

# НАУКА ЗА РУБЕЖОМ

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ РАЗВИТИЯ НАУКИ РАН

## ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОСЛЕ «ФУКУСИМЫ»: ОЦЕНКИ И ПРОГНОЗЫ

**Наука за рубежом**

№ 26, октябрь–ноябрь 2013

Ежемесячное обозрение

Электронное издание:

[www.issras.ru/global\\_science\\_review](http://www.issras.ru/global_science_review)

Рубрика «**Исследования в области ядерной и квантовой физики**»

Обзор выполнил **Н. А. Трофимов**

Выпускающее подразделение: **Сектор анализа зарубежной науки**

Руководитель проекта **Л. К. Пипия**

Редактор **О. Е. Осипова**

Верстка: **Н. В. Шашкова**

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1. Предупреждение радиоактивных загрязнений, ликвидация последствий катастрофы на АЭС «Фукусима» .....	5
2. Разработки исследовательских и перспективных реакторов .....	8
3. Применение ядерных технологий в других областях науки .....	11
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	14
Рис. 1. Сверхпроводящие корректирующие катушки для ИТЭР в Институте физики плазмы (Китай) .....	14
Рис. 2. Лазер на свободных электронах Fermi .....	14
Рис. 3. Воздействие гамма-излучения на репродуктивную функцию средиземноморской плодовой мушки .....	15

*Атомная энергетика продолжает последовательно развиваться, однако катастрофы, подобные случившейся на АЭС «Фукусима», заставляют многие развитые страны задуматься об оправданности значительных экологических и социальных рисков, связанных с использованием мирного атома. По-прежнему остро стоит вопрос об утилизации отходов атомной энергетике и ремедиации загрязненных экосистем. Кроме того, разработка перспективных и потенциально более надежных ядерных технологий происходит значительно медленнее, чем рост энергетических потребностей развитых и развивающихся стран. В России вопросы захоронения и переработки ядерных отходов особенно актуальны ввиду планов по развитию атомной энергетике и созданию новых исследовательских реакторов, а также в связи с выполнением работ по безопасному сокращению ядерного потенциала после холодной войны.*

## **Введение**

В очередном «Обзоре ядерных технологий» Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) рассмотрены основные направления развития атомной энергетике и исследований в различных областях гражданской науки за 2011 г. [1].

Атомная энергетика продолжает обеспечивать существенную долю глобального производства электроэнергии, несмотря на последствия катастрофы на японской АЭС «Фукусима»<sup>1</sup>. Тем не менее некоторые страны в 2011 г. вывели из эксплуатации ряд АЭС, заявив о намерении полностью отказаться от энергии атома. Например, в Германии были отключены реакторы на восьми самых старых АЭС, в Японии – отключены четыре реактора. Один реактор был выведен из эксплуатации в Великобритании. Таким образом, были закрыты 13 АЭС, что является рекордом с 1990 г., когда подобный эффект наблюдался в атомной энергетике вследствие чернобыльской катастрофы.

---

<sup>1</sup> Всего в мире по итогам 2011 г. насчитывалось 435 действующих реакторов с суммарной мощностью порядка 368 ГВт. В 2011 г. АЭС было произведено около 2518 ТВт·ч электроэнергии, что составило 12,3% глобального производства электроэнергии.

Германия, Бельгия и Швейцария выразили намерение предпринять последовательные меры для полного сворачивания национальной атомной энергетики. На референдуме в Италии было принято решение об отказе от использования атомной энергии как минимум на следующее пятилетие, хотя ранее в стране рассматривался вопрос о возобновлении работы данной отрасли после ее полного сворачивания в 1990 г. О намерении принять новую энергетическую программу, в которой предусмотрен постепенный отказ от энергии атома, в 2011 г. заявил также островной Тайвань.

Суммарное производство электроэнергии атомными электростанциями снизилось по сравнению с предыдущим годом, а прогнозы МАГАТЭ на период до 2030 г. были скорректированы в сторону уменьшения (это на 7–8% ниже показателей аналогичных прогнозов за прошедший год)<sup>2</sup>.

Глобальное производство урана по итогам 2010 г. составило 54 670 т, что на 6% больше аналогичного показателя за предыдущий год. Лидером по производству уранового сырья является Казахстан. За ним следуют Австралия, Канада, Намибия, Нигер, Россия, США и Узбекистан. Обогащение урана осуществляется преимущественно в Канаде, Китае, Франции, России, Великобритании и США. Прогноз роста глобального спроса на урановое топливо скорректирован в сторону увеличения. Предполагается к 2035 г. глобальное потребление урана в энергетике возрастет до 97–137 тыс. т.

### **1. Предупреждение радиоактивных загрязнений, ликвидация последствий катастрофы на АЭС «Фукусима»**

Всего в 2011 г. было выгружено из реакторов около 10 500 т тяжелых металлов, в то время как основные мощности по их промышленной переработке, сосредоточенные в четырех странах (Россия, Франция, Индия и Великобритания), рассчитаны на переработку 4800 т тяжелых металлов в год. Из накопленных к настоящему времени 350 тыс. т тяжелых металлов переработаны менее трети – всего порядка 100 тыс. т.

С 2003 г. в г. Железногорске (Россия) ведется строительство хранилища радиоактивных отходов атомной промышленности. Первая очередь

<sup>2</sup> Согласно обновленным прогнозам МАГАТЭ, к 2030 г. суммарная мощность АЭС в мире вырастет до 746 ГВт.

данного объекта, рассчитанная на 8100 т радиоактивных отходов, была завершена в декабре 2011 г.

В декабре 2010 г. при Международном центре по обогащению урана в г. Ангарске (Россия) был сформирован первый в мире международный запас слабообогащенного урана в объеме 120 т. Финансирование проекта осуществляется правительством России. Официальное открытие хранилища, предназначенного для использования государствами – членами МАГАТЭ, состоялось в феврале 2011 г.

Достигнут прогресс в работе специальной экспертной группы агентства по сокращению ядерного потенциала после холодной войны. К концу 2011 г. в России при активном содействии мирового сообщества были полностью завершены работы по демонтажу и выгрузке ядерного топлива со 196 из 200 списанных атомных подводных лодок. В настоящее время ведется строительство двух хранилищ для отработавшего ядерного топлива. Продвигается работа по извлечению радиоизотопных термоэлектрических генераторов (РТГ). Извлечена большая часть из 1007 РТГ, находящихся в районах вдоль побережья России. По имеющимся данным, предстоит найти и извлечь еще 119 РТГ.

Широкомасштабные проекты по обработке радиоактивных отходов времен холодной войны осуществляются в Канаде (Ядерно-физическая лаборатория в Чок-Ривер), России (производственное объединение «Маяк» и Сибирский химический комбинат) и США (Саванна-Риверская лаборатория). Работы по возведению крупнейшего в мире центра хранения и переработки радиоактивных отходов высокого уровня (Хэнфорд, США) наполовину завершены. Предполагается, что стоимость строительства этого хранилища превысит 12 млрд долл. США. В дополнение к этому как минимум 3 млрд долл. США ежегодно потребуются на обслуживание могильника. Открытие Хэнфордского центра, рассчитанного на предварительную обработку и витрификацию 200 тыс. м<sup>3</sup> отходов, запланировано на 2019 г. По оценке агентства, в целом финансирование проектов по демонтажу отслуживших свой срок станций (включая экспериментальные установки) в США находится на удовлетворительном уровне. На эти цели в 2011 г. из американского бюджета выделено около 70 млрд долл. США.

МАГАТЭ продолжает всестороннее изучение последствий катастрофы на АЭС «Фукусима». По его оценке, для ремедиации зараженных в результате катастрофы экосистем необходимо возвести хранилища, рассчитанные на консервацию 5–28 млн м<sup>3</sup> радиоактивных отходов. Для строительства хранилищ потребуется земельный участок площадью до 5 км<sup>2</sup> и не менее трех лет. К настоящему времени усилиями международного сообщества удалось обработать порядка 150 тыс. м<sup>3</sup> зараженных сточных вод. В частности, были оперативно возведены передвижные платформы с инструментами ремедиации на базе технологий осаждения взвеси с применением флокуляционных агентов, ионообменной обработки на основе цеолитов, обратного осмоса и выпаривания. Тем не менее ситуация с загрязнением водных экосистем цезием-134 и цезием-137 остается очень напряженной. Потребуется также разработать специальные средства и инструменты для выгрузки топлива и обезвреживания аварийных реакторов.

Руководствуясь основными уроками «Фукусимы», с точки зрения безопасности признано необходимым разработать: а) защитные меры, рассчитанные на чрезвычайные происшествия и стихийные бедствия (например, землетрясения и цунами); б) системы экстренного охлаждения реакторов; в) дополнительные методы и инструменты для ликвидации чрезвычайных ситуаций на АЭС, включая технологии ремедиации. Отдельно предстоит внести существенные дополнения в типовые процессы проектирования строящихся и реконструируемых АЭС, которые должны проводиться с учетом более широкого спектра вероятных нештатных и чрезвычайных ситуаций. Эксперты считают, что большую часть выводов по результатам изучения последствий катастрофы на «Фукусиме» еще предстоит сделать.

Продолжена реализация программы США по сокращению угроз распространения ядерных технологий GTRI<sup>3</sup>. В частности, данная программа нацелена на сокращение доли глобального использования высокообогащенного урана в исследовательских целях. В том числе это достигается путем конверсии исследовательских реакторов для их перехода на слабообогащенный уран. К концу 2011 г. конверсия успешно проведена на 76 из 200 реакторов, модернизация которых предусмотрена программой GTRI.

---

<sup>3</sup> От англ. Global Threat Reduction Initiative.

Высокообогащенный уран, используемый в ряде стран Восточной Европы для исследовательских реакторов, постепенно возвращается в Россию. В частности, подписаны контракты по перемещению в Россию очередных партий опасного топлива из Сербии и Украины.

Согласно оценкам МАГАТЭ, в глобальном масштабе уровень безопасности АЭС постепенно повышается, о чем свидетельствует сокращение количества нештатных и аварийных ситуаций в расчете на 7 тыс. ч работы реактора при достижении критической мощности: с 1,03 в 2002 г. до 0,62 в 2010 г. В то же время в последние годы снижение данного показателя замедлилось, считают эксперты, в связи с большим разбросом технических и эксплуатационных характеристик реакторов в разных странах и регионах. Очевидно, что потенциал для повышения безопасности АЭС еще далеко не исчерпан.

## **2. Разработки исследовательских и перспективных реакторов**

В 2011 г. в мире продолжились разработки инновационных реакторов на быстрых нейтронах. В Китае осуществлено подключение к энергосистеме Китайского экспериментального быстрого реактора (CFER) с расчетной мощностью 65 МВт<sub>тэ</sub> (20 МВт (эл)). Разработка крупного прототипного реактора-бридера PFBR мощностью 500 МВт продолжается в Индии. В Японии создается быстрый реактор с натриевым охлаждением (JSFR). Данный проект, вероятно, будет скорректирован правительством страны, как и национальная программа разработок инновационных реакторов, в связи с последствиями катастрофы на АЭС «Фукусима». В Корее продолжается программа НИОКР, направленная на поддержку проекта натриевого быстрого реактора KALIMER мощностью 600 МВт. Самым крупным эксплуатируемым реактором на быстрых нейтронах остается российский BN-600. Одновременно в г. Белоярске (Россия) продолжается строительство реактора BN-800, а также проводятся работы по усовершенствованию натриевого реактора BN-1200, разработки инновационного реактора со свинцовым теплоносителем BREST-OD-300, реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем SVBR-100 и многоцелевого реактора с натриевым охлаждением MBIR.



Среди малых реакторов кроме российского проекта SVBR-100 можно выделить некоторые китайские и американские разработки. Например, в Китае разрабатывается исследовательский высокотемпературный газоохладимый реактор HTR-10, на базе которого планируется построить два энергоблока с демонстрационными модульными реакторами HTR-PM. В США подготовительную стадию проходит концептуальный проект газоохладимого реактора GT-MHR мощностью 150 МВт, оснащенного установкой по производству водорода.

В ходе Международного проекта по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (INPRO) выполняются передовые исследования реакций деления и слияния. В 2011 г. в состав участников INPRO были включены три новых государства – Египет, Израиль и Иордания. В рамках INPRO завершен исследовательский проект «Ядерные системы на основе тепловых и быстрых реакторов, включая замкнутые топливные циклы» (GAINS), позволивший выявить и оценить преимущества перехода мировой атомной энергетики на системы на быстрых реакторах с замкнутыми топливными циклами.

Эксперты МАГАТЭ отмечают достигнутый в течение рассматриваемого года прогресс в рамках проекта Международного термоядерного экспериментального реактора – ИТЭР. К концу 2011 г. подписаны соглашения по 65 проектам (из запланированных 126) о поставке, установке и тестировании экспериментального и инфраструктурного оборудования (рис. 1). Продолжаются исследования в области магнитного сдерживания плазмы – одной из основных в разработке демонстрационного термоядерного реактора (Demo). Эксперты отметили ряд важнейших аспектов, которые требуют внимания международного сообщества при создании демонстрационного образца реактора Demo, в частности:

а) проектирование реакторов слияния в значительной степени зависит от физических и технических допущений и кодификации этих допущений;

б) разработка материалов для реакции синтеза с последующим тестированием иррадиации является ключевым моментом при определении конструктивных особенностей первой стенки реактора;

в) разработка элементов и системы бридинговых зон (зон размножения) тритиевого топлива бланкета реактора Demo потребуются для

всех последующих (по завершении эксперимента ИТЭР) модификаций термоядерных реакторов;

г) решение задачи обеспечения устойчивости материалов и конструкций к побочным продуктам плазмы (высокотемпературное тепло и заряженные частицы) необходимо для преодоления «стадии Демо»;

д) потребуется разработка детальных технических требований и спецификаций для последующих за «стадией Демо» экспериментальных образцов аналогичных установок.

Событием в области создания исследовательских реакторов и ускорителей в 2011 г. стала церемония закладки Китайского нейтронного генератора CSNS, начало работы которого запланировано на 2016–2018 гг. Кроме того, строительство нового мощного линейного ускорителя ESS активно продолжается в Швеции при поддержке 17 стран ЕС. Его открытие намечено на 2019 г. Это должно придать новый импульс материаловедению, нанонаукам, археологии, пищевым и химическим технологиям, биохимии и фармацевтике.

Мартовское землетрясение и цунами нанесло ущерб японскому протонному ускорителю J-PARC. Тем не менее по завершении оценки причиненного ущерба и ремонтных работ ускоритель возобновит работу.

Усилия многих стран направлены на разработку усовершенствованных синхротронных установок, в которых нуждается научное сообщество. В Швеции ведется строительство синхротрона третьего поколения MAX IV, который предполагается оснастить в том числе лазерным источником на свободных электронах (FEL<sup>4</sup>). Синхротрон ALBA в Испании близок к вводу в эксплуатацию и началу работы первых коллективов ученых.

Активно продолжается строительство FEL-установок четвертого поколения, а именно: XFEL в Германии, FERMI@Elettra в Италии (установка способна генерировать очень короткие импульсы – менее  $10^{-15}$  с) (рис. 2) и SwissFEL в Швейцарии.

К концу 2011 г. в мире насчитывалось 672 исследовательских реактора, 232 из которых находились в эксплуатации, 13 – временно выключены,

<sup>4</sup> От англ. free electron laser.

211 – выведены из эксплуатации и 3 – в процессе строительства. Кроме этого два проекта проходили этап планирования и еще пять были отложены. Ожидается, что по мере того как будут появляться многофункциональные реакторы нового поколения, количество исследовательских реакторов в мире к 2020 г. сократится до 100–150 единиц.

Для перехода к исследовательским реакторам нового поколения продолжается разработка новых видов уран-молибденового топлива чрезвычайно высокой плотности. Экспертами МАГАТЭ отмечена необходимость проведения дополнительного иррадиационного и постиррадиационного тестирования инновационных видов топлива для их коммерциализации в заданные сроки.

### **3. Применение ядерных технологий в других областях науки**

Сфера применения ядерных технологий достаточно обширна. Ниже приведены некоторые из отмеченных экспертами МАГАТЭ в 2011 г. достижений и направлений развития технологий мирного атома в ряде областей, включая биомедицинские исследования, здравоохранение и экологию.

Ядерные технологии внесли значимый вклад в борьбу с чумой крупного рогатого скота, об искоренении которой в глобальном масштабе было заявлено в 2011 г. Это стало возможным во многом благодаря методам иммуносорбентного анализа с ферментной меткой, разработанным в лабораториях МАГАТЭ.

В течение 2011 г. были получены новые результаты в области применения ядерных технологий для отслеживания и противодействия заболеваниям. В частности, апробированы методы, позволяющие выявить происхождение вспышек вируса птичьего гриппа с использованием стабильных изотопов. Ученые, используя радиоактивные излучатели, продолжают поиск вирусных вакцин против ящура, лихорадки Рифт-Валли, гриппа и других вирусных заболеваний.

Вследствие катастрофы на АЭС «Фукусима» были поражены сельскохозяйственные земли, расположенные в радиусе распространения выброшенных в окружающую среду радиоактивных веществ. Для борьбы с радиоактивным загрязнением почв и водоемов требуется разработка но-

вых методов восстановления экосистем, обеспечивающих безопасность сельскохозяйственного производства и продуктов питания.

В случае катастроф, подобных произошедшей на АЭС «Фукусима», среди прочего необходимо в течение очень короткого промежутка времени взять множество проб окружающей среды (воздушная среда, почвы и водоемы) и провести большое количество исследований по строго заданным критериям соответствия нормам радиоактивного загрязнения. С этой целью МАГАТЭ координирует деятельность сети аналитических лабораторий по измерению радиоактивности окружающей среды (АЛМЕРА<sup>5</sup>). При ликвидации последствий катастрофы на «Фукусиме» отмечена необходимость осуществления подводного мониторинга прибрежных морских экосистем методом гамма-спектрометрии высокого разрешения для получения картины распространения жидких радиоактивных выбросов и отслеживания состояния радиоактивного загрязнения прибрежных зон и накопления радиоактивных отложений.

В здравоохранении эксперты МАГАТЭ считают перспективным использование изотопов в качестве инструмента для оценки и коррекции программ вскармливания грудных детей. Применение этих методов в Чили легло в основу разработки национальной программы содействия развитию моторики и физической активности детей в возрасте от 6 до 24 месяцев.

В области радиотерапии совершенствуются системы управления радиографическими базами данных о пациентах, проходящих курсы лучевой терапии. Достижения в информационных технологиях позволяют МАГАТЭ разрабатывать и распространять стандарты в оценке эффективности и планирования оптимальной дозы облучения при назначении лучевой терапии онкобольным.

В 2011 г. была разработана новая вакцина против малярии, действие которой основано на возбудителях этого заболевания, ослабленных гамма-облучением. Вакцина проходит завершающую стадию клинических испытаний.

---

<sup>5</sup> От англ. ALMERA – analytical laboratories for the assessment of environmental radioactivity.

Продемонстрирована оптимизированная технология производства биоэтанола методом термического гидролиза (40 мин, 180°C) в комбинации с электронно-лучевым облучением (50 кГр) жмыха сахарного тростника. Ранее учеными уже был зафиксирован рост эффективности гидролиза с использованием энзимов на 75% при облучении биотопливного сырья в дозе 30 кГр.

Для борьбы с насекомыми-вредителями успешно используется излучение в гамма-диапазоне кобальта-60 или цезия-137. Одновременно исследуются новые способы стерилизации насекомых с применением излучателей в рентгеновском диапазоне (рис. 3). Эксперты МАГАТЭ полагают целесообразным продолжить данные исследования, постепенно переходя к применению рентгеновских облучателей. В целом биомедицинские направления, использующие ядерные технологии, отмечены экспертами МАГАТЭ в числе наиболее перспективных, способных оказать значительное влияние на развитие сельского хозяйства, экологии и здравоохранения.

## Приложение

Рисунок 1. **Сверхпроводящие корректирующие катушки для ИТЭР в Институте физики плазмы (Китай)**

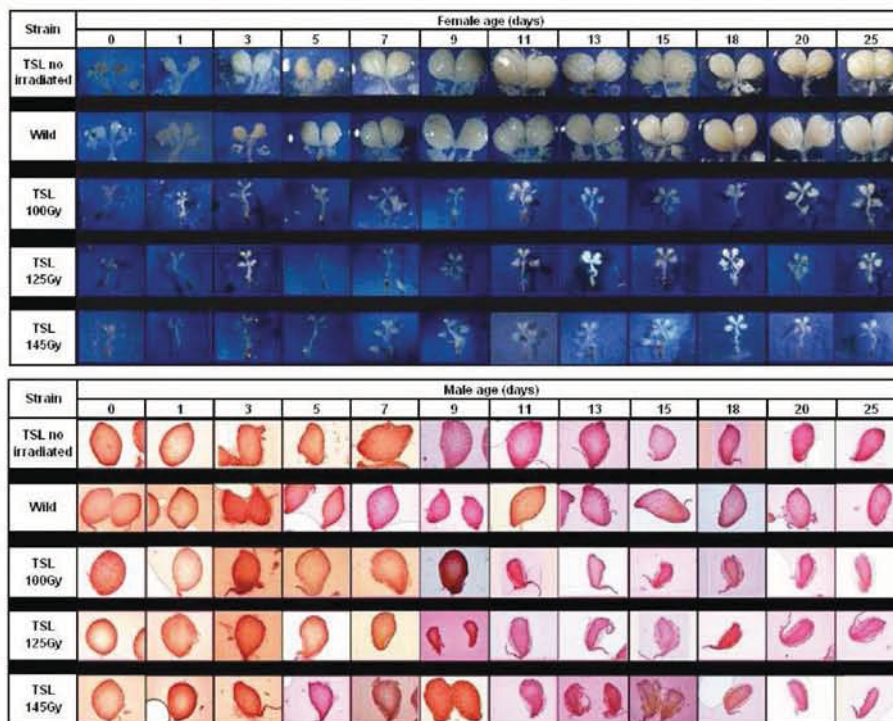


Фото на рис. 1 и 2: IAEA (2012), Nuclear Technology Review 2012.

Рисунок 2. **Лазер на свободных электронах Fermi**



Рисунок 3. **Воздействие гамма-излучения на репродуктивную функцию средиземноморской плодовой мушки\***



\* Для определения эффекта гамма-излучения (100, 125 и 145 Гр) на наследственную функцию и репродуктивную систему женских (*сверху*) и мужских (*снизу*) особей средиземноморской плодовой мушки проведено сравнение диких насекомых и разработанных МАГАТЭ температурочувствительных мутантов с летальной генетической линией.

Обзор выполнен на основе следующих публикаций:

1. IAEA (2012), Nuclear Technology Review 2012.



## **Тематические рубрики ежемесячного обзора**

Аэронавтика и космос

Биотехнологии и генетика. Сельское хозяйство,  
пищевая и химическая промышленность

Информационные и телекоммуникационные технологии  
и вычислительная техника

***Исследования в области ядерной и квантовой физики***

Медицинские технологии и оборудование

Нанотехнологии и новые материалы, микроэлектроника

Социальные и экономические науки и статистика

Энергетика и транспорт