приблизительно на 6,6 ГВт (эл.) превышает суммарную мощность 2014 года.
2. Из общего числа находящихся в эксплуатации реакторов 81,6% составляют реакторы с легководным замедлителем и теплоносителем, 11,1% – реакторы с тяжеловодным замедлителем и теплоносителем, 3,4% – легководные реакторы с графитовым замедлителем и 3,2% – газоохлаждаемые реакторы. Две установки представляют собой быстрые реакторы с жидкометаллическим теплоносителем.
3. 10 сентября 2015 года в Японии был запущен на полную мощность первый после аварии на АЭС "Фукусима-дайити" ядерный энергетический реактор – "Сендай-1", после чего 15 октября 2015 года был выполнен запуск блока "Сендай-2". В мае 2015 года Управление по ядерному регулированию Японии одобрило запуск энергоблока "Иката-3", санкционированный затем собранием префектуры Эхиме в октябре 2015 года.
4. В 2015 году было объявлено об окончательной остановке пяти энергоблоков в Японии ("Генкай-1", "Михама-1" и "Михама-2", "Симане-2" и "Цуруга-1"), реактора АЭС "Графенрайнфельд" в Германии и реактора "Уилфа-1" в Соединенном Королевстве.
5. В 2015 году к энергосети были подключены десять новых реакторов, что представляет собой наивысший показатель с 1990 года. Восемь из этих энергоблоков ("Чанцзян-1", "Фанчэнган-1", "Фанцзяшань-1", "Фуцин-2", "Хунъяньхэ-3", "Ниндэ-3", "Янцзян-2" и "Янцзян-3") находятся в Китае, один ("Син-Уольсон-2") – в Республике Корея и один (энергоблок № 4 Белоярской АЭС) – в Российской Федерации.
6. В 2015 году было начато строительство восьми реакторов: "Фанчэнган-3", "Фуцин-5" и "Фуцин-6", "Хунъяньхэ-5" и "Хунъяньхэ-6" и "Тяньвань-5" в Китае, К-2 в Пакистане и "Барака-4" в Объединенных Арабских Эмиратах.
7. По состоянию на 31 декабря 2015 года на стадии строительства находилось 68 реакторов. Согласно прогнозам, рост мощностей, а также развитие ядерной энергетики в краткосрочной и долгосрочной перспективе будет происходить преимущественно в Азии (рис. А-1), прежде всего в Китае. Из общего числа строящихся реакторов 45 располагаются в Азии, и там же находятся 39 из 45 новых реакторов, подключенных к энергосети в период с 2005 года.

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

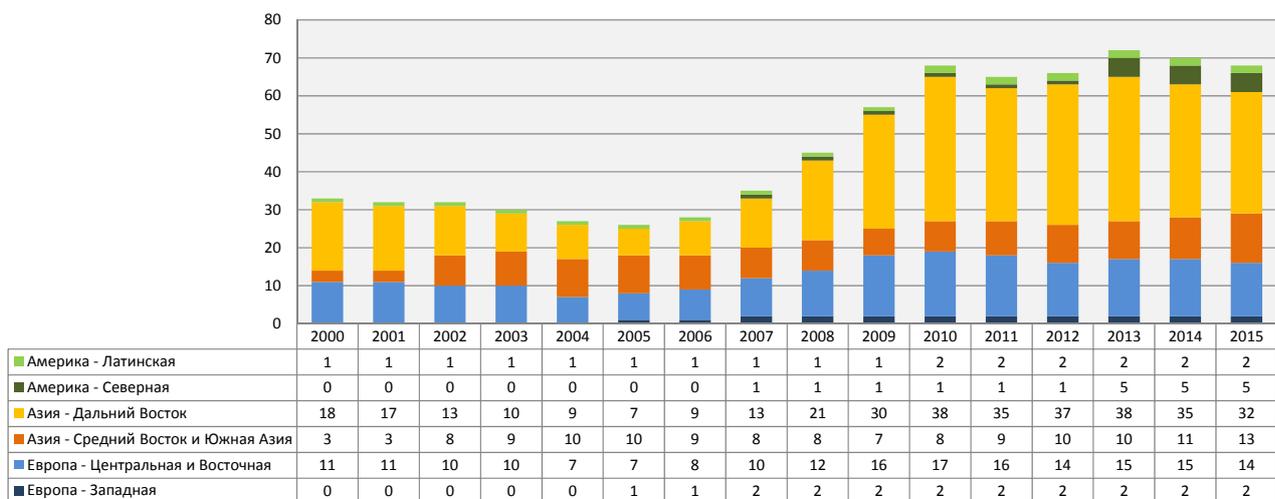


РИС. А-1. Число строящихся реакторов по регионам (Источник: Информационная система по энергетическим реакторам, <http://www.iaea.org/pris>)

Таблица А-1. Действующие и строящиеся ядерные энергетические реакторы в мире (по состоянию на 31 декабря 2015 года)^а

СТРАНА	Действующие реакторы		Строящиеся реакторы		Электроэнергия, произведенная на АЭС в 2015 году		Общий опыт эксплуатации на конец 2015 года	
	Число энергоблоков	Всего МВт (эл.)	Число энергоблоков	Всего МВт (эл.)	ТВт·ч	% от общего объема производства	Годы	Месяцы
АРГЕНТИНА	3	1 632	1	25	6,5	4,8	76	2
АРМЕНИЯ	1	375			2,6	34,5	41	8
БЕЛАРУСЬ			2	2 218				
БЕЛЬГИЯ	7	5 913			24,8	37,5	275	7
БОЛГАРИЯ	2	1 926			14,7	31,3	159	3
БРИЗИЛИЯ	2	1 884	1	1 245	13,9	2,8	49	3
ВЕНГРИЯ	4	1 889			15,0	52,7	122	2
ГЕРМАНИЯ	8	10 799			86,8	14,1	816	7
ИНДИЯ	21	5 308	6	3 907	34,6	3,5	439	6
ИРАН, ИСЛАМСКАЯ РЕСП.	1	915			3,2	1,3	4	4
ИСПАНИЯ	7	7 121			54,8	20,3	315	1
КАНАДА	19	13 524			95,6	16,6	693	6
КИТАЙ	31	26 774	24	24 128	161,2	3,0	209	2
КОРЕЯ, РЕСПУБЛИКА	24	21 733	4	5 420	157,2	31,7	474	0
МЕКСИКА	2	1 440			11,2	6,8	47	11
НИДЕРЛАНДЫ	1	482			3,9	3,7	71	0
ОБЪЕД. АРАБСКИЕ ЭМИРАТЫ			4	5 380				
ПАКИСТАН	3	690	3	1 644	4,3	4,4	64	8
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ	35	25 443	8	6 582	182,8	18,6	1 191	4
РУМУНИЯ	2	1 300			10,7	17,3	27	11

СЛОВАКИЯ	4	1 814	2	880	14,1	55,9	156	7
СЛОВЕНИЯ	1	688			5,4	38,0	34	3
СОЕД. КОРОЛЕВСТВО	15	8 918			63,9	18,9	1 559	7
СОЕД. ШТАТЫ АМЕРИКИ	99	99 185	5	5 633	798,0	19,5	4 111	4
УКРАИНА	15	13 107	2	1 900	82,4	56,5	458	6
ФИНЛЯНДИЯ	4	2 752	1	1 600	22,3	33,7	147	4
ФРАНЦИЯ	58	63 130	1	1 630	419,0	76,3	2 048	4
ЧЕШСКАЯ РЕСПУБЛИКА	6	3 930			25,3	32,5	146	10
ШВЕЙЦАРИЯ	5	3 333			22,2	33,5	204	11
ШВЕЦИЯ	10	9 648			54,5	34,3	432	6
ЮЖНАЯ АФРИКА	2	1 860			11,0	4,7	62	3
ЯПОНИЯ	43	40 290	2	2 650	4,3	0,5	1 739	0
Всего ^{b,c}	441	382 855	68	67 442	2 441,3		16 536	7

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

б. Примечание: суммарные показатели включают следующие данные по Тайваню, Китай:

6 энергоблоков мощностью 5032 МВт (эл.) в эксплуатации; 2 энергоблока мощностью 2600 МВт (эл.) в стадии строительства;

на АЭС выработано 40,8 ТВт·час электроэнергии, что составляет 18,9% общего производства электроэнергии;

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 на Тайване, Китай (200 лет, 1 месяц).

8. Из 441 действующего ядерного энергетического реактора 250 находились в строю 30 и более лет. По окончании проектного срока службы реактора для продления или обновления лицензии на его эксплуатацию на период после истечения первоначально установленного срока службы производится анализ безопасности реактора и оценка старения его основных конструкций, систем и элементов.

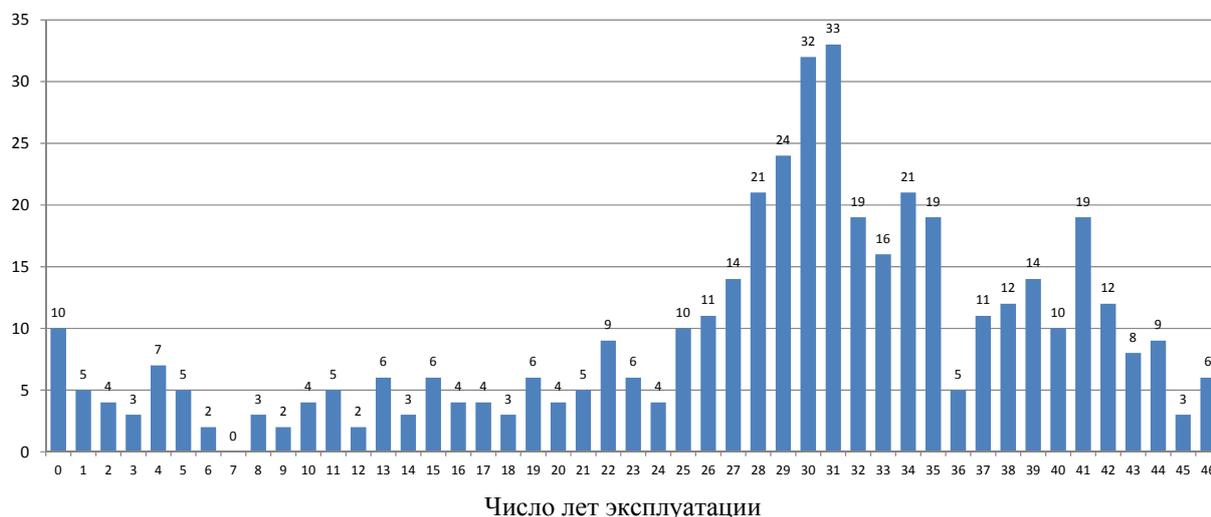


РИС. А-2. Распределение действующих энергетических реакторов по длительности эксплуатации на декабрь 2015 года (Источник: Информационная система по энергетическим реакторам, <http://www.iaea.org/pris>)

9. В марте в Объединенных Арабских Эмиратах Ядерно-энергетическая корпорация Эмиратов от имени организации "Навах" подала заявку на получение лицензии на эксплуатацию 1-го блока АЭС "Барака". "Навах" будет выполнять функции эксплуатирующей организации и лицензиата в отношении данного энергоблока. Ожидается, что Федеральное управление по ядерному регулированию выдаст лицензию на эксплуатацию в октябре 2016 года, после чего в реактор будет загружено топливо и он будет введен в эксплуатацию в горячем режиме. Находящиеся на стадии строительства 2-й, 3-й и 4-й блоки АЭС "Барака" планируется ввести в эксплуатацию к 2018, 2019 и 2020 годам, соответственно. В феврале 2015 года Агентство организовало в ОАЭ миссию в рамках комплексных услуг по рассмотрению вопросов регулирования, в марте – миссию по рассмотрению аварийной готовности и в мае – миссию Международной консультативной службы по физической защите.

10. Продолжается строительство обоих энергоблоков первой АЭС Беларуси. Ввод в эксплуатацию блоков "Островец-1" и "Островец-2" намечен на 2018 и 2020 годы, соответственно.

11. Турция продолжает развитие инфраструктуры для своей ядерно-энергетической программы: в настоящее время дорабатывается проект закона о ядерной энергии, в котором исчерпывающим образом будут учтены вопросы безопасности, физической безопасности и гарантий.

12. В Бангладеш была учреждена компания "Атомная электростанция "Руппур", которая будет выполнять функции оператора станции, и начались переговоры с Российской Федерацией по кредитному соглашению и генеральному контракту на выполнение инженерно-строительных работ. В Польше, где планируется к 2019 году определиться с технологией и площадкой для первой АЭС, в 2022 году начать строительство и к 2029 году ввести в эксплуатацию первый энергоблок, уже разработана конкурсная документация и завершены переговоры о создании механизма государственной поддержки, утверждение которого намечено на 2018 год. Во Вьетнаме реализованы национальные проекты по развитию людских ресурсов и информационно-просветительской работе с населением и продолжается пересмотр закона об атомной энергии, который планируется вынести на утверждение в 2016 году.

13. В ходе миссий по комплексному рассмотрению ядерной инфраструктуры в Нигерию (июнь), Кению (август) и Марокко (октябрь) был отмечен достигнутый странами прогресс в создании ядерной инфраструктуры и вынесены рекомендации относительно дальнейшей деятельности. В июне 2015 года Иордания подписала с ЗАО "Атомстройэкспорт", Российская Федерация, контракты на проведение изысканий по водоснабжению и наблюдения за работами на площадке. В октябре была учреждена Иорданская ядерно-энергетическая компания. В настоящее время проводится техническая оценка предложений по исследованию развития энергосети и рынка электроэнергии, а также по предоставлению консультационных услуг по техническим, правовым и финансовым аспектам разработки проектов. В ноябре Египет подписал соглашение о строительстве четырех энергоблоков с Государственной корпорацией по атомной энергии "Росатом".

14. Во многих странах, рассматривающих возможность развития ядерной энергетики, усилия сосредоточены на принятии тщательно обоснованного решения, создании комплексной правовой и регулирующей инфраструктуры, необходимой для реализации ядерно-энергетической программы, и на подготовке требуемых кадровых ресурсов.

15. Важной задачей для стран, находящихся на разных стадиях создания ядерной инфраструктуры, остается привлечение к участию в процессе заинтересованных сторон, что помогает государствам-членам решать проблемы на ранних этапах и разъяснять целесообразность ядерно-энергетической программы, связанные с ней планы и освещать ход реализации программы. В 2015 году Агентство организовало миссии экспертов по вопросам участия заинтересованных сторон в Египет, Индонезию и Саудовскую Аравию, а также провело международные совещания по этой тематике в Финляндии и Японии.

A.1.1. Увеличение мощностей

16. В США Комиссия по ядерному регулированию (КЯР) выдала компании "Теннесси вэлли аторити" лицензию на эксплуатацию 2-го блока АЭС "Уоттс Бар" сроком действия на 40 лет, до октября 2055 года. "Уоттс Бар" стала первой АЭС, которая уже удовлетворяет выработанным после аварии на АЭС "Фукусима-дайти" требованиям КЯР относительно стратегий смягчения последствий аварий.

17. Строительство реактора EPR на 3-м блоке АЭС "Фламанвиль" во Франции идет по графику; подключение к энергосети намечено на конец 2018 года. По требованию Французского управления по ядерной безопасности проводится ряд испытаний с целью удостовериться в том, что металлургические и механические свойства верхней и нижней крышек корпуса реактора соответствуют требованиям.

18. Компания "Нуклеоэлектрика Аргентина" и Национальная ядерная корпорация Китая (НЯКК) завершили переговоры по техническим и коммерческим контрактам на строительство в Аргентине четвертого реактора "Атуча-3", типа CANDU, сооружение которого будет длиться восемь лет. В рамочном соглашении, заключенном этими организациями, предусматривается строительство в Аргентине пятого энергоблока на основе спроектированного в Китае реактора с водой под давлением "Хуалун-1".

19. В Финляндии компания "Фенновойма" подала в Министерство занятости и экономики заявку на получение лицензии на строительство АЭС "Ханхикиви". Ожидается, что рассмотрение заявки продлится не менее двух лет. "Фенновойма" намерена приступить к строительству в 2018 году станции, основу которой составит спроектированный в России водородной энергетический реактор мощностью 1200 МВт (эл.) (ВВЭР-1200), а в 2024 году начать ее эксплуатацию.

A.1.2. Эксплуатация имеющихся мощностей

20. На принятие решений о сроках эксплуатации прежде всего влияет состояние электроэнергетического рынка и прогнозы развития энергетики, в некоторых случаях – в сочетании с социальными и политическими факторами. В Швеции раньше запланированного срока будут остановлены четыре реактора в силу признания их нерентабельными. В 2019 году будет окончательно остановлен 2-й блок АЭС "Рингхальс", а в 2020 году – "Рингхальс-1", хотя изначально остановка обоих блоков была запланирована на 2025 год. Окончательное решение о сроках остановки 1-го блока АЭС "Оскарсхамн" будет принято, как только будет готов график вывода установки из эксплуатации. "Оскарсхамн-2", выведенный из эксплуатации в июне 2013 года для проведения широкомасштабной модернизации, так и не будет запущен вновь.

21. В США корпорация "Энтерджи" до июня 2019 года остановит принадлежащую ей одноблочную АЭС "Пилгрим" в штате Массачусетс. Кроме того, в конце 2016 – начале 2017 года компания намерена также остановить АЭС "Фитцпатрик" в штате Нью-Йорк, указывая в качестве причины снижение рентабельности станции.

22. В Республике Корея до 2017 года был продлен срок эксплуатации самого старого в стране действующего реактора "Кори-1", который работает с 1978 года, а в 2007 году прошел модернизацию. Поскольку Корейская компания по гидро- и ядерной энергетике объявила, что не будет подавать заявку на продление лицензии до 2027 года, "Кори-1" станет первым в стране энергоблоком, который будет переведен на этап вывода из эксплуатации после его остановки в июне 2017 года.

А.2. Прогнозы развития ядерной энергетики

23. Согласно прогнозам Агентства, составленным в 2015 году (см. рис. А-3), общемировые мощности ядерной энергетики при высоком сценарии вырастут с текущего уровня 381,7 ГВт (эл.) до 632 ГВт (эл.) в 2030 году, т.е. прирост за 15 лет составит приблизительно 70%. При низком сценарии ядерно-энергетические мощности в 2030 году составят 385 ГВт (эл.), т.е. останутся примерно на нынешнем уровне. Эти цифры приводятся с учетом вывода установок из эксплуатации, фактически же в последующие 15 лет будет введено около 150 ГВт (эл.) новых мощностей при низком сценарии и 300 ГВт (эл.) – при высоком сценарии. Увеличение горизонта прогнозирования дает прирост мощностей ядерной энергетики к 2050 году до 964 ГВт (эл.) при высоком сценарии и фактический нулевой прирост при низком сценарии.

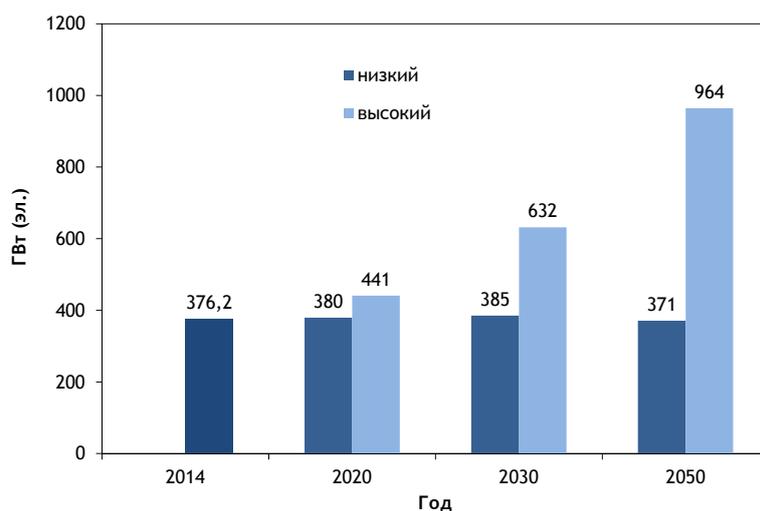


РИС. А-3. Прогнозы роста общемировых мощностей ядерной энергетики (Источник: "Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050" ("Оценки по энергии, электроэнергии и ядерной энергетике на период до 2050 года") (IAEA Reference Data Series No. 1, 2015))

24. Высокие сценарии, разработанные МАГАТЭ, Международным энергетическим агентством ОЭСР (МЭА) и Всемирной ядерной ассоциацией (ВЯА), единообразно указывают на рост мощностей к 2030 году в диапазоне от 600 до 700 ГВт (эл.), в то время как низкие сценарии отражают более высокий уровень неопределенности в отношении темпов роста (см. рис. А-4).

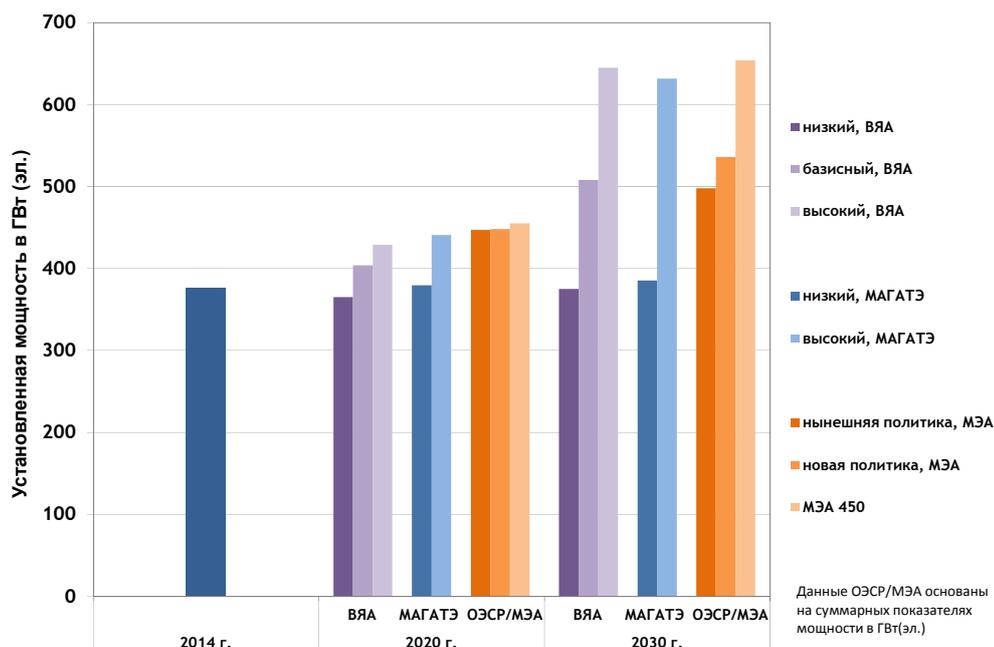


РИС. А-4. Сравнение последнего прогноза МАГАТЭ со сценариями, подготовленными ОЭСР/МЭА в 2014 году, и прогнозами ВЯА 2013 года

25. Ядерная энергетика вносит существенный вклад в смягчение последствий изменения климата: благодаря ей ежегодно на 2 млрд тонн меньше диоксида углерода поступает в атмосферу. Ядерная энергетика будет способствовать сдерживанию глобального потепления до 2°C к 2100 году в том случае, если рост ее мощностей будет соответствовать высокому сценарию, что к 2050 году позволит избежать около 6,5 млрд тонн дополнительных выбросов парниковых газов. На 21-й Конференции сторон Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (КС-21) было принято Парижское соглашение, в котором не предписывается и не запрещается никакая конкретная форма энергии. Тем самым у стран появляется возможность определить собственную структуру низкоуглеродного энергопроизводства в целях сокращения выбросов углерода. Парижское соглашение также способствует устойчивому развитию. Ядерная энергетика может напрямую способствовать достижению цели 7 Организации Объединенных Наций в области устойчивого развития – "обеспечения доступа к недорогостоящим, надежным, устойчивым и современным источникам энергии для всех" и цели 13 – "принятия срочных мер по борьбе с изменением климата и его последствиями".

А.3. Топливный цикл

А.3.1. Начальная стадия топливного цикла

Ресурсы и производство урана

26. В 2015 году спотовая цена на уран оставалась невысокой, колеблясь между 77 и 86 долл./кг U, в сравнении с низким уровнем, составлявшим порядка 60 долл./кг U в середине 2014 года. Низкие цены значительно ограничивали возможности компаний по изысканию средств для проведения разведки, технико-экономических исследований, запуска новых и расширения существующих проектов строительства.

27. По оценкам ВЯА, объемы производства урана в 2015 году составили около 57 000 т U, что более или менее соответствует уровню 2014 года. В настоящее время уран производится более чем в 15 странах. На разных этапах разработки находится ряд новых проектов в некоторых странах-производителях, а также более чем в 25 потенциальных странах-"новичках", часть которых намерены возобновить добычу урана после длительного перерыва.

28. Лидирующим производителем урана в мире оставался Казахстан, получающий свой уран практически полностью методом выщелачивания. В сравнении с резким увеличением объемов производства в период 2000-2012 годов, увеличение последнего времени было скромным и составило в 2015 году 23 800 т U.

29. Второй по величине производитель – Канада – продолжала добиваться впечатляющих результатов на своих месторождениях в бассейне реки Атабаска, таких как месторождение "Triple R", которое позволит получить порядка 38 770 т U в течение его срока эксплуатации, составляющего более 14 лет. В мае началась коммерческая добыча на руднике с самыми богатыми рудами в мире "Сигар-Лейк", производительность которого должна достичь максимума в 6900 т U в год к 2017 году.

30. В 2015 году в эксплуатацию был введен новый урановый рудник в Намибии "Хусаб", производство на котором планируется начать в 2016 году. Его полная мощность может достигать 5770 т U в год, а предположительный срок эксплуатации – свыше 20 лет. В 2015 году продолжалась эксплуатация урановых рудников "Рёссинг" и "Лангер Хайнрих".

31. В Австралии в 2014 году возрос объем добычи на месторождении "Фор-Майл" до уровня 1000 т U в год. На руднике "Рэнджер" работа по возможному подземному расширению рудника до двух ранее произведенных врубов была приостановлена и возобновлена не будет. В 2015 году объем производства составил менее 2500 т U по сравнению с 4000-6000 т U в год в период 1997-2009 годов.

32. Поставленные задачи в отношении первого этапа создания перерабатывающего экспериментального завода для добычи урана и редкоземельных элементов на месторождении Кванефьелд в Гренландии, Королевство Дания, были выполнены или перевыполнены. Согласно опубликованным в феврале оценкам залежи составляют 228 100 т U и 11,13 млн т редкоземельных оксидов. Нетрадиционные ресурсы урана, подобные месторождению Кванефьелд, позволяют значительно расширить ресурсную базу. В США изучается возможность использования морской воды как еще одного нетрадиционного источника урана. В прошлом в качестве ядерного топлива в демонстрационных целях использовался торий, но, прежде чем наладить его промышленное применение, предстоит проделать еще большую работу. Мировые запасы тория оцениваются примерно в шесть-семь миллионов тонн.

Конверсия и обогащение

33. Канада, Китай, Российская Федерация, Соединенное Королевство, США и Франция эксплуатируют промышленные установки по конверсии закиси-окиси урана (U_3O_8) в гексафторид урана (UF_6). Сухая технология отгонки летучих фторидов внедрена в США, в то время как на всех других предприятиях по конверсии применяется мокрый процесс. Суммарные мировые мощности по конверсии составляют примерно 60 000 т U в форме UF_6 в год. В настоящее время суммарный спрос на конверсионные услуги (если предположить, что концентрация урана-235 в хвостах обогащения равна 0,25%) составляет также 60 000-64 000 т в год.

34. В настоящее время совокупные мировые мощности по обогащению составляют приблизительно 60 млн единиц работы разделения (ЕРР) в год, при этом общий спрос составляет приблизительно 50 млн ЕРР в год. Коммерческие услуги по обогащению предоставляются пятью компаниями: НЯКК (Китай), "АРЕВА" (Франция), Государственной корпорацией по атомной энергии "Росатом" (Российская Федерация), "ЮСЭК" (США) и "Уренко" (как в Европе, так и в США).

35. Небольшие установки по конверсии и обогащению эксплуатируются в Аргентине, Бразилии, Индии, Исламской Республике Иран, Пакистане и Японии.

36. КЯР США утвердила изменение лицензии, позволяющее "Уренко" расширить свой завод по обогащению в Юнисе, штат Нью-Мексико. Мощность этого завода увеличится с 3,7 млн ЕРР в год до 10 млн ЕРР в год. Между тем министерство энергетики США объявило о сокращении на 60% расходов по своей программе обогащения урана. Теперь деятельность будет ограничена разработкой новой американской технологии центрифужного обогащения урана в Ок-Ридже, штат Теннесси.

37. Проводится деконверсия обедненного UF_6 в оксид урана или тетрафторид урана (UF_4) для долгосрочного хранения обедненного урана в более стабильной форме. Совокупные мировые мощности по деконверсии оставались на уровне около 60 000 т UF_6 в год. Основными действующими предприятиями являются: завод компании "АРЕВА" в Трикастене, Франция; два завода компании "Ураниум диспозишн сервисиз" в Портсмуте и Падьюке, США; и установка "W-ЭХЗ" по деконверсии на "Электрохимическом заводе" (ЭХЗ) в Зеленогорске, Российская Федерация. В США в штате Нью-Мексико по заказу компании "Интернэшнл айзотопс" строится завод по деконверсии. Компания "Уренко кемплантс", Соединенное Королевство, отложила до 2017 года предположительный срок ввода в эксплуатацию строящейся установки по деконверсии на предприятия по переработке урановых "хвостов" в Кейпенхерсте. После завершения строительства на этом предприятии будут перерабатываться имеющиеся у компании "Уренко" европейские запасы обедненного урана.

38. Правительство штата Южная Австралия образовало первую Королевскую комиссию по ядерному топливу для изучения потенциала для расширения деятельности, связанной с топливным циклом.

А.3.2. Изготовление топлива

39. Текущие годовые потребности в услугах по изготовлению топлива для легководных реакторов (LWR) оставались на уровне приблизительно 7000 т обогащенного урана в тепловыделяющих сборках, однако ожидается, что в ближайшем будущем они возрастут примерно до 8000 т U/год. Что касается корпусных тяжеловодных реакторов (PHWR), то потребности составляли 3000 т U/год. В настоящее время существует несколько конкурирующих поставщиков большинства видов топлива. Совокупные мировые мощности по изготовлению топлива составляют примерно 13 500 т U в год (обогащенного урана) по топливу для реакторов LWR и около 4 000 т U в год (природного урана) по топливу для реакторов PHWR. В настоящее время топливо для LWR производится в Бразилии, Германии, Индии, Испании, Казахстане, Китае, Республике Корея, Российской Федерации, Соединенном Королевстве, США, Франции, Швеции и Японии. В Аргентине, Индии, Канаде, Китае и Румынии для получения природного уранового топлива для PHWR уран очищается и конвертируется в диоксид урана (UO_2).

40. КЯР США разрешила АЭС в Перри, штат Огайо, начать использование высокопроизводительного топлива типа GNF2 для кипящего реактора (BWR). Это топливо позволит нарастить выработку электроэнергии и сократить в то же время общие расходы по

топливному циклу благодаря снижению общего количества урана и среднего показателя обогащения в топливных дозах. Компания также представила в 2015 году свою топливную сборку следующего поколения GNF3 для реакторов BWR (рис. А-5), которая обеспечивает большую экономичность топлива, более высокую отдачу и гибкость при эксплуатации. В апреле 2015 года компания "АРЕВА" запустила производство топлива ATRIUM 11 на двух BWR в США. Новая конструкция твэлов позволяет повысить эксплуатационную гибкость, что особенно важно для энергопредприятий, которые принимают решения о повышении мощности АЭС либо применении стратегий, оптимизирующих коэффициент использования мощности.



*Рис. А-5. Топливо следующего поколения GNF3 для реакторов BWR.
(Фото: Global Nuclear Fuel)*

41. Компания коммунального обслуживания Аризоны, США, подписала с компанией "Вестингхауз электрик" контракт на изготовление и доставку топлива следующего поколения для трех ядерных энергоблоков в Пало-Верде, штат Аризона. Новое топливо, которое называется CE16NGF, имеет усовершенствованную оболочку и выгорающие поглотители, а также более совершенную конструкцию, позволяющую повысить эффективность и надежность топлива при увеличении его срока службы.

42. В мае 2015 года группа коммунальных предприятий США официально сообщила КЯР о своей заинтересованности в проведении обзора новой конструкции металлического топлива компании "Лайтбридж". В этом топливе, которое изготавливается из циркониево-уранового сплава, используется уникальный состав с геометрией топлива в виде многогранных спирально закрученных стержней. Такая конструкция позволяет улучшить теплопроводящие свойства, обеспечивая возможность функционирования при более высокой удельной мощности, чем используемое сегодня урановое оксидное топливо. Это топливо должно пройти испытания под облучением в исследовательском реакторе в Халдене, Норвегия, начиная с 2017 года.

43. В настоящее время ряд научно-исследовательских лабораторий изучают различные концепции устойчивого к авариям топлива. Компании "Тосиба" и "ИБИДЕН" в Японии разработали новые технологии изготовления компонентов ядерного топлива из карбида кремния в качестве замены для циркалоевых оболочек в легководных реакторах. В 2016 году будут проведены испытания крышки топливной сборки в исследовательском реакторе, с тем чтобы к 2025 году запустить ее в коммерческое производство. В Соединенном Королевстве Национальная ядерная лаборатория (НЯЛ) и Манчестерский университет приступили к осуществлению исследовательского проекта, включающего работу над усовершенствованными керамическими композитными оболочками, которые могли бы значительно повысить температурный потенциал ядерного топлива.

44. В Нидерландах произведены квалификационные облучательные испытания тепловыделяющих элементов демонстрационного высокотемпературного модульного реактора с шаровыми твэлами (HTR-PM) – высокотемпературного газоохлаждаемого реактора, который

строится в Шидаоване, Китай. В апреле Исламская Республика Иран объявила об открытии своей первой установки для производства ядерного топлива, которая будет производить топливо, аналогичное тому, которое использовалось на Бушерской АЭС.

45. Предприятия по рециклированию топлива обеспечивают поставки вторичного ядерного топлива путем использования регенерированного урана (RepU) и смешанного оксидного топлива (MOX). В настоящее время в Электростали, Российская Федерация, для компании "АРЕВА" производится приблизительно 100 т RepU/год. На производственной линии завода компании "АРЕВА" в Романе, Франция, производится топливо из обогащенного RepU в объеме около 80 т тяжелого металла (ТМ) в год для реакторов LWR во Франции. Нынешние мировые мощности по изготовлению топлива MOX составляют примерно 250 т ТМ; основные заводы расположены во Франции, и несколько предприятий меньшей мощности находятся в Индии, Российской Федерации и Японии.

46. Индия и Российская Федерация производят топливо MOX для использования в реакторах на быстрых нейтронах. В Российской Федерации на Горно-химическом комбинате была завершена подготовка к выпуску партии стандартных сборок с топливом MOX для реактора БН-800, установленного на энергоблоке "Белоярск-4". В прошлом году было завершено сооружение новых производственных линий, годовая мощность которых в 2015 году составляла 20 топливных сборок, а к 2017 году ее планируется довести до 400 сборок в год. В Японии идет строительство завода J-MOX производительностью 130 т ТМ в год; промышленное производство на нем планируется начать в 2019 году.

А.3.3. Обеспечение гарантированных поставок

47. В результате заключения в 2015 году юридических договоренностей с Казахстаном проект создания банка низкообогащенного урана МАГАТЭ перешел от стадии проведения оценок и технико-экономических исследований к стадии полномасштабной реализации. После утверждения Советом управляющих 27 августа 2015 года в Астане, Казахстан, были подписаны Соглашение с принимающим государством и два дополнительных технических соглашения. Первым дополнительным техническим соглашением является Соглашение об услугах Оператора установки между Агентством и Ульяновским металлургическим заводом, который будет выполнять функции оператора Банка НОУ МАГАТЭ. Второе дополнительное техническое соглашение заключено с министерством энергетики о конкретных мерах, которые должны быть приняты в целях создания Банка НОУ МАГАТЭ. На основании этого соглашения был учрежден Объединенный координационный комитет, сопредседателями которого являются Агентство и Казахстан и который в течение предусмотренного 90-дневного периода с даты подписания согласовал План конкретных мероприятий. В соответствии с Соглашением с принимающим государством безопасность и физическая безопасность обеспечиваются системой ядерного регулирования Казахстана, а в Плате конкретных мероприятий предусмотрена дорожная карта для подтверждения соблюдения применимых положений норм безопасности Агентства и его руководящих документов по физической безопасности, как того требует Соглашение с принимающим государством. Продолжается значительная техническая работа в областях безопасности, в частности сейсмической безопасности, и физической ядерной безопасности. Было завершено технико-экономическое обоснование по вариантам хранилища, и в настоящее время ведется строительство нового здания. Ранее в июне 2015 года также после утверждения Советом управляющих было подписано соглашение о транзите с Российской Федерацией.

48. Другие механизмы гарантированных поставок изложены в "Обзоре ядерных технологий – 2012" (документ GC(56)/INF/3).

А.3.4. Конечная стадия топливного цикла

49. К концу 2015 года объемы отработавшего ядерного топлива, находящегося на хранении, достигли примерно 266 000 т ТМ, при этом темпы его накопления составляют около 7000 т ТМ/год. Хотя в большинстве случаев топливо хранится в мокром виде на площадке реактора, в 27 странах имеется 147 хранилищ отработавшего ядерного топлива, которые находятся вне реактора (рис. А-6). Самые крупные инвентарные количества отработавшего топлива в системах сухого хранения находятся в Канаде и США, причем в каждой из этих стран более трети инвентарного количества содержится в таких хранилищах. В Германии насчитывается свыше 1000 загруженных металлических контейнеров двойного назначения для сухого хранения, и согласно прогнозам имеющиеся у нее инвентарные количества отработавшего топлива к концу 2022 года будут в полном объеме находиться в сухом хранении.

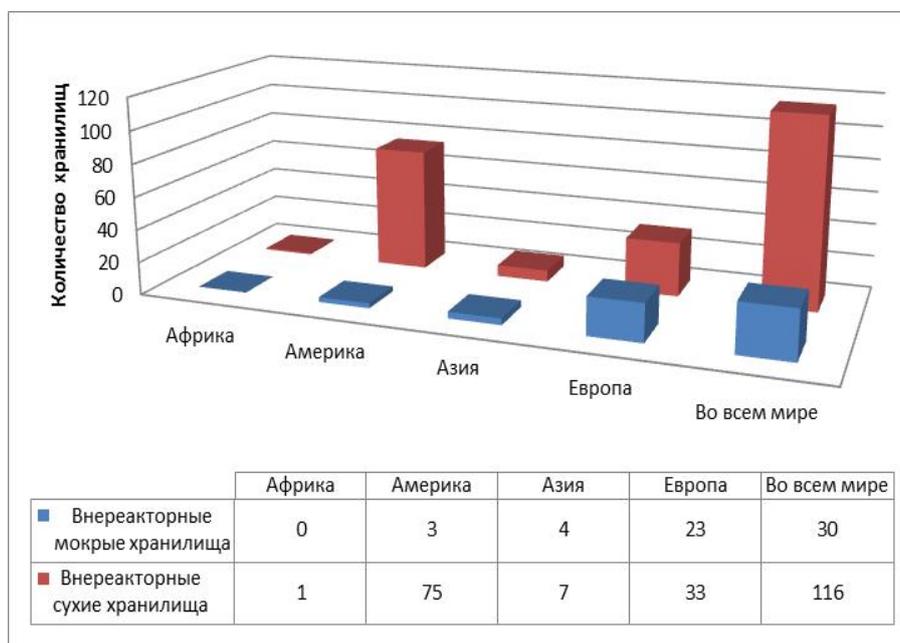


РИС. А-6. Глобальное распределение внереакторных хранилищ отработавшего топлива

50. В настоящее время 12 стран планируют, строят или вводят в эксплуатацию сухие хранилища. Самые крупные проекты осуществляются в Испании, Российской Федерации, Украине и Японии. В Железногорске, Российская Федерация, недавно было завершено строительство крупнейшего в мире сухого хранилища: было построено два новых здания камерного типа для сухого хранения (одно для топлива с реакторов большой мощности канального типа (РБМК) и второе для топлива с ВВЭР) в дополнение к хранилищу, строительство которого было завершено в 2012 году. Ожидается, что отработавшее топливо в новые хранилища будет завезено в 2016 году.

51. В США компания "Уэйст контроул специалисте" подала заявку в КЯР на получение лицензии для эксплуатации независимого объекта по хранению отработавшего топлива в городе Эндрюс, штат Техас. Ведущую роль в проектировании, строительстве и эксплуатации предлагаемого объекта должна играть компания "АРЕВА". Компании "Холтек интернэшнл" и "Эдди-Ли энергджи эляанс" объявили о подписании меморандума о взаимопонимании в отношении проектирования и сооружения централизованного хранилища отработавшего топлива мощностью до 75 000 тТМ на базе подземной системы сухого хранения с максимальным уровнем безопасности. Этот объект в случае утверждения будет находиться в юго-восточной части штата Нью-Мексико.

52. Глобальная картина переработки отработавшего топлива с коммерческих реакторов в 2015 году не изменилась: такая переработка топлива осуществлялась на 10 объектах в Индии, Китае, Российской Федерации, Соединенном Королевстве и Франции. В Соединенном Королевстве и Франции имеются самые крупные мощности, на которых перерабатывается порядка 1000 т ТМ/год. Российская Федерация и Франция предлагают услуги по переработке для иностранных заказчиков. На российском заводе "Маяк" была увеличена годовая производительность до 200 т ТМ/год и испытан ряд технологий переработки нетрадиционных видов топлива, таких как бериллиево-урановое топливо. В Индии имеется три установки для топлива с энергетических реакторов и экспериментальная установка мощностью 60 т ТМ/год для ториевого оксидного топлива. В Китае действует экспериментальный перерабатывающий завод мощностью 50 т ТМ/год. В ноябре Национальная ядерная корпорация Китая и компания "АРЕВА" подписали соглашение о строительстве завода по переработке и регенерации отработавшего топлива мощностью 800 т ТМ/год, который предположительно будет находиться в провинции Ганьсу Китая. Строительство планируется начать в 2020 году и завершить в 2030 году. В этом же месте будет также находиться хранилище отработавшего топлива мощностью 3000 т ТМ. В настоящее время в Японии нет предприятия, занимающегося переработкой; в то же время идет активный ввод в эксплуатацию и изучение вопросов безопасности в отношении завода в Роккасо мощностью 800 т ТМ/год, который начнет функционировать предположительно к марту 2016 года.

53. В соответствии с среднесрочной и долгосрочной дорожной картой вывода из эксплуатации энергоблоков 1-4 АЭС "Фукусима-дайити" компании ТЕРКО от июня 2013 года выемка из бассейна топлива на энергоблоке 3 АЭС "Фукусима-дайити" была намечена на первый квартал 2015 года. Эта цель не была достигнута в виду ряда проблем, включая трудности, связанные с выемкой консоли управления перегрузочной машины (выемка произведена в августе 2015 года) и связанных с ней элементов и возможностью дезактивации площадки обслуживания в энергоблоке 3 до уровня 1 мЗв/ч. В июне 2015 года дорожная карта была пересмотрена, с тем чтобы отразить реальное положение дел. В результате этого выемка топлива энергоблоков 1 и 3 из бассейна была перенесена соответственно на 2020 и 2017 годы.

А.3.5. Вывод из эксплуатации, восстановление окружающей среды и обращение с радиоактивными отходами

Вывод из эксплуатации ядерных установок

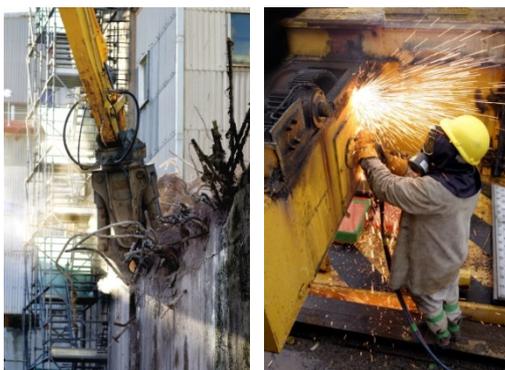
54. Помимо 441 энергетического реактора, которые в настоящее время эксплуатируются в мире, 157 энергетических реакторов были окончательно остановлены или находятся на стадии вывода из эксплуатации, включая 17 полностью выведенных из эксплуатации реакторных установок.³

55. Эксплуатируется более 320 установок ядерного топливного цикла, около 170 установок были окончательно остановлены или находятся на стадии вывода из эксплуатации и 125 установок были полностью выведены из эксплуатации. Эксплуатируется 246 исследовательских реакторов и более 180 были окончательно остановлены или находятся на стадии вывода из эксплуатации. Более 300 исследовательских реакторов и критических сборок были полностью выведены из эксплуатации.

³ Данные из Информационной системы Агентства по энергетическим реакторам (ПРИС) (<http://www.iaea.org/pris>).

56. В нынешнем столетии накоплен значительный опыт проведения работ по выводу из эксплуатации, при этом наибольший прогресс достигнут главным образом в странах, давно осуществляющих ядерно-энергетические программы, в частности в Бельгии, Германии, Испании, Российской Федерации, Соединенном Королевстве, США и Франции. Примерами программ, в рамках которых в 2015 году был достигнут значительный прогресс в деятельности по выводу из эксплуатации, являются сегментация реакторного корпуса высокого давления на АЭС "Хосе Кабрера" в Испании, начало второго этапа вывода из эксплуатации очереди V-1 на АЭС "Богунице" в Словакии и завершение реализации в Российской Федерации крупной федеральной целевой программы "Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года", большое место в которой отведено мероприятиям по выводу из эксплуатации и экологической реабилитации.

57. В Соединенном Королевстве продолжается процесс вывода из эксплуатации десяти АЭС с реакторами первого поколения типа Магнокс. После прекращения функционирования в декабре 2015 года АЭС в Уильфе (Англси, Уэльс) завершилась эпоха работы реакторов Магнокс, которая началась в августе 1956 года, когда к сети была подключена первая в мире АЭС промышленного масштаба в Колдер-Холле (Кумбрия, Англия). АЭС в Уильфе начала функционировать в 1971 году и в настоящее время на ней производится разгрузка активной зоны перед ее выводом из эксплуатации. Процесс вывода из эксплуатации продолжается также на двух реакторах на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем и материаловедческом реакторе в Дунрее, а также на двух оставшихся исследовательских реакторах в Винфрите.



*РИС. А-7. Работы по выводу из эксплуатации в Селлафилде, Соединенное Королевство
(Фото: Управление по выводу из эксплуатации ядерных объектов/Sellafield Ltd.)*

58. Проекты также осуществляются в Болгарии, Литве и Словакии, где АЭС были окончательно остановлены еще до окончания их эксплуатационного ресурса, при этом финансовая поддержка обеспечивается через Европейский банк реконструкции и развития.

Обращение с изъятими из употребления закрытыми радиоактивными источниками

59. В нескольких странах, включая Гану, Малайзию и Филиппины, серьезно рассматриваются различные варианты захоронения изъятых из употребления закрытых радиоактивных источников (ИЗРИ), включая совместное захоронение с другими отходами в приемлемых пунктах, растущие возможности в плане рециклирования и возвращения в страну происхождения и захоронение в специально пробуренных скважинах. В настоящее время разработан документ по общему обеспечению безопасности скважинного захоронения источников категории 3-5, и аналогичный документ разрабатывается для источников категории 1 и 2. Канада объявила через Агентство о внесении взносов в поддержку программ скважинного захоронения в Гане и на Филиппинах, и деятельность по этому проекту началась.

60. В 2015 году был осуществлен ряд успешных операций по удалению ИЗРИ из помещений пользователей и постановке их под контроль в надлежащих условиях хранения. Три изъятых из употребления источника категории 1 и 2 были удалены из Гондураса и один источник категории 1 – из Марокко. В Ливане было завершено возвращение в страну происхождения одного изготовленного во Франции ИЗРИ категории 1. Намеченное на 2016 год возвращение еще в общей сложности четырех изготовленных во Франции ИЗРИ категории 1 было начато в Камеруне, Ливане и Тунисе.

61. Достигнут значительный прогресс в увязке концепции проектирования скважинного захоронения с использованием мобильных горячих камер Южноафриканской ядерно-энергетической корпорации с целью минимизации манипуляций с источниками и устранения ненужных транспортных операций. Кроме того, был разработан мобильный инструментарий для облегчения операций по кондиционированию ИЗРИ категорий 3-5 и содействия подготовке к скважинному захоронению. Деятельность по обучению местного и регионального персонала и кондиционированию ИЗРИ была проведена в Бангладеш, Мадагаскаре, Парагвае, Перу, Филиппинах, Чили и Шри-Ланке.

62. Агентство расширило доступ для многих индивидуальных пользователей в государствах-членах к Международному каталогу закрытых радиоактивных источников и устройств, что облегчает идентификацию обнаруживаемых на местах ИЗРИ. В 2015 году была начата работа по внесению в каталог дополнительных сведений об источниках и устройствах в интересах дальнейшего повышения его полезности.

Обращение с радиоактивными отходами перед захоронением

63. В отношении использовавшихся в прошлом установок заметный прогресс достигнут в Селлафилде, Соединенное Королевство, особенно в двух старых бассейнах выдержки на открытой площадке. В бассейне выдержки ОЯТ "Pile Fuel Storage Pond" благодаря изъятию всего очелованного топлива был устранен связанный с этим бассейном риск критичности и количество радиоактивных запасов снижено на 50%.

64. Бассейн выдержки ОЯТ реактора "Магнокс" первого поколения в Селлафилде был построен в 50-х годах для хранения, охлаждения и подготовки отработавшего ядерного топлива реактора "Магнокс" к переработке. Его эксплуатация была прекращена в 1992 году и в настоящее время в нем находится порядка 1400 кубических метров радиоактивного шлама наряду с другими запасами. В марте 2015 года был достигнут важный рубеж: радиоактивный шлам из бассейна выдержки ОЯТ реактора "Магнокс" первого поколения был успешно транспортирован в новое введенное в эксплуатацию хранилище.

65. В Соединенном Королевстве после опубликования национальной стратегии в отношении твердых низкоактивных отходов значительно увеличилось число предлагаемых альтернативных методов обработки и захоронения. В результате этого в 2015 году 85% твердых низкоактивных отходов ядерной отрасли оказалось не в хранилище низкоактивных отходов Соединенного Королевства, а было подвергнуто целому ряду способов обработки, включая вторичную переработку металла, сжигание и захоронение отходов очень низкого уровня активности на разрешенных площадках для свалки мусора.

66. Грузия начала на пробной основе проведение семинара-практикума по переработке отходов, с тем чтобы свести к минимуму объем отходов и снизить риск, связанный с отходами от прежней деятельности. Для этого используется устройство для плазменной резки и адаптированная металлоструйная установка по дезактивации для удаления поверхностных радиоактивных загрязнителей с металлических труб от выведенных из эксплуатации криогенных станций и низкотемпературного исследовательского реактора с гелиевым охлаждением IRT-M.

67. В ряде стран, например в Швеции и США, продолжается сжигание и переплавка металла на коммерческой основе в целях обеспечения возможностей для оказания эффективных с точки зрения затрат трансграничных услуг по обработке радиоактивных отходов. Например, в отдельных случаях канадские ядерные энергопредприятия и Ядерные лаборатории Канады могут отправлять некоторые низкоактивные радиоактивные отходы от эксплуатации и прежней деятельности лицензированным сервисным компаниям в США, при этом возвращается значительно меньший объем радиоактивных отходов.

68. На Нововоронежской АЭС в Российской Федерации была введена в эксплуатацию плазменная печь производительностью 250 кг в час. Печь будет использоваться для переработки твердых отходов после вывода из эксплуатации первых двух энергоблоков АЭС. Кроме того, завод по битуминизации жидких радиоактивных отходов на Калининской АЭС вышел на проектную мощность; он обслуживает все российские АЭС и позволяет сократить объем отходов в десять раз.

69. Безопасное и надежное хранение радиоактивных отходов, ожидающих захоронения, является одной из ключевых задач для государств-членов, в которых такие отходы имеются. В Нидерландах Центральная организация по радиоактивным отходам (ЦОРО) получила лицензию на строительство нового здания для промежуточного хранения обедненного урана и продления промежуточного хранения в стране высокоактивных отходов (ХАБОГ).

70. Литва начала холодную обкатку установки для обращения с твердыми отходами и их хранения на Игналинской АЭС в целях переработки отходов от прежней деятельности по эксплуатации АЭС.

71. Бельгия получила последнюю из в общей сложности 123 бочек высокоактивных жидких иммобилизованных в цементе отходов после переработки отработавшего топлива в Соединенном Королевстве. Эти долгоживущие среднеактивные отходы будут храниться в специально построенном для этой цели хранилище до их захоронения.

72. В Центре атомных исследований им. Бхабхи в Индии с помощью недавно разработанного сорбционного процесса большие количества цезия-137 были отделены от высокоактивных отходов с целью создания пеналов с остеклованным цезием-137 для использования в качестве облучателей крови.

73. Расследование радиологического события, которое произошло в феврале 2014 года на экспериментальной установке по изоляции отходов в штате Нью-Мексико, США, показало, что наиболее вероятной причиной этого инцидента является несовместимость отходов (нитраты в контакте с органическим материалом). Этот вывод свидетельствует о важности того, чтобы во всех программах обращения с радиоактивными отходами были предусмотрены всеобъемлющие надежные процедуры классификации, обеспечивающие соблюдение требований приемлемости отходов.

74. В Соединенном Королевстве в Шеффилдском университете в сотрудничестве с министерством энергетики и по проблемам изменения климата Соединенного Королевства был открыт национальный центр по содействию обращению с радиоактивными отходами ядерного топливного цикла. Центр предоставляет разработчикам технологий доступ к передовому оборудованию, включая лаборатории для высокотемпературной переработки, исследование поведения долгоживущих отходов и химический и радиохимический анализ.

75. Продолжается работа по управлению большими объемами загрязненной воды и проникновением грунтовых вод на площадке АЭС "Фукусима-дайти". Для удаления одного из основных загрязнителей – цезия – было обработано свыше 1 миллиона кубических метров

воды, и принимаются меры для удаления стронция, с тем чтобы повысить отдачу существующей усовершенствованной системы водоочистки. Кроме того, была успешно запущена система байпасной очистки грунтовых вод для противодействия проникновению грунтовых вод в реактор и машинный зал, при этом проникновение грунтовых вод снизилось примерно на 25% (или 100м³) в день. Продолжается сооружение ледяной стены для изоляции участков вокруг блоков 1-4.

Захоронение радиоактивных отходов

76. По всему миру функционируют пункты захоронения радиоактивных отходов всех категорий, за исключением высокоактивных отходов (ВАО) и отработавшего ядерного топлива. В число этих объектов входят пункты траншейного захоронения ОНАО (например, в Испании, США, Франции и Швеции) и НАО в засушливых районах (например, в Аргентине, Индии, США и Южной Африке); приповерхностные инженерные сооружения для НАО (например, в Китае, Индии, Испании, Польше, 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, США, Финляндии и Швеции).

77. Другие пункты захоронения НАО находятся на различных стадиях лицензирования, например в Бельгии (Дессель), Болгарии (Радиана), Германии (Конрад), Канаде (Кинкардин), Литве (Стабатишкес), Румынии (Салиньи) и Словении (Врбина, Кршко).

78. 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.

79. В Финляндии занимающаяся обращением с отходами организация "Посива" получила лицензию на строительство пункта геологического захоронения отработавшего ядерного топлива в Олкилуото. Строительные работы по этой лицензии могут начаться ближе к концу 2016 года, а начать эксплуатацию пункта захоронения планируется в 2023 году.

80. В Швеции в ходе представления ряда предварительных итогов своего продолжающегося надзорного рассмотрения лицензионной заявки Шведской компании по обращению с ядерным топливом и отходами (СКБ) на создание хранилища отработавшего ядерного топлива Управление радиационной безопасности заявило, что "СКБ продемонстрировала возможность выполнения установленных Управлением стандартов ядерной безопасности и радиационной защиты".

81. Французское Национальное агентство по обращению с радиоактивными отходами составляет краткий доклад по безопасности в отношении своего проекта геологического захоронения высокоактивных отходов "Сижео" в рамках подготовки полномасштабной лицензионной заявки, запланированной на 2017 год.

82. Канадский проект по созданию глубинного геологического хранилища для НСАО, генерируемых компанией "Онтарио пауэр дженерейшн" на ядерном объекте "Bruce" в Кинкардине, Онтарио, получил в мае положительную рекомендацию совместной экспертной группы, созданной в 2012 году для оценки предлагаемого объекта. Принятие официального решения, которое ожидалось в декабре 2015 года, было отложено министром по вопросам окружающей среды и изменения климата в виду возражений заинтересованных лиц в стране и за рубежом, обеспокоенных относительной близостью озера Гурон.

83. Согласно прогнозам Китая, его потребности в геологическом захоронении определяются необходимостью переработки 140 000 тонн отработавшего топлива, источником которого

являются 48 реакторов. Ведется строительство экспериментального туннеля на площадке Бейшан в рамках подготовки к сооружению первой подземной исследовательской установки по программе геологического захоронения.

84. В Германии обязанности по захоронению радиоактивных отходов были перераспределены в связи с созданием двух новых федеральных организаций: Федеральной компании по обращению с ядерными отходами и Федерального управления по регулированию обращения с ядерными отходами. С тем чтобы сориентировать дальнейшую деятельность по созданию в стране глубинного геологического хранилища учрежденная в 2013 году национальная комиссия по выбору площадки должна в 2016 году рекомендовать критерии отбора площадки, требования для участия заинтересованных сторон, а также возможные альтернативы геологическому захоронению.

85. Ведется строительство приповерхностного хранилища для НАО на площадке Талмеси в Исламской Республике Иран. После получения лицензии на выбор площадки в пункте захоронения было завершено сооружение централизованного хранилища.

86. Япония предложила Организации по обращению с ядерными отходами пересмотреть подход к выбору площадки для глубинного геологического хранилища для ВАО и провела целый ряд информационных мероприятий с целью повышения осведомленности.

87. В августе было открыто подземное хранилище шахтного типа "Вольсон" в Республике Корея (рис. А-8). Началось строительство второй очереди установки для захоронения, которое планируется завершить в 2019 году. В хранилище "Вольсон" сроком эксплуатации 60 лет планируется разместить 800 000 контейнеров НАО и САО.

88. В Российской Федерации полным ходом идет проектирование глубинного геологического хранилища в Красноярске и выдано разрешение на строительство подземного исследовательского комплекса для дальнейшего изучения Нижнекамской геологической формации.

89. Началась загрузка отходов в первые два хранилища камерного типа новой установки для захоронения НАО в Дунрее на севере Шотландии, Соединенное Королевство. Камеры рассчитаны на весь объем твердых НАО и отходов от демонтажа, образующихся в результате вывода из эксплуатации находящихся на площадке реакторов на быстрых нейтронах и установок по переработке, что позволяет свести к минимуму транспортировку отходов из удаленных мест. Пункт захоронения НАО в Дригге успешно обновил свое экологическое разрешение. В 2014 году правительство Соединенного Королевства опубликовало "Белую книгу" под названием "Implementing Geological Disposal" ("Реализация геологического захоронения"), в которой представлены основы долгосрочного обращения с радиоактивными отходами высокого уровня активности. В этом документе излагается подход к определению потенциальных площадок для геологического захоронения отходов, основанный на взаимодействии с заинтересованными сообществами, начиная с этапа диалога и взаимодействия с заинтересованными сторонами.



*РИС. А-8. Контейнеры с отходами и первые мероприятия по захоронению в Вольсоне
(Фото: Корейское агентство по радиоактивным отходам)*

90. Министерство энергетики США предложило представлять предложения субъектам, заинтересованным в предоставлении испытательной площадки, подрядчика для бурения и группы управления площадкой для бурения 5000-метровой разведочной скважины в рамках запланированных полевых испытаний в связи с глубокой скважиной. Эта концепция предусматривает бурение скважины (или комплекса скважин) в породе кристаллического фундамента на глубину около 5000 м, размещение контейнеров в нижних 3000 м скважины и затем закрытие скважины до поверхности.

А.4. Безопасность

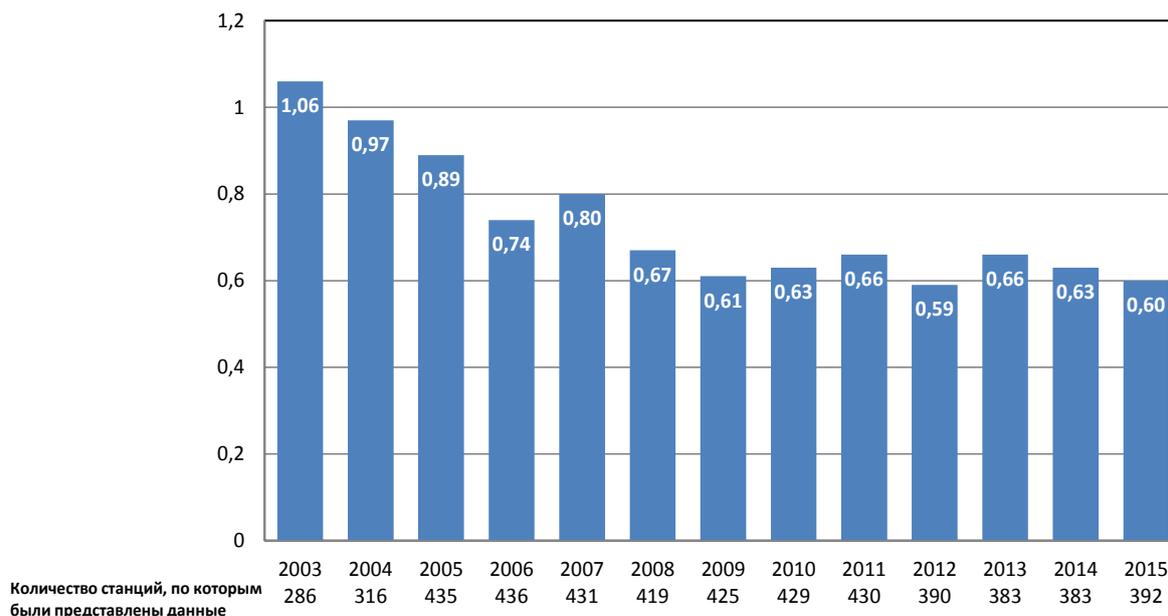
91. Во всем мире на АЭС постоянно проводилась работа по повышению безопасности. Она включала выявление и учет уроков аварии на АЭС "Фукусима-дайти"; повышение эффективности глубоководной защиты; укрепление потенциала аварийной готовности и реагирования; поддержание и активизацию работы по наращиванию потенциала; защиту населения и окружающей среды от ионизирующих излучений.

92. Стержневым элементом всей деятельности по укреплению инфраструктуры ядерной безопасности, проводимой государствами-членами, Секретариатом и другими соответствующими заинтересованными сторонами, оставался План действий МАГАТЭ по ядерной безопасности. Агентство продолжало делиться информацией об уроках аварии посредством анализа соответствующих технических аспектов и распространять такую информацию. Оно организовало совещание международных экспертов по повышению эффективности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ в свете аварии на АЭС "Фукусима-дайти" в сотрудничестве с Агентством по ядерной энергии (АЯЭ/ОЭСР) и совещание международных экспертов по оценке и прогнозированию в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации.

93. Агентство опубликовало доклад МАГАТЭ об аварии на АЭС "Фукусима-Дайти", состоящий из пяти подробных технических томов. Этот доклад стал результатом широкомасштабных международных усилий пяти рабочих групп с участием около 180 экспертов из 42 государств-членов, имеющих и не имеющих ядерно-энергетические программы, и ряда международных органов.

94. В соответствии с решением, принятым Договаривающимися сторонами Конвенция о ядерной безопасности (КЯБ) на шестом Совещании по рассмотрению, Генеральный директор МАГАТЭ созвал в феврале Дипломатическую конференцию для рассмотрения предложения Швейцарии о внесении поправки в Конвенцию. Участники Дипломатической конференции единогласно приняли Венское заявление о ядерной безопасности, содержащее принципы, которыми Договаривающиеся стороны должны руководствоваться в деле достижения одной из целей КЯБ – предотвращение аварий с радиологическими последствиями и смягчение таких последствий, если они произойдут.

95. Уровень эксплуатационной безопасности АЭС по-прежнему высок, о чем свидетельствуют показатели безопасности, информацию о которых собирают Агентство и Всемирная ассоциация организаций, эксплуатирующих атомные электростанции. На рис. А-9 показано количество внеплановых или аварийных остановов реакторов в автоматическом и ручном режимах на каждые 7000 часов (приблизительно один год) эксплуатации на каждую установку. Внеплановые остановки являются лишь одним из показателей безопасности, и обычно этот показатель используется в качестве индикатора успеха в повышении уровня безопасности станции за счет снижения числа нежелательных и незапланированных теплогидравлических переходных процессов и переходных процессов реактивности, требующих экстренного останова реактора.



*РИС. А-9. 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>)*

В. Усовершенствованные ядерные и термоядерные системы

В.1. Усовершенствованные ядерные системы

В.1.1. Водохлаждаемые реакторы

96. Водохлаждаемые реакторы (ВОР) играют значительную роль в коммерческой атомной отрасли с момента ее формирования; они проработали более 16 000 реакторо-лет, и в настоящее время в общемировом парке эксплуатируемых гражданских энергетических реакторов доля этих реакторов составляет более 95%. Из 65 строящихся ядерных реакторов 63 реактора будут охлаждаться легкой или тяжелой водой.

97. Среди главных событий в секторе ВОР в 2015 году можно отметить строительство четырех новых установок, подключение к сети восьми реакторов, повышение мощности существующих станций и постоянное увеличение коэффициентов использования мощности ВОР всех типов, а также предложения по строительству новых станций в странах, где в промышленной эксплуатации пока нет ни одного реактора.

98. Экономически конкурентоспособным способом увеличения генерируемой мощности АЭС в той или иной стране является повышение допустимой выходной мощности уже имеющихся станций. Все усовершенствованные ВОР имеют увеличенную выходную мощность; у недавно построенных энергоблоков единичная мощность составляет от 1000 (рис. В-1) до 1650 МВт. Кроме того, наблюдается отчетливая тенденция к размещению на одной площадке нескольких блоков одного или разных типов, что свидетельствует об экономии за счет масштабов размещения коммерческих реакторов.



РИС. В-1. Строящийся реактор ВВЭР-1000 на площадке АЭС в Куданкуламе (Фото: МАГАТЭ)

99. В нескольких странах также расширяется деятельность по рассмотрению, изучению и строительству усовершенствованных конструкций существующих ВОР в целях постепенного внедрения более эффективных усовершенствованных топливных циклов, частично или полностью замкнутых.

100. Несколько государств-членов ведут научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) в области сверхкритических водоохлаждаемых реакторов (SCWR). Завершено концептуальное проектирование канадского SCWR (канального реактора, охлаждаемого тяжелой водой) и китайского SCWR (CSR1000). В Европе несколько лет назад началась разработка концепции европейского высокоэффективного легководного реактора. В Российской Федерации продолжаются концептуальные исследования по ВВЭР-СКД, в том числе возможностей использования активной зоны с быстрым спектром.

101. Агентство продолжает поддерживать и обновлять свою Информационную систему по усовершенствованным реакторам – базу данных, в которой содержатся сведения, представляемые организациями-проектировщиками.

В.1.2. Системы на быстрых нейтронах

102. Масштабные программы разработки и внедрения быстрых реакторов осуществляются во всем мире с 1960 года, и, таким образом, знания в области быстрых реакторов и технологий сопутствующих топливных циклов достигли высокого уровня зрелости. Во всем мире увеличивается интерес к разработке этих реакторов, которые отличаются способностью обеспечивать эффективное, безопасное, устойчивое и экологически чистое энергоснабжение.

103. В настоящее время на национальном и международном уровнях на основе высочайших стандартов безопасности, устойчивости, экономической эффективности, физической защиты и устойчивости с точки зрения распространения разрабатываются быстрые реакторы с натриевым теплоносителем (SFR), свинцовые и свинцово-висмутовые быстрые реакторы (LFR и LBFR) и газоохлаждаемые реакторы на быстрых нейтронах (GFR). Кроме того, в качестве варианта на отдаленную перспективу рассматривается концепция быстрого реактора на солевых расплавах (MSR).

104. В области реакторов SFR, которые представляют собой наиболее зрелую технологию реакторов на быстрых нейтронах, имеется опыт эксплуатации более 400 реакторо-лет, накопленный в процессе проектирования, сооружения и эксплуатации экспериментальных, прототипных, демонстрационных и промышленных установок, работающих во многих странах, в том числе в Германии, Индии, Китае, Российской Федерации, Соединенном Королевстве, США, Франции и Японии.

105. Российский реактор SFR типа БН-600 демонстрирует высокие эксплуатационные показатели: в 2014 году достигнут коэффициент нагрузки 86%. В 2015 году был подключен к энергосистеме быстрый реактор с натриевым теплоносителем БН-800 (рис. В-2). Был завершен заключительный этап проектирования инновационного реактора БН-1200. В мае 2015 года была получена лицензия регулирующего органа на сооружение многоцелевого исследовательского реактора на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем и были проведены предварительные строительные работы; предполагается, что в 2020 году этот реактор придет на смену реактору БОР-60. Что касается технологии тяжелых жидкометаллических теплоносителей, то было завершено техническое проектирование реактора БРЕСТ-ОД-300 (представляющего собой усовершенствованный реактор LFR) и установки СВБР-100 (модульного реактора на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем).

106. В Индии с октября 1985 года эксплуатируется испытательный быстрый реактор-размножитель; завершено строительство и осуществляется ввод в эксплуатацию прототипа быстрого реактора-размножителя мощностью 500 МВт (эл.), и первый выход на критичность запланирован на 2016 год. На той же площадке Индия планирует построить еще два реактора-размножителя на быстрых нейтронах.

107. В Китае был пройден первый этап разработки технологии быстрых реакторов: в декабре 2014 года на полную мощность вышел китайский экспериментальный быстрый реактор. В 2023 году в эксплуатацию планируется сдать инновационный реактор CFR-600. Кроме того, на стадии предварительного технического проектирования находится китайский реактор со свинцовым теплоносителем CLEAR-I.

108. В Японии в состоянии долгосрочного останова находятся экспериментальный быстрый реактор JOYO и прототип реактора SFR Monju. Также приостановлено осуществление этапа II программы разработки технологии быстрых реакторов с замкнутым циклом, включающего демонстрацию основных технологий, и концептуальное проектирование японского быстрого реактора с натриевым теплоносителем.

109. В Республике Корея осуществляются предварительное проектирование и сопутствующие НИОКР в рамках создания прототипного быстрого реактора с натриевым теплоносителем поколения IV. Документ с предварительной информацией о безопасности был представлен в Управление по ядерному регулированию Республики Корея к концу 2015 года.

110. В Европе разрабатываются следующие концепции: Astrid (промышленный прототип реактора SFR поколения IV), ALFRED (европейский демонстрационный реактор LFR поколения IV), ALLEGRO (экспериментальный реактор GFR) и MYRRHA (экспериментальный свинцово-висмутовый исследовательский реактор на основе электроядерной системы). Этап концептуального проектирования Astrid будет завершен к концу 2015 года. Был завершен второй этап начальной стадии технического проектирования реактора MYRRHA.

111. В США деятельность в области быстрых реакторов в основном направлена на создание базового технического потенциала и реализацию некоторых инновационных технологических возможностей. На основе обширных экспериментальных данных, полученных по итогам изучения ряда ранее эксплуатировавшихся экспериментальных реакторов SFR, министерство энергетики США поддерживает ряд мероприятий по НИОКР, в том числе в области усовершенствованных материалов, безопасности и инновационных видов топлива. Проекты быстрых реакторов изучаются и частными компаниями.



РИС. В-2. Коммерческий быстрый реактор БН-800 на Белоярской АЭС, Российская Федерация, был подключен к энергосети в декабре 2015 года (Фото: Росэнергоатом)

В.1.3. Газоохлаждаемые реакторы

112. Эпоха газоохлаждаемых реакторов (GCR) первого поколения завершилась в конце 2015 года с прекращением эксплуатации установки "Wylfa 1" – последнего магноксидного реактора. В Соединенном Королевстве продолжается коммерческая эксплуатация 14 усовершенствованных реакторов GCR. Многие государства-члены по-прежнему разрабатывают высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (HTGR). В таких реакторах, работающих при высокой температуре ($\geq 700^{\circ}\text{C}$), используются микротвэлы, достигается очень глубокое выгорание и в качестве теплоносителя применяется гелий. В настоящее время рассматриваются лишь проекты модульных реакторов HTGR малой мощности, в которых вместо активных инженерно-технических средств безопасности применяются только внутренне присущие средства безопасности. Рассматривается возможность создания в краткосрочной перспективе системы эффективного производства электроэнергии, а также когенерации в целях удовлетворения масштабного спроса на рынке технологического тепла.

113. В Китае по графику идет строительство и изготовление основных компонентов высокотемпературного модульного реактора с шаровыми твэлами (HTR-PM) (рис. В-3). Эта промышленная демонстрационная энергетическая установка мощностью 200 МВт (эл.), состоящая из двух реакторных блоков мощностью 250 МВт (тепл.), как ожидается, будет введена в эксплуатацию к концу 2017 года. В настоящее время проектируется коммерческая АЭС мощностью 600 МВт (эл.), и уже определены возможные площадки для ее размещения. Создана устойчивая технология изготовления топлива, и в 2014 году были завершены международные испытания с облучением шаровых твэлов, а также запланированы испытания в аварийных условиях. Завершено строительство, и состоялся ввод в эксплуатацию завода по изготовлению топлива в Баотоу, а начало производства топлива намечено на 2016 год.

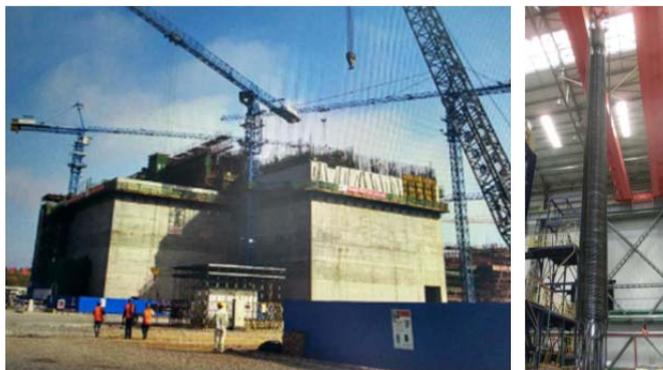


РИС. В-3. Стройплощадка (слева) и парогенератор (справа) HTR-PM в заливе Шидао, Вэйхай, Китай (Фото: Институт ядерных и новых энергетических технологий)

114. Национальное агентство по ядерной энергии Индонезии завершило концептуальное проектирование и подготовило предварительную документацию по техническому обоснованию безопасности экспериментального энергетического реактора с шаровыми твэлами мощностью 10 МВт (тепл.), а также представило регулирующему органу предварительную оценку площадки. Предусматривается также его применение в будущем для нужд коммерческой когенерации.

115. В Японии после рассмотрения регулирующими органами вопроса о возможности повторного запуска высокотемпературного реактора для технических испытаний (HTTR) мощностью 30 МВт (тепл.) запланировано проведение дальнейших испытаний в целях демонстрации безопасности и подключения к гелиевой газовой турбине и заводу по производству водорода.

116. В США деятельность по реакторам HTGR продолжается в рамках программы министерства энергетики по разработке концепций усовершенствованных реакторов. Задачи этой программы состоят в аттестации топлива, графитных и высокотемпературных материалов, иллюстрации пассивных характеристик безопасности на испытательных установках и разработке основ лицензирования. Проекты газоохлаждаемых реакторов разрабатываются и частными компаниями.

117. Казахстан, Украина, Южная Африка и Европейская комиссия также ведут деятельность, связанную с реакторами HTGR. В Российской Федерации продолжается подготовка к нагреву критического стенда "АСТРА" до различных температур, а в Республике Корея было произведено первое испытательное облучение микротвэлов.

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

118. Растет интерес к реакторам малой и средней мощности или модульным реакторам (PMCM) и их применениям. В прошлом десятилетии основное внимание уделялось усовершенствованным модульным реакторам. Представляя основные реакторные системы и типы теплоносителей, они могут вырабатывать до 300 МВт (эл.) энергии, а их компоненты могут изготавливаться в заводских условиях и доставляться в виде модулей на площадки или предприятия по мере необходимости. Основными движущими факторами разработки PMCM являются удовлетворение потребности в гибкой генерации электроэнергии для более широкого круга пользователей и сфер применения, замена стареющих установок, работающих на органическом топливе, повышение показателей безопасности с помощью пассивных средств безопасности и повышение экономической доступности. Существует примерно 50 проектов и концептов PMCM. Большая часть находится на различных стадиях разработки, и сообщается, что некоторые проекты будут реализованы в ближайшее время. Тем не менее в стадии строительства пока находятся лишь три PMCM в Аргентине, Китае и Российской Федерации.

119. Многие PMCM, запланированные к скорому внедрению, относятся к категории интегральных реакторов с водой под давлением. На продвинутых стадиях строительства находятся три PMCM: в Российской Федерации к 2019 году планируется ввести в эксплуатацию и подключить к энергосети передвижную атомную электростанцию (ПАЭС) типа PWR КЛТ-40С мощностью 35 МВт (эл.) на модуль; в Аргентине, как ожидается, в октябре 2018 года будет готов к вводу в эксплуатацию и достижению критичности прототип iPWR с естественной циркуляцией CAREM-25 мощностью 31 МВт (эл.); в Китае газоохлаждаемую установку HTR-PM из двух реакторов мощностью по 250 МВт (тепл.), которая также будет производить 200 МВт (эл.), предполагается ввести в эксплуатацию к концу 2017 года как промышленную демонстрационную энергетическую установку.

120. Что касается РМСМ, предназначенных для внедрения в ближайшем будущем, то в 2012 году в Республике Корея Комиссия по ядерной безопасности и физической ядерной безопасности страны выдала утверждение стандартной конструкции системно-интегрированного модульного усовершенствованного реактора (SMART), представляющего собой iPWR мощностью 100 МВт (эл.). В сентябре 2015 года было подписано соглашение о предпроектных технических работах в целях создания реактора SMART в Саудовской Аравии.

121. В Китае проект АСР100 – iPWR мощностью 100 МВт (эл.) – проходит общий обзор безопасности реакторов Агентства. В провинции Фуцзянь, Китай, планируется построить промышленную демонстрационную установку с двумя энергоблоками мощностью по 310 МВт (тепл.).

122. В Российской Федерации разработан ряд других проектов РМСМ для внедрения в ближайшем будущем на плавучих ПАЭС, включая РИТМ-200 мощностью 50 МВт (эл.), АБВ-6М (ММП с естественной циркуляцией теплоносителя и мощностью 6 МВт (эл.)) и ВБЭР-300 с электрической мощностью 300 МВт (эл.).

123. В США компания "НьюСкейл Пауэр" готовится в последнем квартале 2016 года направить в КЯР заявку на сертификацию конструкции своего реактора NuScale. Это iPWR с естественной циркуляцией, состоящий из 12 реакторных модулей чистой электрической мощностью 50 МВт (эл.) каждый. Другая конструкция iPWR – это двухмодульный реактор Generation mPower производства "Бэбкок энд Уилкокс технолоджиз"/"Бектэл" с расчетной мощностью 180 МВт (эл.) на модуль. Кроме того, в стадии разработки находятся РМСМ компании "Вестингауз" на 225 МВт (эл.) и РМСМ SMR-160 компании "Холтек" с естественной циркуляцией теплоносителя на 160 МВт (эл.).

124. В Японии разработан реактор 4S ("сверхбезопасный простой реактор малой мощности") с натриевым теплоносителем, который может работать без перегрузки топлива на площадке. Выходная мощность реактора 4S может составлять 30 и 135 МВт (тепл.), и он может эксплуатироваться в качестве распределенного источника энергии для многоцелевого использования. "Упрощенный модульный реактор среднемалой мощности" (также именуемый DMS) – это ММП кипящего типа с естественной циркуляцией, электрическая выходная мощность которого составляет 300 МВт (эл.).

125. Многие конструкции РМСМ находятся на стадии концептуального проектирования: в Индии идет разработка АНWR300 LEU – тяжеловодного реактора канального типа мощностью 304 МВт (эл.) с естественной циркуляцией в первом контуре.

126. Во Франции создана установка Flexblue – передвижной ММП мощностью 160 МВт (эл.) на модуль, который ставится в море на мертвый якорь. Управление Flexblue должно осуществляться дистанционно с берегового щита управления.

127. В Канаде разрабатывается интегральный реактор на солевых расплавах (IMSR), имеющий три типа конфигурации: IMSR80, IMSR300 и IMSR600 мощностью 32,5 МВт (эл.), 141 МВт (эл.) и 291 МВт (эл.) соответственно. Кроме того, в ряде других стран коммерческими группами проектируются реакторы на солевых расплавах.



РИС. В-4. Ход внедрения РМСМ

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

128. Ввиду роста обеспокоенности по поводу доступности ресурсов, изменения климата и энергетической безопасности в последние десятилетия началась реализация ряда международных инициатив в области инновационных ядерно-энергетических систем.

129. С учетом необходимости принятия мер, обеспечивающих устойчивое развитие ядерной энергии, в 2000 году Агентством был начат Международный проект по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО). В 2015 году Таиланд стал 41-м участником ИНПРО – проекта, который обеспечивает развитие контактов между владельцами и пользователями технологий и совместное рассмотрение ими международных и национальных мер, необходимых для внедрения желаемых инноваций в области ядерных реакторов и топливных циклов.

130. В 2014-2015 годах в рамках Серии изданий МАГАТЭ по ядерной энергии были опубликованы три руководства по оценке устойчивости в плане экономики, инфраструктуры и воздействия на окружающую среду, включая истощение ресурсов. В Индонезии, Румынии и Украине проводятся оценки ядерно-энергетических систем на основе методологии ИНПРО.

131. Международный форум "Поколение IV" (МФИ) – это международная инициатива в области сотрудничества, предпринятая с целью проведения НИОКР, необходимых для определения технико-экономического и функционального потенциала ядерных реакторов следующего поколения. Как указано в издании "Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems" ("Дорожная карта технологий для ядерно-энергетических систем поколения IV"), впервые опубликованном в 2002 году и обновленном в 2013 году, в рамках МФИ, в состав которого входят 13 участников, рассматривается шесть ядерно-энергетических систем: GFR, сверхвысокотемпературные реакторы (VHTR), SCWR, SFR, LFR и MSR.

132. Участники МФП, заинтересованные в осуществлении совместных НИОКР по одной или нескольким отобранным системам, реализуют общие проекты НИОКР с четко определенными ожидаемыми результатами, этапами и сроками выполнения и в рамках четко прописанных договорных обязательств.

133. Участники МФП и ИНПРО ежегодно организуют совещания по вопросам взаимодействия, на которых рассматриваются конкретные методологии оценки в области экономики, устойчивости с точки зрения распространения, риска и безопасности. Кроме того, они обмениваются информацией о текущих проектах по шести отобранным реакторным технологиям.

134. Другим важным направлением деятельности в области реакторов SFR, работы в котором были начаты в 2011 году МФП в сотрудничестве с Агентством, является разработка проектных критериев безопасности (ПКБ) и усилия по их согласованию с руководящими принципами безопасного проектирования различных проектных организаций, представленных в МФП, а также работа по количественной оценке высокого уровня безопасности, требуемого от систем SFR поколения IV. В 2014 году был опубликован первый вариант ПКБ SFR. Рассматривается возможность расширения масштабов этой деятельности с охватом других систем поколения IV, таких как VHTR и LFR.

135. В 2007 году в Европейском союзе (ЕС) была создана Устойчивая платформа ядерно-энергетических технологий (УПЯЭТ), задача которой – содействовать исследованиям, разработке и демонстрации технологий ядерного деления, необходимых для выполнения Европейского стратегического плана по энергетическим технологиям. Недавно были обновлены стратегическая повестка инноваций и исследований и стратегия внедрения УПЯЭТ. УПЯЭТ объединяет более 100 европейских партнеров, представляющих промышленность, исследовательские организации, научные круги, организации технической безопасности, неправительственные организации, а также национальных представителей.

136. В рамках УПЯЭТ целью Европейской промышленной инициативы по созданию ядерной энергетики с устойчивой ресурсной базой, учрежденной ЕС в 2010 году, является удовлетворение потребности европейских стран в демонстрации технологий 4-го поколения реакторов на быстрых нейтронах, вспомогательной исследовательской инфраструктуры, топливных установок и НИОКР. Ее работа заключается в развитии двух параллельных технологий: базовым решением станет технология реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, причем примерно к 2020 году во Франции планируется строительство прототипа, который станет серьезным подспорьем в освоении этой технологии (Astrid); в качестве альтернативной технологии рассматриваются реактор на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем (ALFRED), либо реактор на быстрых нейтронах с газовым теплоносителем (ALLEGRO). Кроме того, внедрению технологии быстрых реакторов, включая рециклирование актинидов для трансмутации, будет способствовать свинцово-висмутовая облучательная установка (MYRRHA).

В.1.6. Неэлектрические применения ядерной энергетики

137. В ряде государств-членов широкий интерес вызывает использование ядерной энергии для неэлектрических применений, особенно для опреснения морской воды, производства водорода, централизованного теплоснабжения, добычи нефти третичными методами и других промышленных применений.

138. Уже продемонстрированы и опробованы технологии, необходимые для когенерации (т.е. производства электроэнергии и технологического тепла, см. рис. В-5). В области ядерной когенерации был накоплен значительный опыт (более 750 эксплуатационных лет на 74 ядерных

реакторах) ее использования для централизованного теплоснабжения и опреснения морской воды. На АЭС, действующих в настоящее время в режиме ядерной когенерации, можно добиться увеличения суммарного теплового КПД более чем на 30%, снизить стоимость производства энергии на 20% и обеспечить большую гибкость функционирования в составе энергосети. По мере появления инновационных усовершенствованных энергосистем, предназначенных для работы с теплоносителем, имеющим очень высокую температуру на выходе, можно будет создать надежный, масштабный и устойчивый источник энергии для ряда промышленных процессов, таких как производство водорода, для которого требуются высокотемпературные технологические пар и тепло.

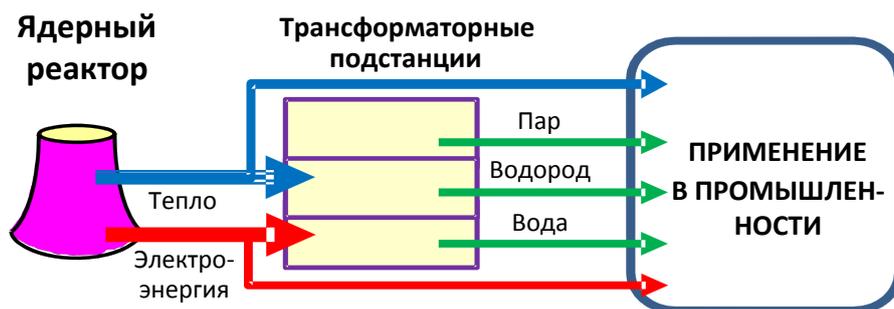


Рис. В-5. Общая схема подключения ядерного реактора к находящемуся на площадке промышленному объекту

139. Недавно Российская Федерация подписала с Алжиром, Египтом и Иорданией соглашения об использовании ядерной энергетики для опреснения морской воды и ведет соответствующие переговоры с Саудовской Аравией. Саудовская Аравия подписала меморандум о взаимопонимании с Республикой Корея в отношении двух PWR SMART мощностью 330 МВт (тепл.), которые будут применяться для когенерации, в том числе для опреснения морской воды, и обсуждает с Францией будущие планы опреснения морской воды с использованием ядерной энергии. Сдвоенные PWR на АЭС "Диабло кэньон", Калифорния, США, могут производить примерно 1,5 млн галлонов питьевой воды в день, при этом для потребления на площадке используется лишь 40% этого объема. С учетом продления сроков лицензий на эксплуатацию до 2024 и 2025 годов и ввиду недавней сильной засухи в мае 2015 года оператор согласился предоставлять местным властям воду для ликвидации лесных пожаров. Также рассматривается вопрос о подаче вырабатываемой питьевой воды в коммунальную систему водоснабжения.

140. Разнообразные работы осуществляются в области производства водорода, особенно в США и ЕС. Их цель – организовать применение ядерной энергии в секторе перевозок и сократить нынешнюю зависимость от органического топлива, поскольку цены на него нестабильны, объем этого топлива конечен, а его использование приводит к образованию парниковых газов. В ряде стран осуществляются программы научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, и накоплен определенный опыт применения ядерной энергии для получения высокотемпературных условий в лабораторных масштабах, а также в рамках проводившихся ранее испытаний компонентов реакторов HTGR. В Японии, где успешно разработан и эксплуатируется реактор HTTR мощностью 30 МВт (тепл.), на основе этого реактора планируется реализовать проект, призванный продемонстрировать когенерацию электроэнергии с применением газовой турбины и водорода с использованием процесса термохимического расщепления воды. Предполагается, что эта система начнет функционировать в 2022 году. Цель проекта – полностью разработать технологию этой системы, в том числе базу данных по лицензированию, необходимую для запланированного на 2030 год строительства коммерческой станции GT-HTR300 для комбинированного производства водорода и опреснения воды. Строящийся в Китае реактор

HTR-PM можно будет использовать для производства технологического пара или водорода. В Индии, Канаде, Республике Корея и прочих странах продолжают НИОКР по другим направлениям с участием промышленности.

141. С учетом энергетической политики ЕС и ее главной цели по ограничению выбросов углерода к 2050 году Европа может стать первым регионом, где ядерная когенерация получит широкомасштабное применение. На крупном промышленном рынке Европы проявляется растущий интерес к применению ядерной когенерации на перерабатывающих предприятиях, химических заводах и в других отраслях, где когенерационные установки, работающие на органическом топливе, могут быть напрямую замещены ядерными реакторами, обеспечивающими одновременно большое количество технологического пара и электроэнергии. Проведенное во Франции исследование показало, что ныне действующие ядерные реакторы могут быть легко переоборудованы для теплоснабжения крупных сетей. Такой шаг может открыть новые перспективы в области энергоменеджмента и заложить основу для масштабной экономии энергии в будущем.

В.2. Термоядерный синтез

142. Выработка энергии путем термоядерного синтеза рассматривается как одна из величайших технических задач XXI века. Начав в 2006 году проект по созданию Международного термоядерного экспериментального реактора (ИТЭР), ЕС, Индия, Китай, Республика Корея, Российская Федерация, США и Япония объединили усилия, чтобы продемонстрировать научную и технологическую возможность и характеристики безопасности использования в мирных целях термоядерной энергии на уровнях мощности свыше 500 МВт.

143. Годы напряженной работы всех участников ИТЭР приносят свои плоды: установка обретает форму, и наблюдается прогресс по всем направлениям. Завершение первого уровня комплекса токамака (площадью 9 600 м² и общей толщиной конструкции 1,5 м, образованной четырьмя подряд слоями железобетона – два по 50 см, один 30 см и один 20 см) в последнем квартале 2014 года ознаменовало завершение этапа крупных подготовительных работ и начало стадии строительства (рис. В-6).



РИС. В-6. Вид сверху на строительную площадку ИТЭР в августе 2015 года (слева). По состоянию на 21 октября 2015 года (справа) было построено 200° сегмента биологической защиты ИТЭР, представляющего собой окружающую установку "кольцо" толщиной 3,2 метра (Фото: ИТЭР)

144. Инфраструктура реактора соответствует требованиям ядерной безопасности Франции; ИТЭР станет крупнейшей ядерной установкой в стране и первой установкой термоядерного синтеза в мире. В мае 2015 года был пройден один из этапов строительства: два первых компонента установки – два из четырех электротрансформаторов, через которые сеть напряжением 400 кВ будет соединяться с распределительной энергосистемой переменного тока – были смонтированы на постоянном месте расположения.

145. При создании реактора партнеры по ИТЭР сталкиваются с очень серьезными препятствиями, однако все они осознают необходимость анализа научных и технических вопросов, выходящих за пределы строительства ИТЭР, а также необходимость начала их решения уже сегодня. В совокупности эта деятельность по разработке системы освоения термоядерной энергии представляет собой программу "демонстрационной термоядерной энергетической установки" (DEMO).

146. 11-15 мая 2015 года в Китайском университете науки и технологии, Хэфэй, Китай, состоялся третий семинар-практикум Агентства по программе DEMO, цель которого заключалась в обсуждении пакета основных научных, технических и программных вопросов, связанных с DEMO, и определении возможностей и программных мероприятий для их решения. Еще одной целью стало определение возможных направлений дальнейшего движения вперед с помощью международного сотрудничества.

147. Итоги этого семинара-практикума показали, что основным вкладом ИТЭР в программу термоядерного синтеза станет более глубокое понимание физики пылающей плазмы. Кроме того, ИТЭР позволит существенно продвинуться в решении сложных проблем поддержания стабильности плазмы и управления ею, включая прогнозирование и предупреждение или ослабление крупных срывов плазмы и контроль режимов с локализованными по краям мод.

148. В области энергоснабжения в плазме проект ИТЭР поможет определить эффекты долгосрочного воздействия плазмы на компоненты первого рубежа, например, ионные дефекты материалов первой стенки и дивертора. Поскольку в DEMO будут использоваться системы нагрева и возбуждения тока, аналогичные ИТЭР, то ИТЭР позволит напрямую продемонстрировать техническую реализуемость нескольких ключевых компонентов. Наконец, ИТЭР будет способствовать развитию технологии бланкетов в рамках программы создания испытательного бланкетного модуля. Опыт показывает, что техническое проектирование и интеграционный анализ должны быть максимально детальными, а все валидационные и аттестационные параметры должны определяться до представления регулирующему органу предварительного анализа безопасности. ИТЭР позволит составить всеобъемлющую базу физических и технологических данных для конструкторов DEMO, которые смогут воспользоваться ею при анализе, необходимом для получения подробной информации, которая требуется для анализа безопасности.

149. Несколько участников ИТЭР сконцентрировали свои усилия на исследовании интегрированных устройств, которые будут использоваться за рамками ИТЭР. В отличие от деятельности по ИТЭР эти исследования проводятся на национальном уровне и находятся на стадии предварительного концептуального проектирования. В таблице В-1 обобщается информация о четырех таких устройствах, представленная на семинаре-практикуме.

	EU DEMO	JA DEMO	K-DEMO	CFETR (этап I)
Задача	Полезная электроэнергия ($Q_{eng} > 1$) Воспроизводство трития	Полезная электроэнергия ($Q_{eng} > 1$) Воспроизводство трития	Полезная электроэнергия ($Q_{eng} > 1$) Воспроизводство трития Испытание материалов и компонентов в среде термоядерного синтеза	Испытание материалов и компонентов в среде термоядерного синтеза Полный тритиевый топливный цикл
P_{fus}	2000 МВт	1500 МВт	≥ 300 МВт	50–200 МВт
КВТ	$> 1,0$	$> 1,05$	$> 1,0$	$\geq 1,0$
Длительность импульса	2 часа	2 часа до стационарного состояния	Стационарное состояние	1000 с до стационарного состояния
Коэффициент нагрузки	$\sim 70\%$			30–50%
P_{elec}	500 МВт	200–300 МВт (полезн.)	≥ 150 МВт (полезн.)	Н/Д
Воспроизводство трития	Будет определено – рассматриваются твердые и литиево-свинцовые бридеры	Твердый бридер, технология PWR	Твердый бридер, технология PWR	Твердый бридер, технология PWR, замкнутый тритиевый цикл в масштабе $\sim 1/10$ DEMO
Конфигурация магнитного поля	Токамак	Токамак	Токамак	Токамак
Обслуживание	Дистанционное манипулирование	Дистанционное манипулирование	Дистанционное манипулирование	Дистанционное манипулирование

Таблица В-1. Нынешние задачи и эксплуатационные цели планируемых интегрированных термоядерных устройств за пределами ИТЭР. EU DEMO (Европа); JA DEMO (Япония); K-DEMO (Республика Корея); CFETR (Китай); P_{elec} = электрическая мощность; P_{fus} = мощность синтеза; Q_{eng} = расчетный коэффициент усиления мощности; КВТ = коэффициент воспроизводства трития.

150. Эти исследования могут позволить добиться серьезного прорыва к реализации DEMO к середине текущего века, однако при количественном измерении ожидаемого прогресса по всем параметрам готовности DEMO необходимо будет учитывать пробелы, которые могут сохраниться даже при успешном осуществлении всех этих проектов. Следует отметить, что имеются серьезные пробелы в планах строительства самих агрегатов, особенно на поздних этапах; для их заполнения в среднесрочной перспективе необходимо проведение соответствующих НИОКР.

151. Не сняты вопросы по некоторым ключевым темам, включая физику и контроль пылающей плазмы, материалы, компоненты и технологии, готовность агрегатов и варианты конфигурации магнитного поля. Общеизвестно, что по отдельности ни одно устройство не даст возможности одновременно решить все проблемы DEMO, однако пока неясно, какое количество агрегатов может потребоваться и насколько разнообразным должен быть их оптимальный набор. Поэтому в интересах сокращения дублирования и более уверенного преодоления технических препятствий и отсрочек значительно более выигрышным вариантом представляется осуществление международной стратегии планирования и координации работы по удовлетворению потребностей DEMO, которые пока не удовлетворяются в надлежащей мере.

С. Применения ускорителей и исследовательских реакторов

С.1. Ускорители

С.1.1. Протонные ускорители высокой мощности

152. Ускорители протонного или ионного пучка высокой энергии становятся все более востребованными в различных областях, таких, как физика элементарных частиц, ядерная и нейтронная физика, а также трансмутация долгоживущих ядерных отходов. Для этих применений обычно требуются пучки с очень высокими средними значениями мощности и энергии в гигаэлектронвольтовом диапазоне, что значительно превышает мощность большинства существующих установок. На рис. С-1 показаны текущие и планируемые проекты установок, в которых мощность пучка доводится до 10 МВт.

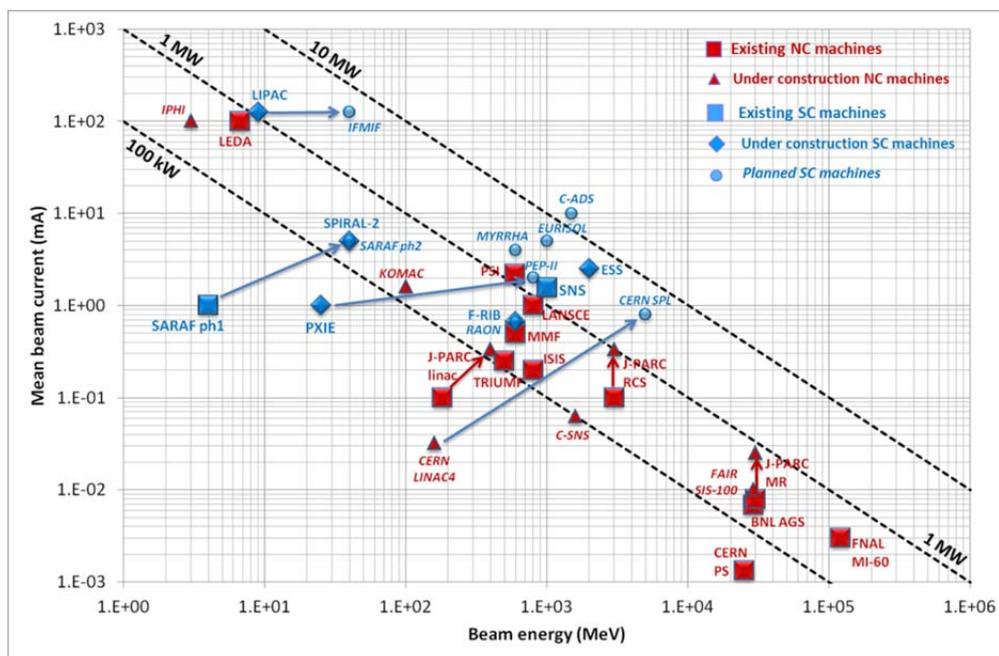


РИС. С-1. Ускорители протонного/нейтронного пучка высокой мощности по всему миру. Источник: Jean-Luc Biarrotte, Institute of Nuclear Physics, Orsay, France; Приводится по изданию: BIARROTTE, J.-L., "High power proton/deuteron accelerators", Proceedings of the 16th International Conference on RF Superconductivity, Paris, France, 2013, Joint Accelerator Conferences Website (2014) 35–41.

153. Электроядерные системы (ЭЛЯС) – возможное техническое решение для специализированных установок по трансмутации, основанных на мегаваттном линейном ускорителе сверхпроводящих протонов повышенной надежности. Бельгийский проект MYRRHA, финансируемый, в частности, Европейским союзом, и китайский проект ЭЛЯС позволят продемонстрировать возможности технологии ЭЛЯС на высокой мощности в течение 10-15 лет.

С.1.2. Дорожная карта ионно-пучковых методов

154. Ионно-пучковые методы (ИПМ) на основе ускорителей включают в себя целый ряд аналитических и модификационных методов, в ходе которых энергетические (0,1–100 МэВ) пучки заряженных частиц ($Z = 1, 2$ и выше) направляются на материал, подлежащий анализу или модификации. Такие методы используются уже более 50 лет, и большинство физических концепций, данных и приборов, на которых они основываются, хорошо отработаны. Прогресс в развитии ИПМ принес свои плоды во многих областях (рис. С-2) – например, в климатических исследованиях с использованием космогенных изотопов, разработке усовершенствованных материалов, изучении старения реакторных компонентов и развитии адронной терапии, которая, по всей вероятности, даст колоссальный эффект с точки зрения улучшения здоровья людей.

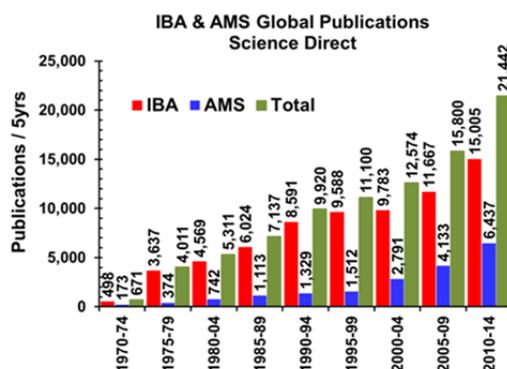


Рис. С-2. Рост числа публикаций, посвященных использованию ионно-пучковых методов (Предоставлено: Давид Коуэн, Австралийская организация по ядерной науке и технике) (ИПА: ионно-пучковый анализ; УМС: ускорительная масс-спектрометрия)

155. Агентство взяло на себя ведущую роль в координации работы по составлению дорожной карты ИПМ, которая будет включать в себя элементы среднесрочного (5–15 лет) стратегического планирования, касающегося развития теории использования ускорителей и соответствующих технологий. После широких дискуссий международных экспертов был подготовлен первый проект, в котором были определены приоритеты технологического развития и установлены соответствующие параметры. Работу над дорожной картой ИПМ предполагается завершить в 2016 году. Соответствующие документы имеются в Агентстве на портале знаний об ускорителях: <https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/Pages/default.aspx>.

С.1.3. Рентгеновские методы определения характеристик и визуализации материалов

156. Синхротронное излучение вот уже более тридцати лет используется для углубления фундаментальных знаний в различных научных отраслях и развития технологий. Четвертое поколение источников синхротронного излучения откроет новые возможности для ученых. К числу текущих проектов относятся MAX IV в Лунде, Швеция (полный ввод в эксплуатацию намечен на 2016 год), и Sirius в Бразилии (ввод в эксплуатацию намечен на 2018 год). Недавние успехи в развитии технологии ускорителей позволяют обеспечить низкий уровень излучения и, следовательно, высокую яркость и более стабильную работу. Ожидается технологический прорыв в области рентгеновской визуализации высокого разрешения, например в птохографии, где возможна реконструкция изображения с пространственным разрешением, намного

превышающим то, которое дают обычные методы. Эти новые синхротронные источники дают толчок параллельному развитию усовершенствованных детекторов рентгеновского излучения с мозаичным изображением, работающих по принципу энергодисперсионной спектроскопии или подсчета одиночных фотонов.

157. Один из показательных примеров – работающий на матрице из 384 кремниевых диодов детектор рентгеновской флюоресценции (РФ) "Майя", который, будучи испытан на разных синхротронах, уже доказал свою способность быстро генерировать графические данные об элементном и химическом составе образца. Макровизуализация РФ с пространственным разрешением, скорректированным с учетом размеров конкретного пучка синхротронного излучения, нашла важное применение в исследовании биологических систем и произведений искусства (рис. С-3). Параллельное развитие рентгеновской оптики и соответствующих методологий может также обеспечить проведение анализа (с пространственным разрешением) крупных образцов при облучении относительно широкими рентгеновскими пучками. Концепция рентгеновских камер с охватом всего поля получает быстрое развитие как многообещающая аналитическая методология, которая может быть адаптирована под синхротронные источники, генераторы индуцированного протонами рентгеновского излучения или портативные РФ-спектрометры (рис. С-4).



РИС. С-3. В адаптированном виде приводится по изданию: MONICO, L., et al., "Full spectral XANES imaging using the Maia detector array as a new tool for the study of the alteration process of chrome yellow pigments in paintings by Vincent van Gogh", *J. Anal. At. Spectrom.* **30** (2015) 613-626.

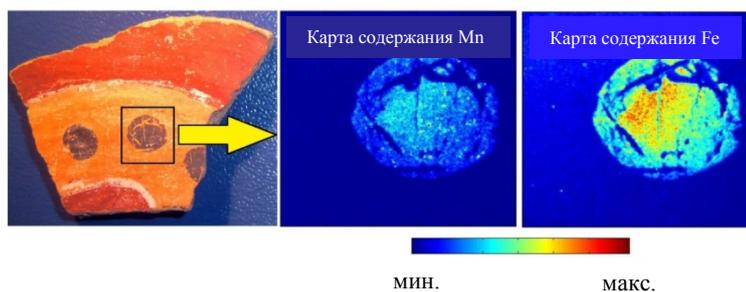


РИС. С-4. Использование индуцированного протонами рентгеновского излучения (с охватом всего поля) для анализа черного марганцевого декора на раскрашенной глиняной вазе, принадлежащей к культуре Наска (Перу), в Национальном институте ядерной физики, Италия.

С.1.4. Использование комбинированных ионно-пучковых и нейтронно-пучковых методов для получения идентификационных отпечатков микроэлементов и молекул

158. Использование ионно-пучковых и нейтронно-пучковых методов для анализа микроэлементов широко практикуется, и такие услуги оказываются аккредитованными лабораториями в ряде государств-членов, где работают ускорители или исследовательские реакторы. Они применяются в следующих сферах: анализ волос, ногтей, кожи, растительного и животного материала в медицинских или биомедицинских целях; идентификация происхождения стекол, сельскохозяйственной/пищевой продукции и объектов культурного наследия; идентификация источников боеприпасов, следов выстрелов из огнестрельного оружия, пуль и ядерных взрывов; выявление и отслеживание загрязнения окружающей среды.

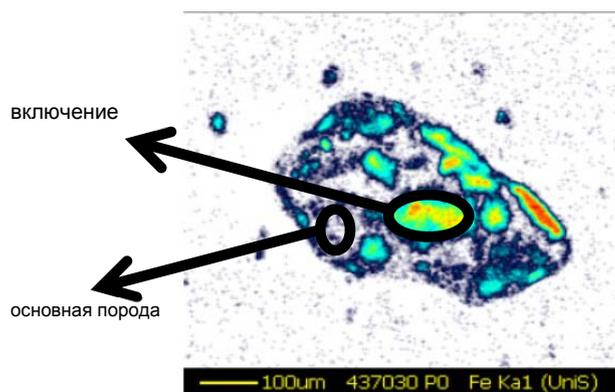


Рис. С-5. Двухмерное изображение элементного состава образца альфа-кварца, измеренного при помощи сфокусированных ионных пучков. Включения железа могут быть легко отделены от основной породы благодаря определению стехиометрии по отдельным зонам, что крайне полезно для целей выяснения происхождения (Предоставлено: Мелани Бейли, Университет Суррея, Соединенное Королевство)

159. Агентство оказывает помощь в разработке мультианалитического подхода, используя синергические связи между ионно-пучковыми и нейтронно-пучковыми методами высокоточного анализа микроэлементов и молекул. Кроме того, для определения происхождения материалов будет разрабатываться метод двух/трехмерного картографирования (с высоким разрешением) микроэлементов в "реальных" объектах (например, имеющих неровности на поверхности или мокрых образцах) (рис. С-5).

С.2. Исследовательские реакторы

160. Исследовательские реакторы используются в первую очередь как источники нейтронов для исследований и различных применений, наиболее распространенные из которых перечислены в таблице С-1. Их мощность может варьироваться от нуля (например, в случае критической или подкритической сборки) до приблизительно 200 МВт (тепл.), что, однако, совсем немного в сравнении с мощностью обычной АЭС – 3000 МВт (тепл.). В отличие от энергетических реакторов, исследовательские реакторы обладают гораздо большим разнообразием конструкций и могут работать в различных режимах – стационарных или импульсных.

Таблица С-1. Распространенные виды применения исследовательских реакторов во всем мире⁴

Тип применения ^a	Число соответствующих исследовательских реакторов ^b	Число государств-членов, в которых находятся используемые установки
Обучение/подготовка кадров	173	54
Нейтронно-активационный анализ	124	54
Производство радиоизотопов	89	44
Облучение материалов/топлива	73	28
Нейтронная радиография	71	40
Нейтронное рассеивание	48	32
Трансмутация (легирование кремния)	26	17
Геохронология	27	23
Трансмутация (драгоценные камни)	18	10
Нейтронная терапия, в основном НИОКР	18	12
Прочие применения ^c	128	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 описываются более детально.

^b Из 265 учтенных исследовательских реакторов (на ноябрь 2015 года 246 эксплуатировались, 19 были временно остановлены).

^c Калибровка и тестирование приборов, эксперименты с системами защиты, измерение ядерных данных, экскурсии для публики, семинары.

161. На сегодняшний день в 67 странах построено 754 исследовательских реактора, и по состоянию на 31 декабря 2015 года эксплуатировалось 246 реакторов в 55 странах. Наибольшее количество работающих исследовательских реакторов (63) находится в Российской Федерации, за которой следуют США (42), Китай (17) и Франция (10). Исследовательские реакторы имеются и во многих развивающихся странах (в Африке, например, работают восемь установок). Среди мирового парка исследовательских реакторов 58 установок работают на мощности свыше 5 МВт, создавая нейтронные потоки большой плотности для высокомоощных применений.

162. Коэффициент использования многих действующих исследовательских реакторов по-прежнему невысок, а половина из них отслужили уже более 40 лет. В этой связи большинство из них требуют к себе постоянного внимания в виде детального стратегического планирования их использования, управления старением, модернизации и ремонта. Продолжают наращиваться усилия по повышению эффективности использования и извлечению дополнительных доходов. За последние два года были подготовлены и представлены на рассмотрение Агентства стратегические планы для 33 исследовательских реакторных установок. Агентство также пересмотрело свои руководящие принципы стратегического планирования в отношении исследовательских реакторов, включив в них вопросы, касающиеся проектов строительства новых исследовательских реакторов или капитального ремонта, и на многочисленных примерах представив опыт эксплуатации

⁴ Источник: база данных Агентства по исследовательским реакторам (<http://nucleus.iaea.org/RRDB/>).

образцовых установок. Продолжается совместная международная работа в такой, в частности, области, как пропаганда и расширение использования исследовательских реакторов в учебно-образовательных целях. Один из примеров – реализуемый в Латинской Америке и Европе проект по созданию реакторной интернет-лаборатории, призванный объединить университеты, в которых исследовательские реакторы эксплуатируются в учебно-образовательных целях. В сентябре 2015 года этот проект стартовал в Латинской Америке (принимающей страной выступила Аргентина), а в октябре 2015 года – в Европе и Африке (принимающей страной выступила Франция).

163. Несколько стран находятся на разных стадиях строительства новых исследовательских реакторов, которые станут основными национальными установками, способствующими развитию инфраструктуры и программ в области ядерной науки и технологий, включая ядерную энергетику. Продолжается сооружение новых исследовательских реакторов в Аргентине, Бразилии, Индии, Иордании, Республике Корея, Российской Федерации, Саудовской Аравии и Франции. Официальные планы строительства новых исследовательских реакторов есть еще у нескольких государств-членов, в том числе у Беларуси, Бельгии, Вьетнама, Многонационального Государства Боливия, Нидерландов и США. Вопрос о строительстве новых исследовательских реакторов рассматривают и другие страны, такие, как Азербайджан, Бангладеш, Боливия, Гана, Кувейт, Ливан, Малайзия, Монголия, Мьянма, Нигерия, Объединенная Республика Танзания, Судан, Таджикистан, Таиланд, Тунис Эфиопия и Южная Африка⁵. Налажено международное сотрудничество в строительстве многоцелевых исследовательских реакторов, таких как реактор "Жюль Горовиц" во Франции и реактор МБИР в Российской Федерации.

164. Развитию международного сотрудничества и расширению круга пользователей исследовательских реакторов и заинтересованных в их эксплуатации сторон способствует создание при содействии Агентства⁶ региональных сетей и объединений по использованию исследовательских реакторов. Кроме того, в 2014 году Агентство ввело в действие новую модель сотрудничества - международный центр МАГАТЭ на базе исследовательского реактора (ИСЕРР). В 2015 году в качестве первого ИСЕРР был назначен Комиссариат по атомной энергии и альтернативным источникам энергии Франции в лице своих научно-исследовательских центров в Сакле и Кадараше, а в 2016 году ожидается поступление дополнительных заявок на назначение от других организаций.

165. На протяжении всего 2015 года Управление по обращению с материалом и его минимизации при министерстве энергетики США, ставшее преемником Инициативы по сокращению глобальной угрозы, продолжало выполнение своей задачи по минимизации использования высокообогащенного урана (ВОУ) в гражданском ядерном секторе. К концу 2015 года 94 исследовательских реактора, относящиеся к сфере компетенции Управления, в том числе одна установка для производства молибдена-99 на основе ВОУ, были переведены на НОУ топливо или официально остановлены. К числу крупных достижений относится загрузка Ямайкой НОУ топлива в активную зону реактора Slowpoke-2, выгрузка ВОУ топлива из китайского прототипного малогабаритного реактора – источника нейтронов (МРИН) в порядке подготовки к конверсии и введение российских уран-молибденовых опытно-испытательных

⁵ Публикация Агентства ""Specific Considerations and Milestones for a Research Reactor Project" ("Специфические особенности и основные этапы проектов исследовательских реакторов") (IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-5.1, Vienna, 2012) и комплект вспомогательных документов призваны помочь государствам-членам в этой области.

⁶ Агентство поддерживает работу ряда различных объединений по использованию исследовательских реакторов в странах Балтии, Карибского бассейна, Центральной Африки, Центральной Азии, Восточной Европы, Средиземноморья и Содружества Независимых Государств, а также Глобальной сети исследовательских реакторов TRIGA.

сборок из НОУ в реактор МИР в Димитровграде для облучения. Агентство продолжало оказывать поддержку Гане в работе по конверсии и перегрузке ВОУ топлива из активной зоны ее МРИН, которая должна быть осуществлена в 2016 году.

166. Деятельность по сведению к минимуму использования высокообогащенного урана включает в себя возврат ВОУ топлива исследовательских реакторов в страну происхождения, где оно проходило обогащение. К концу 2015 года задачи программы возврата ВОУ американского происхождения были выполнены на 76%, что соответствует удалению приблизительно 1300 кг свежего и отработавшего ВОУ топлива исследовательских реакторов. Программа возврата ВОУ российского происхождения выполнена на 86%, что соответствует удалению 2165 кг свежего и отработавшего ВОУ топлива исследовательских реакторов. Необлученный ВОУ российского происхождения был вывезен с реактора – источника нейтронов Breeder-1 в Тбилиси, Грузия, в декабре 2015 года. После удаления облученного жидкого ВОУ топлива с реактора ИИН-3М ОАО "Фотон" в Узбекистане (рис. С-6) число стран, ранее имевших ВОУ, а теперь его не использующих, составило 28⁷.



РИС. С-6. Транспортный контейнер с облученным жидким ВОУ топливом (слева). Грузовик, перевозящий упаковку с контейнером жидкого ВОУ топлива, заезжает в грузовой отсек транспортного самолета, при помощи которого осуществляется возврат топлива с реактора ИИН-3М ОАО "Фотон" в Узбекистане в Российскую Федерацию (справа)

167. Для конверсии высокопоточных и высокоэффективных исследовательских реакторов требуется усовершенствованное уран-молибденовое топливо очень высокой плотности, которое разрабатывается в настоящее время. Несмотря на достигнутый в этой области значительный прогресс, для обеспечения коммерческой доступности сертифицированного НОУ топлива высокой плотности необходимы дальнейшие усилия и испытания, особенно применительно к реализации программ по облучению и послереакторному исследованию топлива, а также в области методов его изготовления.

168. Хотя в 2015 году серьезного дефицита молибдена-99 не было, эксплуатационные проблемы на перерабатывающих установках и старых исследовательских реакторах сохраняются. Благодаря изменениям в структуре спроса, успехам в повышении КПД и диверсификации поставок отрасль успешно справлялась с незначительными незапланированными остановками в производстве. В отрасли по производству медицинских изотопов продолжается переход от ВОУ к НОУ мишеням, при этом основными поставщиками молибдена-99, произведенного на основе НОУ, остаются Австралийская организация по

⁷ Плюс Тайвань, Китай.

ядерной науке и технике (АНСТО) и компания "НТП радиоизотопс" в Южной Африке. В конце 2016 года АНСТО рассчитывает завершить строительство нового завода по производству молибдена-99, который позволит увеличить производство до 3500 кюри шестидневного молибдена в неделю. "НТП радиоизотопс" продолжает перевод своих технологических процессов на исключительное использование НОУ. Институт радиоэлементов в Бельгии и компания "Маллинкродт фармацевтикалс" в Нидерландах продолжают работу по конверсии своих производств. Хотя Ядерные лаборатории Канады и намерены продлить срок эксплуатации национального исследовательского универсального (НИУ) реактора до 31 марта 2018 года, Канада планирует прекратить регулярное производство молибдена-99 на НИУ реакторе 31 октября 2016 года. Бельгийский реактор BR2 – одна из главных установок по облучению молибдена-99 – в феврале 2015 года был остановлен на долговременное техническое обслуживание и модернизацию с целью подготовить установку к продлению лицензии на ее эксплуатацию на 10 лет после 2016 года. Ожидается, что его нормальная эксплуатация возобновится в июле 2016 года. Международные круги, занимающиеся производством молибдена-99, провели успешную работу по корректировке производственных планов с учетом этого длительного останова. Российская Федерация также увеличила производство молибдена-99 в 2015 году.

D. Новые применения радиационных технологий в промышленности

169. Радиационные технологии непрерывно адаптируются для различных применений в промышленности – от поиска неисправностей на производственном оборудовании и повышения качества производства ценных материалов до снижения содержания загрязняющих веществ в промышленных стоках. В настоящем разделе приводится описание основных радиационных технологий, которые в последние годы привели к заметным улучшениям в ряде отраслей и теперь применяются в промышленных масштабах.

D.1. Радиационные технологии в промышленности и инженерно-строительной деятельности

170. Одним из ядерных методов, позволяющим в режиме реального времени исследовать степень износа или коррозии материала в масштабе от микро- до нанометров, является тонкослойная активация, которая применяется в таких высокотехнологичных отраслях, как автомобилестроение, энергетика и металлургия. С промышленностью не связаны процессы эрозии, переноса, отложения осадков и уплотнения, которым подвержены прибрежные зоны и морское дно. Однако и здесь радиоизотопные индикаторы и закрытые источники зачастую незаменимы при исследованиях переноса отложений в морской среде, позволяющих получить важные данные для повышения качества проектирования, обслуживания и выбора оптимальных параметров гражданских сооружений, а также для более эффективной защиты и рационального использования ресурсов прибрежных зон.

D.1.1. Применение тонкослойной активации для оценки износа, эрозии и коррозии материалов

171. Ядерные методы широко используются для исследования сложных физических и химических явлений, в том числе износа, массопереноса, коррозии и эрозии. Общеизвестно, что на надежность промышленного оборудования, систем транспортировки, электростанций на

ядерном и органическом топливе, трубопроводов существенно влияют такие процессы деградации, как износ, коррозия и эрозия. В этой связи большое значение имеет разработка эффективных методов обнаружения, измерения и контроля таких процессов. Благодаря правильным методам контроля можно избежать опасных происшествий при эксплуатации промышленных агрегатов и транспортных средств и предотвратить производственные убытки, вызванные выходом оборудования из строя.

172. Ядерные методы позволяют эффективно измерять и контролировать износ и коррозию в случаях, когда доступ к поверхностям затруднен или они скрыты под другими конструкциями. При тонкослойной активации заряженные частицы активируют лишь поверхностные слои необходимых деталей оборудования, что позволяет проверять состояние ключевых узлов несмотря на их недоступность. Поскольку используется низкий уровень активности, с образцом легко производить необходимые операции, при этом обеспечивается высокая чувствительность измерений.

173. Для оценки износа и коррозии оборудования в различных отраслях современной промышленности все чаще применяются индикаторные технологии, прежде всего благодаря усовершенствованным методам мечения исследуемой детали радиоактивными изотопами. Для измерения износа материала в нанометрах при относительно низком уровне активности были разработаны различные методы мечения, например, сверхтонкослойная активация, в основе которой лежит имплантация отскакивающих тяжелых радиоактивных ядер, образующихся в результате ядерной реакции, и которая позволяет измерять износ поверхности с точностью до нескольких нанометров.

D.1.2. Применение радиационных технологий для изучения переноса отложений

174. Изучение переноса отложений в морях и реках представляет большую важность для строительства, а также для защиты и рационального использования морского побережья. Прибрежная зона и морское дно – это динамичные среды, в которых отложения проходят этапы эрозии, переноса, осаждения и уплотнения. К числу основных причин эрозии пляжей относятся шторма и деятельность человека, например, строительство волноломов, дамб и дноуглубительные работы в устьях рек. Каждый из этих факторов нарушает естественное движение отложений. Сегодня действие антропогенных факторов все более усугубляется последствиями изменения климата. Многие современные стратегии и виды деятельности могут приводить к ускоренной эрозии пляжей, однако имеются практически осуществимые способы как снижения подобного ущерба, так и неистощительного использования ресурсов прибрежных зон.

175. Ядерные методы могут применяться в исследованиях динамики отложений для получения важных данных, позволяющих повысить эффективность проектирования, обслуживания и выбора оптимальных параметров гражданских сооружений. Особенно полезным оказалось применение радиоизотопных индикаторов и закрытых источников в исследованиях переноса отложений.

176. В отличие от обычных индикаторов, радиоактивные индикаторы обеспечивают более высокую чувствительность и точность измерений и позволяют проводить прямую оценку путей переноса отложений в режиме реального времени и с однозначными результатами. Группы исследователей из разных стран разработали различные методы отслеживания и контроля отложений с помощью радиоиндикаторов.

177. Помимо радиоиндикаторов используются закрытые источники, которые позволяют получить данные о плотности отложений, оседающих в фарватере или акватории гавани, а также о концентрации отложений, циркулирующих в воде во взвешенном состоянии.

178. Радиоиндикаторы и закрытые источники могут внести значительный вклад в решение двух типичных сложных проблем: управления прибрежными зонами, подверженными эрозии, и морскими побережьями, отступающими в течение длительного времени, что часто приводит к исчезновению пляжей, и неправильного выбора мест для сброса отходов при дноуглубительных работах в гаванях, при котором возможен возврат отвалного грунта обратно в углубленный канал.

179. Поскольку применение радиоиндикаторов и закрытых источников для отслеживания и контроля отложений сулит огромные экологические, экономические и социальные выгоды, Агентство содействует передаче технологий и организует для своих государств-членов обучение этим методам.

180. В управлении природными экосистемами сегодня повсеместно используется моделирование методом вычислительной гидрогазодинамики (гидродинамическое моделирование), которое обретает все большую популярность как средство изучения переноса, трансформации и поведения различных частиц и загрязняющих веществ. Радиоиндикаторные методы зачастую применяются для проверки гидродинамических моделей с целью укрепления доверия к их прогностической ценности. Экспериментальное отслеживание и численное моделирование – взаимодополняющие методы изучения сложных систем. Получаемые при помощи индикаторов данные – результат непосредственного наблюдения, однако они относятся лишь к меченому элементу системы и ограничены конкретными пространственно-временными рамками. Численные же модели теоретически могут охватывать все важные параметры, но при этом ограничены основными допущениями и доступными вычислительными мощностями. По отдельности оба подхода имеют свои недостатки, однако в совокупности представляют собой крайне эффективный метод исследования сложных систем. В последние годы стало очевидно, что синергическое применение моделирования и полевых радиоиндикаторных исследований может в значительной мере способствовать решению комплексных проблем в природных системах.

D.2. Применение радиационных технологий для разработки экологичной продукции и производственных процессов

181. В различных отраслях промышленности прилагаются серьезные усилия к снижению ущерба для окружающей среды путем производства более технологичной продукции с низкими показателями энергопотребления. Методы радиационной обработки успешно используются при разработке инновационной экологичной продукции и производственных процессов. В настоящем разделе речь пойдет об использовании таких новых, обработанных излучением изделий, как радиационно-синтезированные наноматериалы различных форм и размеров (наночастицы, нановолокна, нанопоры) для создания активной упаковки продуктов питания и раневых перевязочных материалов, а также для доставки лекарственных препаратов. Стремление использовать для изготовления подобной продукции излучение низкоэнергетических электронных пучков обусловлено, прежде всего, опасениями по поводу загрязнения окружающей среды химическими веществами, традиционно применяемыми при нанесении покрытий и отверждении материалов.

D.2.1. Конструирование наноразмерных материалов с помощью облучения

182. Эффективным средством синтеза и/или модификации наноматериалов является инициирование реакций (полимеризации, сшивания, управляемой деструкции и прививки) под воздействием облучения: данный метод позволяет придавать материалам новые свойства при любой температуре, при этом не используются токсичные добавки и не образуются токсичные остатки, последующее удаление которых представляет собой кропотливый и дорогостоящий процесс. Такой метод особенно востребован для изделий, используемых в медицине. Кроме того, в качестве сырья для подобных материалов могут быть использованы отходы: углеродные нанотрубки, например, успешно изготавливаются из выброшенных полиэтиленовых пакетов.

D.2.1.1. Медицинские применения

183. Достижения в создании наночастиц для конкретных целей позволили получить ряд пользующихся большим спросом продуктов, которые находят широкое применение в здравоохранении. Для применения в медицине разработаны многочисленные наносистемы – квантовые точки, органические и неорганические наносферы, дендримеры, липосомы и полимерные наночастицы. Уникальными преимуществами обладают наногели – сшитые друг с другом наноразмерные полимерные сетки: они имеют гибкую структуру, большую площадь поверхности с несколькими участками сопряжения, внутреннее пространство или полости для переноса лекарственных препаратов, высвобождаемых в ответ на определенное стимулирующее воздействие, и могут поглощаться клетками человеческого организма. Радиационный синтез подобных наногелей был впервые опробован в Польше, и впоследствии данный метод был быстро взят на вооружение исследователями во всем мире, в том числе в Аргентине, Бразилии, Италии, Таиланде и Турции. Для изготовления таких наногелей могут использоваться синтетические или природные полимеры, а также биомолекулы, включая белки и пептиды. Наночастицы не только используют для борьбы с различными заболеваниями в качестве средств доставки определенного объема лекарственного вещества с его высвобождением в конкретной части организма, но и инкорпорируют в структуру раневого перевязочного материала для ускорения процесса заживления и предотвращения инфицирования. Для конструирования нанопористых полимерных мембран, которые могут быть подвергнуты дальнейшей функционализации для получения мембран, способных избирательно фильтровать и изолировать различные биомолекулы, успешно применяется метод управляемой радиационной деструкции.

D.2.1.2 Усовершенствованные материалы для покрытий и упаковки продуктов питания

184. Согласно результатам одного из проведенных недавно опросов, для потребителей первостепенное значение имеют срок хранения, свежесть и качество продуктов питания⁸. Этим требованиям удовлетворяет разрабатываемая в настоящее время "активная" или "умная" упаковка. Так, свою эффективность в продлении срока годности продуктов, не утрачивающих при этом свою свежесть, доказала пленка с превосходными газобарьерными свойствами, способная предотвращать поступление кислорода и выход инертных газов из упаковки. Такая пленка может быть изготовлена путем включения особых наночастиц в структуру обычной

⁸ WASTE AND RESOURCES ACTION PROGRAMME, Consumer Attitudes to Food Waste and Food Packaging, Banbury (2013).

пленки, которая может содержать также ферменты, антибактериальные вещества и другие компоненты, сдерживающие разложение пищевых продуктов и их порчу. Подобную биологически активную упаковку для продуктов изготовили в Египте из ацетилцеллюлозы путем включения в ее структуру наночастиц серебра, а с добавлением оксида графена в пленки из поликапролактона и хитозана была получена упаковка с пониженной проницаемостью для кислорода и водяного пара. Египетские ученые работают также над изготовлением умной упаковки для морепродуктов путем включения полианилиновых нановолокон в структуру пленок из поликапролактона. При взаимодействии с парами разлагающихся морепродуктов такая упаковка меняет свой цвет, доступно сигнализируя о свежести или порче продуктов. В Канаде в упаковку, изготовленную из материалов биологического происхождения, добавляют наноцеллюлозу, как с целью придания ей большей прочности, так и для того, чтобы сделать ее пригодной для дальнейших химических модификаций в зависимости от конкретных применений.

D.2.2. Радиационное отверждение

185. В области печати и нанесения покрытий во всем мире ведется разработка более экологичных процессов с использованием меньшего объема растворителей или полным отказом от них, с тем чтобы избежать загрязнения окружающей среды и попадания разложившихся токсичных побочных продуктов в потребительские товары. Одним из последних нововведений, побудивших производителей упаковок осваивать новые технологии, стала принятая в 2007 году директива Европейской комиссии 2007/19/ЕС (четвертая поправка к директиве 2002/72/ЕС, за которой закрепилось название "пластмассовая директива"): в ней устанавливается предельно допустимое содержание в пищевых продуктах недопустимых веществ, попадающих в продукты из упаковки, – 0,01 мг/кг. Растущие потребности в замене вредных производственных процессов и материалов экологически чистыми в значительной степени обусловили применение в лакокрасочной промышленности новых слаботочных электронных ускорителей с энергией пучка менее 300 кэВ. Использование в покрытиях, красках и клеях отверждаемых излучением мономеров и олигомеров с их последующей полимеризацией и сшивкой исключает применение в целях отверждения летучих органических соединений, что позволяет предприятиям лакокрасочной промышленности и смежных отраслей выполнять требования к чистоте воздуха и добиваться существенного снижения как объемов токсичных атмосферных загрязнителей, выделяющихся в процессе производства, так и уровня содержания токсичных химических веществ в продукции. Помимо данных преимуществ, применение в производственных процессах метода отверждения в потоке электронов позволяет, с одной стороны, экономить электроэнергию и пространство, а с другой – повысить качество и производительность.

186. Расширение использования технологии радиационного отверждения в области печати и нанесения покрытий требует непрерывного совершенствования ускорительной техники, с тем чтобы внедрение электронно-лучевой технологии в промышленных масштабах стало рентабельным. Новейшие разработки нового поколения компактных и простых в эксплуатации излучателей электронного пучка с ускоряющим напряжением в диапазоне от 80 до 200 кВ и шириной участка обработки до 60 см могут способствовать дальнейшему расширению использования этой технологии, открывая возможности создания, оптимизации и непрерывного совершенствования новых продуктов и процессов в широком диапазоне применений, включая отверждение и создание новых материалов методом сшивания.

Е. Достижения в развитии технологий медицинской визуализации

187. Достижения в развитии технологий медицинской визуализации для оценки композиционного состава тела позволяют давать количественную оценку таким параметрам, как жировая масса, сухая масса и минеральная плотность костной ткани, а также масса конкретных органов и тканей, включая жировые отложения, мышцы и внутренние органы. Оценка композиционного состава тела используется в ряде областей – от мониторинга физической формы до оценки состояния болезни и менеджмента рисков. Появляется все больше свидетельств того, что отдельные компоненты композиционного состава тела существенно влияют на риск возникновения хронических болезней, развитие заболевания, реакцию на лечение и результаты с точки зрения здоровья. Этим обусловлен большой интерес к текущей разработке инструментов оценки композиционного состава тела и моделей риска для прогнозирования негативных результатов. В настоящее время для оценки композиционного состава тела широко используются три метода визуализации: двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия (ДРА), количественная компьютерная томография (ККТ) и магнитно-резонансная томография (МРТ).

Е.1. Последние достижения в развитии технологий визуализации для оценки композиционного состава тела

Е.1.1. Композиционный состав тела как показатель здоровья

188. В последние несколько десятилетий на планете угрожающе быстрыми темпами растет число людей с избыточным весом и ожирением. По оценке Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), в мире насчитывается почти два миллиарда взрослых с избыточным весом, из которых более 600 миллионов страдают ожирением, и с 1980 года эта цифра удвоилась⁹. Эти нарушения обмена веществ давно уже достигли масштабов эпидемии как у взрослых, так и у детей. Ожирение напрямую связано с рядом хронических расстройств здоровья, включая диабет, сердечно-сосудистые заболевания, остеоартрит и рак, которые ведут к резкому ухудшению качества жизни и сокращению ее продолжительности. Предполагается, что экономические издержки избыточного веса и ожирения будут удваиваться каждые десять лет и станут причиной резкого увеличения общих затрат на здравоохранение.

189. Большое внимание уделяется наличию доступных средств для оценки рисков ожирения для здоровья. Речь идет главным образом о методах, не связанных с визуализацией, которые недороги и просты в использовании: это методы расчета показателей ожирения на основе различных сочетаний роста и веса, таких как индекс массы тела (ИМТ), индекс формы тела, индекс округлости тела и антропометрические показатели ожирения, такие как охват талии и соотношение окружностей талии и бедер. Однако для выявления причинно-следственных связей между композиционным составом тела и болезнью зачастую необходимо использовать более сложные параметры человеческого организма. Например, хотя ВОЗ и классифицирует избыточный вес и ожирение по ИМТ, в этот критерий не включается информация об относительных объемах жировой и мышечной ткани и он не дает картины распределения ожирения по всему телу, а между тем было доказано, что оба эти параметра независимо друг от

⁹ WHO, Obesity and overweight, Fact sheet N°311, <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs311/en/>, updated January 2015.

друга связаны с метаболическим синдромом. Шагом вперед в количественной оценке композиционного состава тела является использование методов, способных количественно оценить компоненты жировой и сухой массы для всего тела, – биоэлектрического импедансного анализа и респираторной плетизмографии. Этими методами, впрочем, невозможно выделить отдельные тканевые компоненты. На самом деле для подразделения тела на типы тканей и анатомические регионы и изучения связей с болезнью, заболеваемостью и смертностью необходимы двухмерные (2D) и трехмерные (3D) методы визуализации. Для детальной оценки композиционного состава тела во всем мире широко применяются двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия, ККТ и МРТ. В последнее время в практику анализа композиционного состава тела входит такое новое средство, как оптическое 3D-сканирование поверхностей¹⁰.

Е.1.2. Достижения в развитии двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии (ДРА)

190. Двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия является высокоточным методом измерения минеральной плотности костной ткани, костной массы, жировой массы, сухой массы мягких тканей и процентного количества жира. Этот метод обеспечивает одновременное получение изображений на двух различных энергетических уровнях рентгеновского излучения. Сканирование методом ДРА, в основе которого лежат уникальные характеристики ослабления излучения разными типами тканей, используется для расчета величин поверхностной плотности по 2D-изображениям. В моделях ДРА минеральная плотность костной ткани определяется как минеральная масса кости, деленная на расчетную площадь кости, в г/см². Жировая масса – это масса липидов (триглицеридов, фосфолипидных мембран и т.д.), поскольку у всех липидов схожие характеристики ослабления рентгеновского излучения. До недавнего времени методом ДРА нельзя было различать разные типы тканей, такие как кожа, мышцы, печень и подкожные и висцеральные жировые отложения (ПЖО и ВЖО). Во многом это до сих пор так; однако сегодня ПЖО и ВЖО нижнего отдела живота распознаются при помощи специализированного алгоритма оценки. Кроме того, было доказано, что показатель содержания железа в печени, измеряемый методом ДРА, строго соответствует эталонным значениям¹¹. Типичный протокол ДРА показан на рис. Е-1.

¹⁰ LEE, S.Y., GALLAGHER, D., Assessment methods in human body composition, *Curr. Opin. Clin. Nutr. Metab. Care* **11** (2008) 566–572.

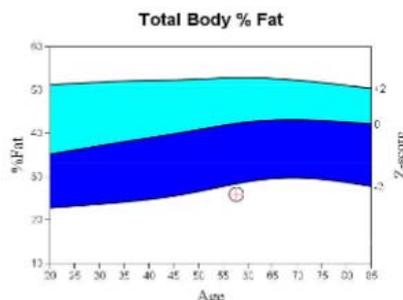
¹¹ SHEPHERD, J.A., et al., Dual-energy X-ray absorptiometry with serum ferritin predicts liver iron concentration and changes in concentration better than ferritin alone, *J. Clin. Densitom.* + 13 2010 399 -406

HOLOGIC TEST
4776 S W 8TH Street
Bedford, MA 01730

Telephone: 781-999-7300

Fax: 781-260-0671

Name: sample, patient	Sex: Female	Height: 54.0 in
Patient ID: 987654	Ethnicity: White	Weight: 140.0 lb
DOB: February 13, 1957	Menopause Age: 50	Age: 57



Source: 2008 NHANES White Female

World Health Organization Body Mass Index Classification
BMI = 33.8 WHO Classification Obesity I



BMI has some limitations and an actual diagnosis of overweight or obesity should be made by a health professional. Obesity is associated with heart disease, certain types of cancer, type 2 diabetes, and other health risks. The higher a person's BMI is above 25, the greater their weight-related risks.

Body Composition Results

Region	Fat	Lean +	Total	% Fat	% Fat Percentile	
	Mass (g)	BMC (g)	Mass (g)		YN	AM
L Arm	984	2066	3050	32.3	20	5
R Arm	1094	2123	3217	34.0	28	8
Trunk	6750	20123	26874	25.1	20	4
L Leg	2354	7055	9409	25.0	1	1
R Leg	2525	7258	9783	25.8	1	1
Subtotal	13707	38625	52333	26.2	7	1
Head	886	3091	3978	22.3		
Total	14593	41717	56310	25.9	7	1
Android (A)	1119	2853	3972	28.2		
Gynoid (G)	2626	6327	8953	29.3		

Scan Date: October 16, 2014 ID: A10161401
 Scan Type: a Whole Body
 Analysis: October 16, 2014 15:28 Version 13.5.1
 Auto Whole Body Fan Beam
 Operator: mkl
 Model: QDR Workstation (S/N 061263)
 Comment:

Adipose Indices

Measure	Result	Percentile	
		YN	AM
Total Body % Fat	25.9	7	1
Fat Mass/Height ² (kg/m ²)	7.76	37	13
Android/Gynoid Ratio	0.96		
% Fat Trunk/% Fat Legs	0.99	88	70
Trunk/Limb Fat Mass Ratio	0.97	78	47
Est. VAT Mass (g)	145		
Est. VAT Volume (cm ³)	156		
Est. VAT Area (cm ²)	30.0		

Lean Indices

Measure	Result	Percentile	
		YN	AM
Lean/Height ² (kg/m ²)	20.9	97	96
Appen. Lean/Height ² (kg/m ²)	9.21	97	96

Est. VAT = Estimated Visceral Adipose Tissue
 YN = Young Normal
 AM = Age Matched

TBAR1058 - NHANES BCA calibration

HOLOGIC®

РИС. Е-1. Типичный протокол оценки композиционного состава тела, генерируемый системой ДРА "Hologic". Результаты по составу приведены для многих субрегионов, включая руки, ноги и туловище. К числу недавних достижений относится получение расчетных данных о площади, объеме и массе ВЖО нижнего отдела живота, а также ряда других показателей сухой массы, включая индекс массы аппендикулярной ткани (Предоставлено: Hologic)

191. Доза облучения при ДРА крайне мала и сопоставима с дневной дозой фонового излучения (~ 8 мкЗв). Однако если технолог обладает надлежащей квалификацией, то результаты первоначального и повторного исследования хорошо коррелируются друг с другом: коэффициент отклонения значений процентного количества жира при повторном сканировании

одного и того же пациента составляет 1% или меньше^{12,13}. Помимо тела в целом, методом ДРА можно описать компоненты жировой ткани, мягкой мышечной ткани и минеральной плотности кости для анатомических субрегионов, таких как руки, ноги и туловище. Этого нельзя добиться более простыми методами, не связанными с визуализацией (БИА, респираторная плетизмография и т.д.). Тем не менее у ДРА есть свои ограничения. Одно из них состоит в том, что в трехкомпонентной модели нет возможности четко отделить воду от сухой массы функционального протеина. Хотя предположения относительно гидратации и не используются в ДРА напрямую для определения значений композиционного состава тела, изменения в уровне гидратации интерпретируются как изменение массы мышечной ткани. Поскольку в жировых отложениях также содержится около 15% воды по весу, мониторинг изменений в мышечной массе дает нечеткие результаты в том случае, если происходят изменения и в жировых отложениях. Двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия – это специализированный метод визуализации, который обычно не предусмотрен на стандартных рентгеновских аппаратах ввиду необходимости наличия специальных фильтров для пучка и почти идеальной пространственной фиксации ослабления излучения в двух случаях.

192. В клинических испытаниях двухэнергетическая рентгеновская абсорбциометрия применяется шире, чем другие методы оценки композиционного состава тела. Она предполагает меньшую дозу облучения по сравнению с компьютерной томографией (КТ) всего тела и недорого по сравнению с МРТ. Измерения процентного количества жира хорошо коррелируются с результатами, получаемыми при помощи КТ и МРТ ($r > 0.99$)¹⁴, но отличаются большей точностью. В зависимости от модели сканера и размеров пациента время сканирования всего тела варьируется от 3 до 10 минут. В полевых условиях можно без труда производить взаимную калибровку систем ДРА одного и того же производителя и модели, используя стандартные биомиметические тканезквивалентные материалы, такие как стеариновая кислота и вода. Взаимная калибровка систем от разных производителей в настоящее время может производиться только при помощи стандартизирующих уравнений, исключающих системную погрешность. Используя тканезквивалентные материалы в сочетании со стандартизирующими уравнениями, можно собирать воедино данные из разных клинических центров. Наконец, предпринимаются широкомасштабные усилия по сбору репрезентативных проб, характеризующих обмен веществ и состояние питания у населения отдельных стран, включая Национальное обследование здоровья и питания (NHANES) в Соединенных Штатах Америки и K-NHANES в Республике Корея.

Е.1.2.1 Особые регионы, представляющие интерес для ДРА

193. Со времени появления ДРА субрегионами, выделявшимися на сканированных изображениях всего тела для целей описания мягких тканей, были руки, ноги, туловище и голова. Однако в последние годы ведется планомерная работа по анализу особых регионов помимо этих анатомических регионов. При помощи систем двухэнергетической рентгеновской абсорбциометрии можно оценивать висцеральные жировые отложения как область, охватывающую

¹² POWERS, C., FAN, B., BORRUD, L.G., LOOKER, A.C., SHEPHERD, J.A., Long-term precision of dual-energy X-ray absorptiometry body composition measurements and association with their covariates, *J. Clin. Densitom.* **18** (2013).

¹³ TOOMBS, R.J., DUCHER, G., SHEPHERD, J.A., DE SOUZA, M.J., The impact of recent technological advances on the trueness and precision of DXA to assess body composition, *Obesity* **20** (2012) 30–39.

¹⁴ KULLBERG, J., et al., Whole-body adipose tissue analysis: comparison of MRI, CT and dual energy X-ray absorptiometry, *Br. J. Radiol.* **82** (2009) 123–130.

различные слои, либо как объем ткани^{15,16}. Эти оценки ВЖО производятся путем вычитания расчетного объема перекрывающего подкожного жира из общего объема жира в организме. Корреляция между измерениями ВЖО методами ДРА и КТ крайне высока ($r > 0,90$).

Е.1.2.2 Сканирование больных ожирением методом ДРА

194. В прошлом сканирование пациентов с избыточным весом на системе ДРА осложнялось из-за ограничений по весу при работе со сканером и размеров стола. Недавно предельно допустимый вес для столов сканера ДРА был увеличен – на некоторых моделях до 227 кг. Существуют также специальные режимы сканирования с несколько увеличенной дозой для больных ожирением. В тех случаях, когда поместить тучного пациента в зону сканирования затруднительно, могут использоваться протоколы "полусканирования" или "зеркального" анализа с горизонтальным смещением позиции пациента на столе. После этого композиционный состав руки или ноги, не поместившейся на столе, оценивается по соответствующей конечности, которая была сканирована полностью.

195. Принципиально важное значение для получения точных данных о композиционном составе тела имеет качество сканирования, анализа и интерпретации результатов. Сегодня тканеэквивалентные материалы, специально созданные для проверки калибровки систем ДРА, имеются в свободной продаже. Эти материалы используются для продольной коррекции калибровки и проведения взаимной калибровки систем аналогичного типа. Однако ни один из материалов, созданных на сегодняшний день, не доказал свою пригодность для взаимной калибровки систем разных производителей и моделей.

Е.1.3. Достижения в количественной компьютерной томографии и магнитно-резонансной визуализации

196. Метод 3D-визуализации необходим, когда требуются данные о составе или объеме органа вне зависимости от окружающих его тканей. Компьютерная томография и МРВ являются распространенными клинически доступными методами, с помощью которых можно получать изолированные изображения органов например, отдельных мышц, сердца, мозга, печени и т.д. Изолирование органов от окружающих тканей происходит послойно во всем теле. Основные ограничения МРВ и КТ – это ограниченная доступность в районах с недостаточными ресурсами, высокая стоимость по сравнению с другими методами и в случае КТ значительные дозы облучения пациентов. Вместе с тем полномасштабные клинические системы позволяют сканировать любую часть тела и могут использоваться применительно к широкому спектру размеров тела. Количественная оценка жира и мышечной ткани может выполняться с использованием нескольких методов, включая абсорбциометрию (КТ), режим насыщения (МРТ) или сегментацию тканей (КТ и МРВ).

197. Компьютерная томография представляет собой передовой метод исследования локализованных специфических жировых отложений. Его наиболее распространенное применение в исследованиях по оценке композиционного состава тела заключается в количественном определении подкожного, висцерального и печеночного жира. Точность прогнозирования содержания висцерального жира и общей жировой массы в брюшной полости, обеспечиваемая КТ, является очень высокой. Воспроизводимость метода также характеризуется как отличная – при повторных измерениях вариабельность составляет <1%.

¹⁵ MICKLESFIELD, L.K., GOEDECKE, J.H., PUNYANITYA, M., WILSON, K.E., KELLY, T.L., Dual-energy X-ray performs as well as clinical computed tomography for the measurement of visceral fat, *Obesity* **20** (2012) 1109-1114.

¹⁶ KAUL, S., et al., Dual-energy X-ray absorptiometry for quantification of visceral fat, *Obesity* **20** (2012) 1313–1318.

198. В исследованиях на взрослых КТ является предпочтительной методикой ввиду быстроты проведения процедур, доступности метода и простоты выполнения протоколов и анализа результатов сканирования. Компьютерная томография также калибруется по нормированным абсолютным значениям ослабления. Магнитно-резонансная визуализация является предпочтительным методом исследований детей и подростков, при проведении которых фактор дозы имеет важное значение¹⁷. Недавно несколько компаний продемонстрировали и предложили к применению сложные алгоритмы автоматизированного сегментационного анализа МРВ-сканов всего тела¹⁸. Пример такого применения представлен на рис. Е-2. МРВ-сканы, показанные на этом рисунке, были получены в течение менее чем 10 минут с использованием трехточечного протокола сканирования Диксона (с разделением сигналов от жира и воды) и содержат цветные сегментированные изображения всех основных мышечных групп, висцерального жира и подкожных жировых отложений. Этот метод позволяет определять объемы органов, водную составляющую и количество жировой ткани.

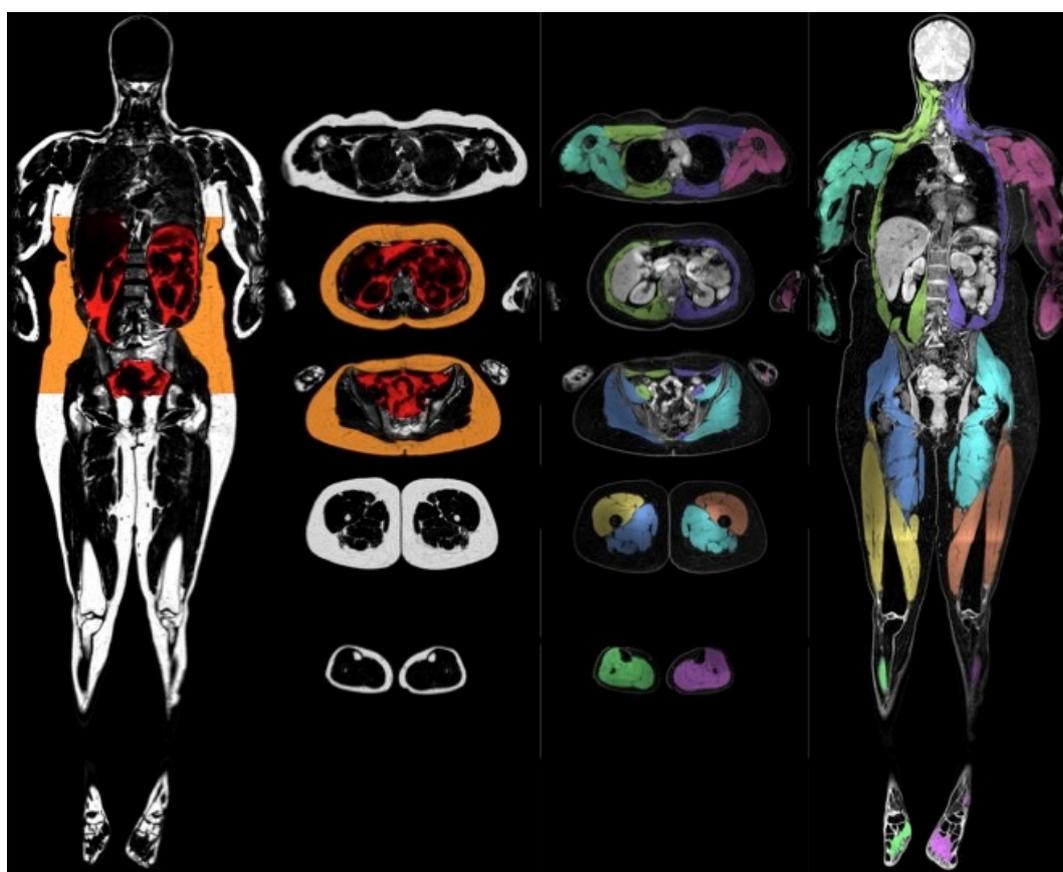


РИС. Е-2. Пример автоматизированной сегментации МРВ-сканов с представлением МРВ-изображений только жировой ткани (слева) и только водной составляющей (справа). Брюшная подкожная жировая ткань (SAT) и висцеральная жировая ткань (VAT) отмечены, соответственно, оранжевым и красным цветом и наложены на изображение только жира. Десять основных мышечных групп, окрашенные разным цветом, наложены на изображение только воды. Сегментация была произведена автоматически. Для получения изображения всего тела потребовалось шесть минут (Предоставлено: Olof Dahlqvist Leinhard, Linköping University, Sweden)

¹⁷ OWENS, S., et al., Visceral adipose tissue and cardiovascular risk factors in obese children, *J. Pediatr.* **133** (1998) 41–45.

¹⁸ KARLSSON, A., et al., Automatic and quantitative assessment of regional muscle volume by multi-atlas segmentation using whole-body water–fat MRI, *J. Magn. Reson. Imaging* **41** (2015) 1558–1569.

Е.1.4. Новейшие технологии: двух- и трехмерные (2D- и 3D-) системы сканирования поверхностей всего тела

199. Форма тела уже давно используется как индикатор здоровья. Для этой цели широко используются измерения охвата талии и соотношения окружностей талии и бедер. Кроме того, хорошо развитую мускулатуру или ожирение легко замечают даже случайные наблюдатели. Недавно в качестве новых платформ были предложены двух- и трехмерные (2D- и 3D-) системы сканирования поверхностей всего тела для оценки состава тела. Благодаря своей хорошей доступности, низкой стоимости и большому объему данных по регионам тела эти системы могут быть эффективными инструментами оценки регионального состава тела.

200. Двухмерные измерения формы тела могут быть выполнены с использованием стандартного цифрового фотоаппарата. Недавно было показано, как индексы жировой и безжировой массы тела могут быть определены на базе простых силуэтов всего тела¹⁹. Такие силуэтные изображения можно легко получать с помощью обычных камер, подобных камерам, встроенным в мобильные телефоны, и, таким образом, оптические 2D-измерения состава тела могут с успехом использоваться в широком диапазоне полевых применений. Трехмерные сканеры поверхностей и прилагаемые к ним алгоритмы обработки изображений обеспечивают быстрое, неинвазивное и масштабируемое решение задач измерения формы тела. Было показано, что измерения с использованием 3D-сканеров поверхностей характеризуются очень высокой точностью. Современные алгоритмы сканирования позволяют автоматически обрабатывать свыше 400 измерений длины, площади и объема при сканирование всего тела.

201. Недавно было показано, что региональные измерения объема и длины, выполненные с применением восьмиканерного 3D-сканера поверхностей со структурированным освещением, могут использоваться для точного прогнозирования на основе измерений состава тела, полученных методом ДРА²⁰. Пример совмещенных ДРА- и 3D-сканов поверхности представлен на рис. Е-3. Для прогнозирования величины жировой массы и процентного содержания жировой ткани во всем теле, а также в андройдных, гиноидных, туловищных и ножных субрегионах использовались различные 3D-измерения региональных объемов органов и глубины ($R^2 = 0,95$ и $0,89$, соответственно). Однако необходимо провести дополнительные валидационные исследования с использованием референтных методов (ДРА и изотопное разбавление).

¹⁹ XIE, B., et al., Accurate body composition measures from whole-body silhouettes, *Med. Phys.* **42** (2015) 4668-4677.

²⁰ LEE, J.J., FREELAND-GRAVES, J.H., PEPPER, M.R., YU, W., XU, B., Efficacy of thigh volume ratios assessed via stereovision body imaging as a predictor of visceral adipose tissue measured by magnetic resonance imaging, *Am. J. Human Biol.* **27** (2015) 445-457.

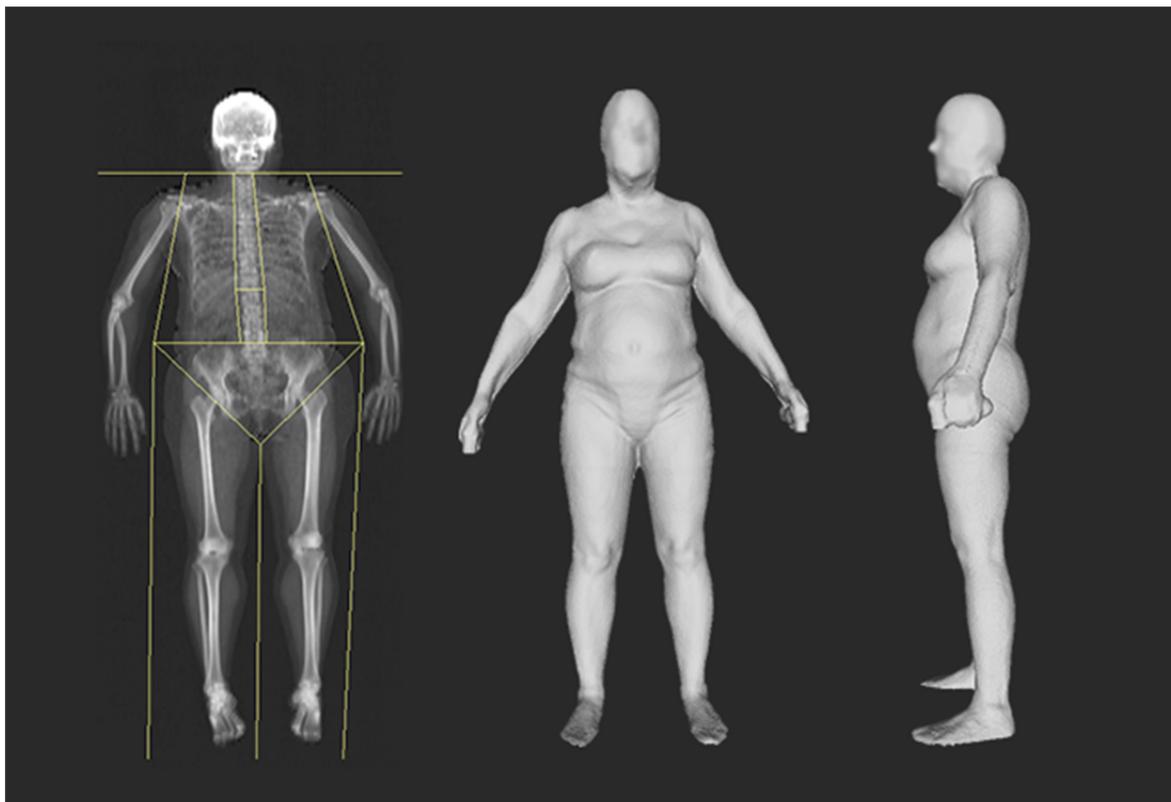


РИС. Е-3. ДРА-скан всего тела (слева), совмещенный с 3D-изображением, полученным в результате оптического сканирования поверхностей, представленный в корональной (в центре) и сагиттальной (справа) проекциях. Данные измерений формы тела, полученные на основании 3D-сканов поверхностей, таких как ширина и глубина торса, а также региональные объемы ног и туловища, могут использоваться для точной оценки состава тела с разделением на жировую и тощую безжировую массу с применением метода ДРА (Предоставлено: J.A. Shepherd, University of California, San Francisco, USA)

202. Помимо проведения точных оценок состава тела 3D-сканеры поверхностей тела могут использоваться для выполнения измерений ряда других клинически значимых параметров. В их число входят прямые измерения, например, окружности талии, а также простые производные индексы, такие как соотношение окружностей талии и бедер и соотношение окружности талии и роста. Эти сканеры обеспечивают применение наиболее доступного метода прямого измерения площади поверхностей тела. Данный метод является также наиболее удобным инструментом измерения региональных объемов, пригодных для использования в расчетах соотношения объемов ног и туловища – параметра, который, как было показано, можно считать значительным фактором риска развития диабета, гипертонии, метаболического синдрома и смертности²¹.

²¹ WILSON, J.P., KANAYA, A.M., FAN, B., SHEPHERD, J.A., Ratio of trunk to leg volume as a new body shape metric for diabetes and mortality, PLoS One 8 7 (2013).

Г. Комплексное применение радиационных, генетических и симбионтных методов борьбы с комарами – переносчиками болезней

Г.1. Комары и болезни, переносчиками которых они являются

203. Болезни, переносимые комарами, создают серьезную угрозу для здоровья и благосостояния человека. Комары рода *Anopheles* (рис. F-1) являются переносчиками малярии – болезни, от которой умирает свыше 600 000 человек в год, и комары рода *Aedine*, в частности *Aedes aegypti* и *Aedes albopictus* – это переносчики таких заболеваний, как лихорадка денге, которая представляет собой угрозу для свыше 2,5 миллиарда человек в более чем 100 странах²². Многие передаваемые комарами болезни в последние годы получили распространение в районах, где они ранее не обитали; в особенности это относится к болезням, переносчиками которых являются отличающиеся высокой инвазивностью комары *Aedes albopictus*.



РИС. F-1. Самка комара Anopheles arabiensis, питающаяся кровью

204. Лечение малярии может проводиться с применением химиотерапии, например с помощью препаратов артемизинин, разработчик которых стал совместно с другими учеными лауреатом Нобелевской премии 2015 года в области медицины²³. Пока еще не разработаны вакцины против вирусов, вызывающих лихорадку чикунгунья, денге или недавно появившейся лихорадки Зика, и использование противовирусных препаратов не отличается высокой эффективностью. Поэтому борьба с переносчиками необходима для снижения бремени этих болезней, и эта деятельность в настоящее время осуществляется главным образом посредством применения обработанных инсектицидами материалов и опрыскивания поверхностей внутри помещений, а также использования ларвицидов.

²² WORLD HEALTH ORGANIZATION, Vector-borne diseases, Factsheet No. 387, WHO, Geneva (2014).

²³ CALLAWAY, E., CYRANOSKI, D., Anti-parasite drugs sweep Nobel prize in medicine 2015, Nature **526** (2015) 174–175.

205. Всемирная организация здравоохранения признает, что необходимо срочно разработать дополнительные методы борьбы с комарами, так как на результаты деятельности в этой области оказывают отрицательное действие такие факторы, как отсутствие стабильных ресурсов, растущая резистентность к доступным средствам и изменения, происходящие в поведении комаров-переносчиков, которые осложняют целенаправленную борьбу с ними. Одним из перспективных дополнительных методов является метод стерильных насекомых (МСН), который можно интегрировать с другими методами борьбы с целью эффективного подавления популяций комаров²⁴.

Г.2. Метод стерильных насекомых в качестве инструмента борьбы с популяциями комаров

Г.2.1. Разработка метода стерильных насекомых для использования в борьбе с комарами

206. В течение последних десяти лет достигнут значительный прогресс в разработке "пакета МСН" для четырех видов комаров – переносчиков болезней (*Anopheles arabiensis*, *Anopheles gambiae*, *Aedes aegypti* и *Aedes albopictus*). Этот пакет включает в себя оборудование для массового разведения насекомых, рационы искусственного питания, методы стерилизации с помощью гамма- и рентгеновского излучения, методы контроля качества и стандартные рабочие процедуры (СРП) для проведения технико-экономических обоснований использования МСН для регулирования популяций комаров. В настоящее время предлагается универсальный рацион питания для личинок комаров *Anopheles* и *Aedes*, состоящий из широко и легко доступных ингредиентов^{25,26}. Благодаря использованию этого жидкого питания личинок и соответствующих СРП массовое выращивание личинок комаров *Anopheles* и *Aedes* можно эффективно осуществлять в больших лотках, вставляемых в наклоняемую этажерочную стойку новой конструкции^{27,28} (рис. F-2). Клетки-садки сконструированы с расчетом на облегчение процессов кормления кровью, подачи сахара, сбора яиц и чистки²⁹. Помимо кормушки с 10%-ным сахарным сиропом для кормления *ad libitum* используется модифицированная мембранная система Hemotek для кровяного кормления самок комаров и вода на дне садка для откладки яиц³⁰. Яйца собираются путем промывки дна садка, затем они подсушиваются и их количество достоверно определяется с целью обеспечения предсказуемой личиночной плотности при культивировании в лотках в следующем цикле производства (рис. F-3).

²⁴ LEES, R.S., GILLES, J.R.L., HENDRICH, J., VREYSEN, M.J.B., BOURTZIS, K., Back to the future: The sterile insect technique against mosquito disease vectors, *Curr. Op. Inse. Sci.* **10** (2015) 156-162.

²⁵ DAMIENS, D., BENEDICT, M.Q., WILLE, M., GILLES, J.R., An inexpensive and effective larval diet for *Anopheles arabiensis* (Diptera: Culicidae): Eat like a horse, a bird, or a fish? *J. Med. Entomol.* **49** (2012) 1001–1011.

²⁶ PUGGIOLI, A., et al., Efficiency of three diets for larval development in mass rearing *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae), *J. Med. Entomol.* **50** (2013) 819–825.

²⁷ BALESTRINO, F., BENEDICT, M.Q., GILLES, J.R., A new larval tray and rack system for improved mosquito mass rearing, *J. Med. Entomol.* **49** (2012) 595–605.

²⁸ BALESTRINO, F., PUGGIOLI, A., GILLES, J.R., BELLINI, R., Validation of a new larval rearing unit for *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae) *Mass Rearing, PLoS One* **19** (2014).

²⁹ BALESTRINO, F., PUGGIOLI, A., BELLINI, R., PETRIC D., GILLES, J.R., Mass production cage for *Aedes albopictus* (Diptera: Culicidae), *J. Med. Entomol.* **51** (2014) 155–163.

³⁰ DAMIENS, D., et al., Different blood and sugar feeding regimes affect the productivity of *Anopheles arabiensis* colonies (Diptera: Culicidae), *J. Med. Entomol.* **50** (2013) 336-343.

Комаров-самцов можно подвергать стерилизации на поздней стадии развития куколки до вылупления и вылета с помощью гамма- или рентгеновских облучательных установок (рис. F-4). С целью выбора оптимальной дозы, обеспечивающей адекватную стерильность и позволяющей при этом искусственно разведенным самцам эффективно конкурировать с дикими самцами, были построены кривые "доза-реакция" для одного из наиболее важных целевых видов комаров – *Anopheles arabiensis*^{31,32}.



РИС. F-2. Жидкое личиночное питание, лотки и стойка, разработанные для массового культивирования комаров на личиночной стадии. (Фото: МАГАТЭ)

³¹ NDO, C., et al., X-ray sterilization of the *An. arabiensis* genetic sexing strain 'ANO IPCL1' at pupal and adult stages, *Acta Trop.* **131** (2014) 124–128.

³² YAMADA, H., VREYSEN, M.J., GILLES, J.R., MUNHENGA, G., DAMIENS, D.D., The effects of genetic manipulation, dieldrin treatment and irradiation on the mating competitiveness of male *Anopheles arabiensis* in field cages, *Malar. J.* **13** (2014) 318.

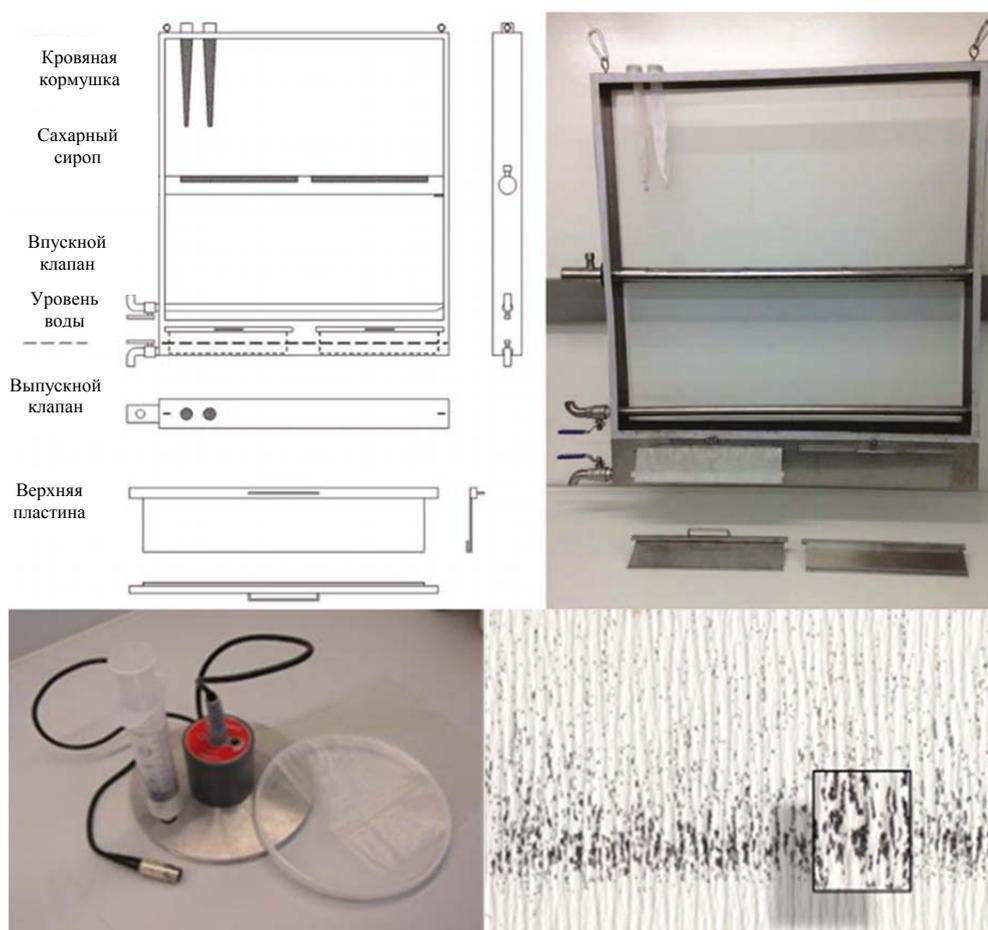


РИС. F-3. Клетка-садок для массового разведения взрослых комаров *Aedes*, устройство для кровяного кормления и яйца, собранные на фильтровальной бумаге. (Фото: МАГАТЭ)



РИС. F-4. Гамма- (слева) и рентгеновский (справа) облучатели, используемые для стерилизации комаров-самцов. (Фото: МАГАТЭ)

207. Ввиду того, что комары-самцы подвергаются воздействию стресс-факторов во время нескольких процессов, в том числе массового разведения, стерилизации, перевозки и выпуска в природную среду, серьезной проблемой является обеспечение хорошего качества насекомых. В дополнение к определению на этапе производства контрольных параметров качества для оценки качества насекомых проводятся также исследования конкурентоспособности в полуполевых условиях. В полевых инсектариях имитируются полуполевого условия, и

обеспечивается хорошая суррогатная замена природной среды для проведения таких экспериментов, а также поведенческих исследований, включая исследования по роению и совместимости при спаривании. Полевые инсектарии используются для проверки того, как различные соотношения стерильных и диких самцов и возраст стерильных самцов влияют на успех спаривания. Предварительные данные, полученные по *Anopheles arabiensis* в Судане, *Anopheles gambiae* в Буркина-Фасо и *Aedes albopictus* в Китае и Италии, способствовали улучшению производственных процессов и, таким образом, повышению конкурентоспособности стерильных самцов, что является решающим фактором в успешном осуществлении программы комплексной борьбы с сельскохозяйственными вредителями в масштабах района, в которой предусматривается применение МСН.

F.2.2. Дополнительные технологические требования

208. При применении МСН для борьбы с комарами, как и в случае с другими биологическими методами, исключительно важно выпускать в природную среду только комаров-самцов, так как переносчиками болезней являются исключительно самки, а самцы не наносят людям укусы для высасывания крови и, следовательно, не передают болезни. Разделение по признаку пола на основе полового диморфизма комаров *Aedes*^{33,34} или использования кровяного корма с добавками таких веществ, как ивермектин, которые являются токсичными для самок *Anopheles arabiensis*³⁵, с целью выбраковки самок в процессе производственного разведения насекомых возможно лишь в небольшом масштабе. Главная задача, которую необходимо решить, заключается в получении эффективных и устойчивых линий с генетическим определением пола с целью простого и надежного отделения самок комаров при разведении насекомых в массовом масштабе³⁶. Несколько лет назад была создана линия с генетическим определением пола вида *Anopheles arabiensis* на основе характеризующей устойчивостью к инсектицидам мутации (при которой в результате обработки дильдрином погибают все комары-самки, но не обладающие резистентностью самцы), и недавно была произведена оценка ее потенциального применения для полевых выпусков. Было выяснено, что эта линия характеризуется низкой продуктивностью и генетической нестабильностью, и взрослые самцы, вылупившиеся из яиц, обработанных дильдрином, как было установлено, имели небольшое остаточное количество инсектицида. В результате эта линия не была рекомендована для крупномасштабного применения³⁷. В настоящее время продолжается работа по выявлению новых морфологических или условно летальных маркеров у *Anopheles arabiensis*, а также *Aedes albopictus* и *Aedes Aegypti* в целях получения эффективных линий с генетическим определением пола.

209. В дополнение к разработке пакета МСН для борьбы с комарами необходимо расширить применение предлагаемых технологий до оперативного уровня. В крупномасштабном применении МСН для ликвидации других насекомых-вредителей по-прежнему выявляются

³³ FOCKS, D.A., An improved separator for the developmental stages, sexes, and species of mosquitoes (Diptera: Culicidae), *J. Med. Entomol.* **17** (1980) 567–568.

³⁴ CARVALHO, D.O., et al., Mass production of genetically modified *Aedes aegypti* for field releases in Brazil, *J. Vis. Exp.* **83** (2014) 3579.

³⁵ YAMADA, H., SOLIBAN, S.M., VREYSEN, M.J., CHADEE, D.D., GILLES, J.R., Eliminating female *Anopheles arabiensis* by spiking blood meals with toxicants as a sex separation method in the context of the sterile insect technique, *Parasit. Vectors* **6** (2013) 197.

³⁶ GILLES, J.R., et al., Towards mosquito sterile insect technique programmes: exploring genetic, molecular, mechanical and behavioural methods of sex separation in mosquitoes, *Acta Trop.* **132** Suppl (2014) S178–S187.

³⁷ YAMADA, H., et al., The *Anopheles arabiensis* genetic sexing strain ANO IPCL1 and its application potential for the sterile insect technique in integrated vector management programmes, *Acta Trop.* **142** (2015) 138–144.

области, в которых новые технологии могут привести к дальнейшему повышению эффективности и, таким образом, к осуществлению более успешных программ борьбы с насекомыми. Основные вопросы, которые необходимо решить, включают операции перемещения, транспортировку в целевой район и реальный выпуск стерильных самцов в природную среду, которые должны выполняться без значительных последствий для их выживания или способности к спариванию после выпуска.

Г.3. Взаимодополняющие методы и их интеграция с методом стерильных насекомых для борьбы с популяциями комаров

Г.3.1. Взаимодополняющие генетические подходы к борьбе с комарами

210. В дополнение к МСН было разработано несколько других подходов для целей регулирования популяций комаров-переносчиков. Эти технологические платформы можно подразделить на две группы. Первая группа включает в себя "самоограничивающиеся" подходы, определяемые как методы, действие которых в природной среде не может сохраняться с течением времени. Поэтому для достижения желаемого эффекта подавления популяций необходимы постоянные выпуски насекомых. Все методы подавления популяций, такие, как МСН, трансгенный метод ВНДЛ ("выпуска насекомых с доминантной леталью") и симбионтный метод несовместимых насекомых (МНН), являются примерами подходов с самоограничением. Вторая группа включает в себя "самоподдерживающиеся" подходы, определяемые как "инвазивные" методы, действие которых в природной среде может поддерживаться с течением времени за счет позитивного отбора. Такая методика может применяться для замещения целевой популяции комаров насекомыми, которые не могут передавать болезнь. Были предложены различные методы для достижения этой цели с использованием трансгенных технологий или симбиотических бактерий.

211. Трансгенный метод ВНДЛ основан на использовании генетической системы с носителем летального гена³⁸. Гомозиготные линии, являющиеся носителем системы для ВНДЛ, можно культивировать в лаборатории только в присутствии репрессора, которым обычно является антибиотик тетрациклин. Отсутствие этого репрессора ведет к гибели потомства. На острове Большой Кайман, в Бразилии и Панаме была проведена оценка линии OX513A *Aedes aegypti* с данной генной кассетой в ходе экспериментов по подавлению численности насекомых. Как мужское, так и женское потомство, получаемое от спаривания выпущенных в природную среду самцов OX513A с дикими самками, наследует одну копию летальной генной кассеты и погибает на ранней стадии куколки. Были проведены маломасштабные эксперименты по подавлению численности с последовательными выпусками трансгенных самцов, и уровень подавления, согласно сообщениям, достиг в среднем 70-80%^{39,40}. Проблемы, связанные с этим подходом, включают отсутствие эффективной и надежной системы определения пола, которая абсолютно необходима для исключения вероятности выпуска передающих патогены самок, возможность эволюции резистентности в условиях массового разведения, а также вопросы, связанные с правами интеллектуальной собственности, негативным отношением общества в некоторых районах и разрешительными процедурами.

³⁸ ALPHEY, L., Genetic control of mosquitoes, *An. Rev. Entomol.* **59** (2014) 205–224.

³⁹ CARVALHO, D.O., et al., Suppression of a field population of *Aedes aegypti* in Brazil by sustained release of transgenic male mosquitoes, *PLoS Negl. Trop. Dis.* **9** (2015).

⁴⁰ HARRIS, A.F., et al., Successful suppression of a field mosquito population by sustained release of engineered male mosquitoes, *Nat. Biotech.* **30** (2012) 828-830.

Ф.3.2. Симбионтные подходы

212. Другие два метода – МНН и метод замещения популяции основаны на использовании бактерий *Wolbachia*, которые представляют собой род симбиотических бактерий, наследуемых по материнской линии. Это связано с индукцией ряда репродуктивных патологий, наиболее распространенной из которых является цитоплазматическая несовместимость, в своей простейшей форме выражающаяся как эмбриональная летальность при скрещивании инфицированных самцов с неинфицированными самками⁴¹.

213. Данный симбионт использовалась как средство подавления (МНН) или замещения популяций основных видов комаров – переносчиков болезней. Технология подавления популяции, основанная на МНН, была протестирована путем проведения небольших экспериментальных исследований применительно к борьбе с *Culex pipiens*, *Culex pipiens quinquefasciatus*, *Aedes polynesiensis* и *Aedes albopictus*^{42,43}. Основной проблемой в этом подходе является то, что необходимо также иметь идеальную систему определения пола, которая в настоящее время отсутствует, для исключения риска выпуска в природные условия фертильных передающих патогены самок. Некоторые линии *Wolbachia* способны также блокировать передачу основных патогенов человека, в том числе плазмодия, денге и чикунгунья⁴⁴. Выпуски линии *Aedes aegypti*, трансинфицированной штаммом wMel бактерий *Wolbachia*, с сильной экспрессией цитоплазматической несовместимости, которая также обеспечивает защиту от лихорадки денге, были использованы для замещения неинфицированных популяций в районе города Кэрнс, шт. Квинсленд, Австралия. Однако инфекция wMel оказывает негативное воздействие на плодовитость и личиночное производство, и частота инфицирования в целом не достигает 100%, что дает основание предположить, что wMel-инфицированные комары *Aedes aegypti* могут не обеспечивать быструю инвазию в смежные популяции⁴⁵. Дополнительные проблемы, связанные с устойчивостью и биозащищенностью стратегии замещения популяций, включают потенциальную эволюцию резистентности или то, что блокирование патогена может быть частичным или даже отсутствовать в некоторых симбиотических ассоциациях. В действительности бактерии *Wolbachia* могут усиливать инфицирование другими патогенами, в том числе арбовирусами⁴⁶.

Ф.3.3. Дополнительные требования для успешного применения методов генетического контроля

214. Крупномасштабное применение любой программы подавления популяций насекомых (МСН, трансгенные или на симбионтные методы) в очень большой степени зависит от наличия эффективных и надежных методов разделения по признаку пола, так как выпускаемые самки

⁴¹ WERREN, J.H., BALDO, L., CLARK, M.E., *Wolbachia*: master manipulators of invertebrate biology, *Nat. Rev. Microbiol.* **6** (2008) 741–751.

⁴² LAVEN, H., Eradication of *Culex pipiens fatigans* through cytoplasmic incompatibility, *Nature* **216** (1967) 383-384.

⁴³ LEES, R.S., GILLES, J.R.L., HENDRICH, J., VREYSEN, M.J.B., BOURTZIS, K., Back to the future: The sterile insect technique against mosquito disease vectors, *Curr. Op. Inse. Sci.* **10** (2015) 156–162.

⁴⁴ MOREIRA, L.A., et al., A *Wolbachia* symbiont in *Aedes aegypti* limits infection with dengue, Chikungunya, and Plasmodium, *Cell* **139** (2009) 1268–1278.

⁴⁵ HOFFMAN, A.A., et al., Stability of the wMel *Wolbachia* infection following invasion into *Aedes aegypti* populations, *PLoS Negl. Trop. Dis.* **8** (2014).

⁴⁶ DODSON, B.L., et al., *Wolbachia* enhances West Nile virus (WNV) infection in the mosquito *Culex tarsalis*, *PLoS Negl. Trop. Dis.* **8** (2014).

будут создавать значительный риск распространения патогенов. При отсутствии эффективного метода разделения по признаку пола для реализации безопасной и эффективной стратегии требуется объединение МСН и симбионтных подходов, направленное на борьбу с комарами – переносчиками болезней. Проверка концепции этого комбинированного подхода была выполнена применительно к виду комаров *Aedes albopictus*^{47,48}.

215. При любом методе или сочетании методов, являющихся наиболее эффективными в борьбе с конкретным видом комаров-переносчиков в конкретном районе, для обеспечения успеха мероприятия требуются государственная поддержка и участие общественности. В случае трансгенных подходов это может быть большой проблемой, когда нередко общество проявляет негативное отношение и требуется применение более жестких разрешительных процедур, чем в случае методов, основанных на использовании симбионтов. С другой стороны, МСН легко принимается местным населением и не требует применения разрешительных процедур. При использовании трансгенных штаммов и симбионтных подходов возникают также вопросы, связанные с правами интеллектуальной собственности, которые должны быть решены для применения такого метода на оперативном уровне. Вместе с тем необходимо разрабатывать новые методы, поскольку очевидно, что эволюционные факторы будут стимулировать повышение резистентности у обычных методов борьбы с комарами и в конечном итоге даже у новых трансгенных и основанных на бактериях *Wolbachia* методов защиты от патогенов. В то же время у подхода с применением МСН никакой резистентности возникать не может, так как облучение вызывает доминантные летальные мутации у целевых насекомых случайным образом. Динамический подход к подавлению популяций, объединяющий МСН с другими совместимыми методами в программе борьбы с насекомыми-вредителями в масштабах района, возможно, является единственным способом регулирования численности популяций комаров и потенциальным средством борьбы со многими болезнями, переносчиками которых они являются.

Г. Применение изотопных методов для принятия эффективных мер по сохранению почв

Г.1. Комбинированное применение методов содержащихся в выпадениях радионуклидов и компонентно-специфических стабильных изотопов для принятия эффективных мер по сохранению почв

216. Деградация почв в результате ненадлежащей практики ведения сельского хозяйства приводит к утрате плодородной почвы и потерям урожайности сельскохозяйственных культур и тем самым способствует снижению продовольственной безопасности. Утрата пахотных земель, отложение осадков и загрязнение рек и озер представляют собой также серьезную угрозу для окружающей среды и экономического и социального развития.

⁴⁷ ZHANG, D., ZHENG, X., XI, Z., BOURTZIS, K., GILLES, J.R.L., Combining the sterile insect technique with the incompatible insect technique: I – Impact of *Wolbachia* infection on the fitness of triple- and double-infected strains of *Aedes albopictus*, PLoS One **10** (2015).

⁴⁸ ZHANG, D., LEES, R.S., XI, Z., GILLES, J.R.L., BOURTZIS, K., Combining the sterile insect technique with *Wolbachia*-based approaches: II – A safer approach to *Aedes albopictus* population suppression programmes, designed to minimize the consequences of inadvertent female release, PLoS One **10** (2015a).

217. В сентябре 2015 года на 70-й сессии Генеральной Ассамблеи Организации Объединенных Наций участники инициативы "Экономические аспекты проблемы деградации земель" представили доклад, в котором отмечается, что ежегодные убытки от утраты экосистемных услуг в результате деградации земель составляют до 10,6 трлн долл. США и что деградация земель напрямую сказывается на качестве жизни 1,4 млрд человек во всем мире⁴⁹.

218. Для обеспечения более устойчивого и рационального использования сельскохозяйственных ресурсов крайне необходимы достоверные количественные данные о параметрах и пространственной протяженности процессов перераспределения почвы (эрозии/осадконакопления), а также более полное представление о главных движущих силах этих процессов. Подобные знания помогут определить районы, в которых необходимо принять надлежащие меры по сохранению почв для эффективного сдерживания утраты почв в результате эрозии, и тем самым снизить отрицательное воздействие на социально-экономическое развитие и окружающую среду.

G.1.1. Использование радионуклидов, содержащихся в выпадениях, для количественной оценки скорости эрозии и осадконакопления

219. В оценке эрозии почв и количественном определении степени эффективности стратегий сохранения почв могут помочь радионуклиды, содержащиеся в выпадениях (РНВ), например, цезий-137, источником которого являются проведенные в 1950-1960 годы испытания термоядерного оружия, а также природные геогенные радиоизотопы, например, свинец-210, и космогенные радиоизотопы, такие как бериллий-7.

220. Выпадая на землю вместе с атмосферными осадками, РНВ прочно связываются с мелкими частицами почвы и поэтому служат весьма полезными почвенными индикаторами, которые помогают измерить скорость эрозии почвы и осадконакопления, а впоследствии могут использоваться для оценки эффективности мер по сохранению почв, принимаемых для сдерживания эрозии и, соответственно, для предотвращения вызываемого эрозией чрезмерного осадконакопления. Различия в происхождении и периодах полураспада свинца-210 и цезия-137 могут стать прочной основой для получения данных о характере протекания эрозии почв на уровне большого водосборного бассейна в течение долгосрочного и среднесрочного периодов, соответственно. В то же время изучение РНВ бериллия-7 позволяет также оценить краткосрочные потери от эрозии (см. таблицу G-1). Хотя объектом многих исследований был лишь один РНВ, с помощью двух или даже трех РНВ можно получить более ценную информацию о характере протекания эрозии путем формирования массивов данных по различным временным шкалам⁵⁰.

221. Все более широкое использование РНВ по всему миру для количественной оценки темпов эрозии почв и осадконакоплений в самых разнообразных сельскохозяйственных средах, в масштабе от отдельного поля до бассейна реки, явным образом свидетельствует о пользе и потенциале данных изотопных методов⁵¹.

⁴⁹ ECONOMICS OF LAND DEGRADATION INITIATIVE, The Value of Land: Prosperous Lands and Positive Rewards through Sustainable Land Management, Report, ELD Initiative, Bonn (2015).

⁵⁰ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidelines for Using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil Conservation Strategies, IAEA-TECDOC-1741, IAEA, Vienna (2014).

⁵¹ MABIT, L., et al., Fallout ²¹⁰Pb as a soil and sediment tracer in catchment sediment budget investigations: A review, Earth-Science Reviews **138** (2014) 335–351.

Таблица G-1. Сравнение преимуществ и недостатков цезия-137 (^{137}Cs), свинца-210 (^{210}Pb) и бериллия-7 (^7Be) с точки зрения их использования для количественной оценки перераспределения почвы в результате процессов эрозии и/или осадконакопления⁵².

РНВ	Происхождение	Энергия (кэВ)	Время		Отбор проб	Масштаб	Детектор	Измерения		Определение возраста отложений
			Период полураспада	Охватываемый временной интервал				В лаборатории	На месте	
^{137}Cs	антропогенный	662	30,2 года	50 лет (средн.)†	простой	от участка до большого водосборного бассейна	обычный детектор гамма-излучения из ОЧГ	просто	просто	возможно
^{210}Pb	Природный, гео-генный	46	22,8 года	100 лет (долг.)†	простой	от участка до водосборного бассейна	детектор гамма-излучения из ОЧГ с широким энергетическим диапазоном	сложнее	возможности ограничены, результаты ненадежны	возможно
^7Be	Природный, космогенный	477	53,3 дня	≤ 6 мес. (кратк.)*	пошаговый, с крайне малым приращением глубины	от небольшого участка до поля	обычный детектор гамма-излучения из ОЧГ	просто	более длительное время расчета по сравнению с ^{137}Cs	возможно

G.1.2. Применение компонентно-специфических стабильных изотопов для определения источников отложений

222. Недавно разработанный аналитический метод стабильных изотопов, основанный на изучении сигнатур компонентно-специфических стабильных изотопов (КССИ), ассоциированных с естественными органическими биомаркерами почвы, позволяет различать и определять источники отложений. Следовательно, сигнатуры КССИ, характерные для различных видов землепользования, можно использовать для получения информации в дополнение к той, что была получена с помощью РНВ.

223. Такой подход возможен благодаря тому, что большинство растительных сообществ производит ряд органических соединений, проникающих в почву через корни растений и связывающихся с частицами почвы, и тем самым помечает своими биомаркерами конкретный вид землепользования. Хотя все растения производят похожие биомаркеры, ассоциированная с этими биомаркерами сигнатура стабильного изотопа углерод-13, как правило, различается в зависимости от вида растений. Метод КССИ основан на измерении сигнатуры стабильного изотопа углерод-13, характерной для присутствующей в почве неразветвленной цепи (C14-C24) жирных кислот растительного происхождения. Связывая характерные для того или иного вида землепользования метки КССИ с РНВ, присутствующими в отложениях в зонах их накопления, исследователи получают точный и эффективный метод определения происхождения отложений с целью выявления районов, подверженных эрозии почвы.

224. Методы компонентно-специфических стабильных изотопов и РНВ дополняют друг друга при изучении перераспределения и происхождения почвенных отложений. Радионуклиды, содержащиеся в выпадениях, дают информацию о параметрах перераспределения почвы в

⁵² TAYLOR, A., BLAKE, WH., SMITH, H.G., MABIT, L., KEITH-ROACH, M.J., Assumptions and challenges in the use of fallout beryllium-7 as a soil and sediment tracer in river basins, *Earth-Science Reviews* **126** (2013) 85–95.

рамках сельскохозяйственной системы (или об осадконакоплении в результате ее функционирования), в то время как метки КССИ позволяют получать данные о происхождении этих отложений.

225. Нахождение решений агроэкологических проблем, связанных с эрозией почв и последующим осадконакоплением, - главное условие для успешной борьбы с деградацией почв, а также для смягчения многих прогнозируемых последствий изменения климата. Применение вышеуказанных комплексных изотопных методов позволит фермерским хозяйствам принимать такие конкретные и эффективные меры по снижению рисков, как минимальная обработка почвы, мульчирование, высадка покровных культур, террасирование, контурное земледелие и сооружение невысоких каменных стенок или оград, – все эти меры помогут свести к минимуму снижение плодородия почв, урожайности культур и качества водных ресурсов и образование перемычек из отложений (см. рис. G-1 и G-2).



РИС. G-1. Террасы и контурное земледелие помогают сохранить почву на чайной плантации в провинции Ламдонг, Вьетнам (Фото: МАГАТЭ)



РИС. G-2. Вызванный эрозией перенос отложений из водосборного бассейна к водонепроницаемой перемычке в Шри-Ланке (Фото: МАГАТЭ)