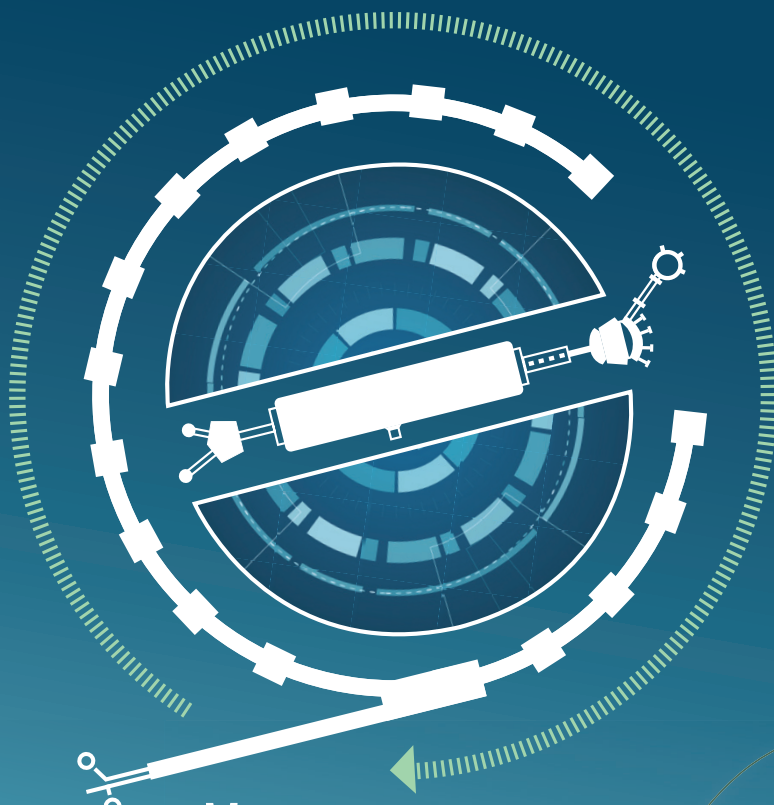


# БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ

МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Флагманская публикация МАГАТЭ | Май 2022 года | [www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)



ПРИМЕНЕНИЕ

## УСКОРИТЕЛЕЙ ЧАСТИЦ

И ДРУГИХ ИСТОЧНИКОВ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Что такое ускорители частиц, стр. 4

Ядерная наука проливает свет на археологию Древнего Рима, стр. 8

Развертывание установок, использующих ионизирующее излучение, на Филиппинах и за их пределами, стр. 22



## БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ

издается

Бюро общественной информации  
и коммуникации (ОРИС)

Международное агентство по атомной энергии

Венский международный центр

А/я 100, 1400 Вена, Австрия

Тел.: (43-1) 2600-0

[iaebulletin@iaea.org](mailto:iaebulletin@iaea.org)

Ответственный редактор: Михаэль Амди Мадсен

Редактор: Миклош Гашпар

Дизайн и верстка: Риту Кенн

БЮЛЛЕТЕНЬ МАГАТЭ имеется в интернете по адресу:

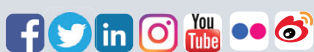
[www.iaea.org/bulletin](http://www.iaea.org/bulletin)

Выдержки из материалов МАГАТЭ, содержащихся в Бюллетене МАГАТЭ, могут свободно использоваться при условии указания на их источник. Если указано, что автор материалов не является сотрудником МАГАТЭ, то разрешение на повторную публикацию материала с иной целью, чем простое ознакомление, следует испрашивать у автора или предоставившей данный материал организации.

Мнения, которые выражены в любой подписанной статье, опубликованной в Бюллетене МАГАТЭ, необязательно отражают точку зрения Международного агентства по атомной энергии, и МАГАТЭ не несет за них никакой ответственности.

Обложка: МАГАТЭ

Читайте наши новости на сайтах:



Миссия Международного агентства по атомной энергии состоит в том, чтобы предотвращать распространение ядерного оружия и помогать всем странам — особенно развивающимся — в налаживании мирного, безопасного и надежного использования ядерной науки и технологий.

Созданное в 1957 году как автономная организация под эгидой Организации Объединенных Наций, МАГАТЭ — единственная организация системы ООН, обладающая экспертным потенциалом в сфере ядерных технологий. Уникальные специализированные лаборатории МАГАТЭ способствуют передаче государствам — членам МАГАТЭ знаний и экспертного опыта в таких областях, как здоровье человека, продовольствие, водные ресурсы, экономика и окружающая среда.

МАГАТЭ также служит глобальной платформой для укрепления физической ядерной безопасности. МАГАТЭ выпускает Серию изданий по физической ядерной безопасности, в которой выходят одобренные на международном уровне руководящие материалы по физической ядерной безопасности. МАГАТЭ также ставит своей задачей содействие минимизации риска того, что ядерные и другие радиоактивные материалы попадут в руки террористов и преступников и что ядерные установки окажутся объектом злоумышленных действий.

Нормы безопасности МАГАТЭ закладывают систему фундаментальных принципов безопасности и отражают международный консенсус в отношении того, что можно считать высоким уровнем безопасности для защиты людей и окружающей среды от вредного воздействия ионизирующего излучения. Нормы безопасности МАГАТЭ разрабатывались для всех типов ядерных установок и деятельности, преследующих мирные цели, а также для защитных мер, необходимых для снижения существующих рисков облучения.

Кроме того, при помощи своей системы инспекций МАГАТЭ проверяет соблюдение государствами-членами их обязательств, касающихся использования ядерного материала и установок исключительно в мирных целях, в соответствии с Договором о нераспространении ядерного оружия и другими соглашениями о нераспространении.

Работа МАГАТЭ многогранна, и в ней участвует широкий круг партнеров на национальном, региональном и международном уровне. Программы и бюджет МАГАТЭ формируются на основе решений его директивных органов — Совета управляющих, насчитывающего 35 членов, и Генеральной конференции всех государств-членов.

Центральные учреждения МАГАТЭ находятся в Венском международном центре. Полевые бюро и бюро по связи расположены в Женеве, Нью-Йорке, Токио и Торонто. В Вене, Зайберсдорфе и Монако работают научные лаборатории МАГАТЭ. Кроме того, МАГАТЭ оказывает содействие и предоставляет финансирование Международному центру теоретической физики им. Абдуса Салама в Триесте, Италия.

# Использование ускорителей и радиационных технологий в целях устойчивого развития

Рафаэль Мариано Гросси, Генеральный директор МАГАТЭ

«Протоны придают атому индивидуальность, а электроны определяют его личность», — так писатель Билл Брайсон образно охарактеризовал устройство материи. Это вполне подходящее описание структурных элементов Вселенной. Каждая атомная частица, химический элемент и изотоп рассказывают что-то о природе, прошлом и возможностях материи, которую они образуют. Ускорители и другие радиационные технологии — это бесценные инструменты для изучения атомов и работы с ними.

Ускорители частиц отличаются большим разнообразием, и сегодня в мире их насчитывается больше двадцати тысяч. Они помогают создавать радиофармацевтические препараты, лечить болезни, сохранять продукты питания, проводить мониторинг окружающей среды, делать материалы прочнее, глубже познавать фундаментальную физику, изучать прошлое и даже раскрывать преступления.

В этом номере «Бюллетеня МАГАТЭ» рассказывается о различных типах ускорителей и о том, как МАГАТЭ способствует их применению в сферах здравоохранения, сельского хозяйства, научных исследований, охраны окружающей среды и промышленности. Многие методы, основанные на использовании ускорителей, работают и обеспечивают столь разнообразные преимущества за счет применения различных видов излучения. Целый ряд промышленных применений с использованием ускорителей и источников излучения имеет важнейшее значение для мировой экономики и достижения устойчивого развития.

Лаборатории МАГАТЭ в Зайберсдорфе, Австрия, оказывают поддержку исследователям со всего мира в использовании ионизирующего излучения для решения самых разных задач. К их числу относятся создание сельскохозяйственных культур, устойчивых к экологическим стрессам, и стерилизация самцов насекомых в рамках метода борьбы с вредителями, который позволяет подавлять популяции комаров, мухи

це и плодовых мух в Латинской Америке, Африке, Азии и Европе.

Кроме того, в Бюллетене рассказывается о том, как ионизирующее излучение помогло сохранить древний корабль, как его применяют для обеспечения повторного использования и переработки пластика, как оно способствует защите пищевых продуктов от порчи и вредителей, а также о его роли в определении подлинности и возраста различных объектов.

В МАГАТЭ мы помогаем развивать инновации в области ускорителей и радиационных технологий. В этих целях в этом году мы проводим две важные конференции: самую первую в своем роде международную конференцию «Ускорители частиц в контексте исследований и устойчивого развития», а также вторую Международную конференцию по применению радиационной науки и технологий, в ходе которой будут обсуждаться не только ускорители, но и более широкий спектр источников ионизирующего излучения.

На этих мероприятиях соберутся представители тех сообществ специалистов, которые применяют эти технологии и получают от них наибольшую пользу, чтобы поделиться своим опытом и наилучшей практикой и тем самым способствовать научному прогрессу в целях развития.

Общество обращается к науке, чтобы найти решение масштабных экзистенциальных проблем, а ученые ищут ответы с помощью ускорителей. И в этом им помогает МАГАТЭ, предоставляя странам во всех частях мира доступ к этим мощным и полезным достижениям ядерной науки.



(Фото: А. Абрунхоза/Университет Коимбры)



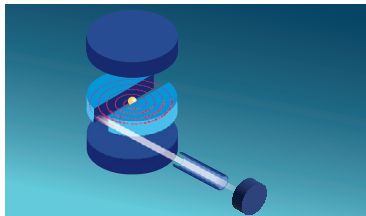
(Фото: МАГАТЭ)







## 1 Использование ускорителей и радиационных технологий в целях устойчивого развития



## 4 Что такое ускорители частиц?



## 6 Роль ускорителей в изучении окружающей среды и решении проблемы ее загрязнения



## 8 Ядерная наука проливает свет на археологию Древнего Рима

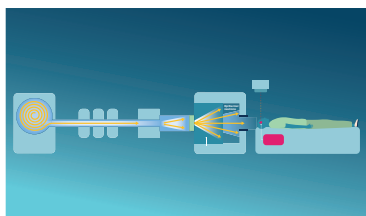


## 10 Загрязнение пластиком

Переработка отходов с помощью радиации для защиты окружающей среды



## 12 Оптимизация борьбы с вредителями в пищевых продуктах с помощью облучения



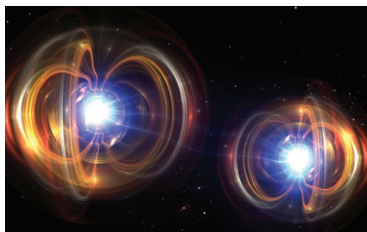
## 14 Нейтроны для нейронов и циклотроны для радиоизотопов



## 16 Атомы, которые раскрывают тайны

Аналитические методы, основанные на использовании ускорителей частиц, помогают выявлять подделки произведений искусства





## 18 Квантовая модификация

Использование ускорителей частиц для имплантации отдельных атомов в целях биозондирования



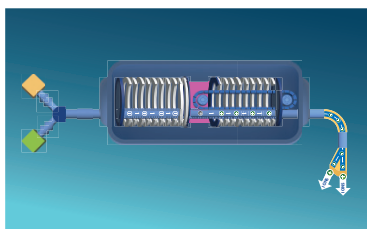
## 20 Использование ядерных методов для разработки усовершенствованных материалов



## 22 Развертывание установок, использующих ионизирующее излучение, на Филиппинах и за их пределами



## 24 Обеспечение безопасного, надежного и мирного использования облучательных установок в контексте законодательной деятельности



## 26 Что нужно знать об ионных пучках

### ВОПРОСЫ И ОТВЕТЫ

## 28 Использование облучения в промышленности — чтобы сделать мир лучше

### МИРОВОЙ ОБЗОР

## 30 MYRRHA: система для обращения с радиоактивными отходами на базе ускорителя

— Хамид Айт Абдеррахим, заместитель генерального директора SCK CEN по международным делам, директор проекта MYRRHA

### СЕГОДНЯ В МАГАТЭ

## 32 Новости МАГАТЭ

## 36 Публикации

# Что такое ускорители частиц?

Сотириос Харисопулос и Вольфганг Пикот

## ВАЖНЕЙШИЕ ЭЛЕМЕНТЫ УСКОРИТЕЛЯ ЧАСТИЦ

Ускорители частиц генерируют и ускоряют пучки заряженных элементарных частиц атомного и субатомного размера, таких как электроны, протоны и ионы. Они используются не только для фундаментальных научных исследований, призванных расширить наши представления о материи, но и для множества социально-экономических применений, связанных с вопросами здоровья человека, мониторинга окружающей среды, качества продуктов питания, энергетическими и аэрокосмическими технологиями и другими областями.

Ускорители частиц могут иметь линейную (прямую) или циклическую конструкцию и различные размеры. Они могут насчитывать в длину десятки километров или помещаться в небольшой комнате. Однако конструкция всех ускорителей включает четыре основных элемента:

- 1 источник, который производит заряженные частицы;
- 2 составное устройство, предназначенное для придания частицам энергии и их ускорения путем создания статического или колеблющегося электрического поля;
- 3 последовательно соединенные металлические вакуумные трубы, позволяющие частицам свободно перемещаться без столкновения с молекулами воздуха или пылью, которые могут рассеивать пучок частиц;
- 4 система электромагнитов для управления пучками частиц, их фокусировки или изменения их траектории перед бомбардировкой образца-мишени.



## ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПУЧКОВ ЧАСТИЦ



### ЗДРАВООХРАНЕНИЕ

Пучки заряженных частиц применяются для стерилизации медицинского оборудования и производства радиоизотопов, которые необходимы для синтеза радиофармацевтических препаратов, используемых в диагностике и лечении рака. Крупные ускорители помогают уничтожать раковые клетки, выявлять структуру белков и вирусов, оптимизировать вакцины и новые лекарства.



### ИССЛЕДОВАНИЯ

Некоторые — самые крупные — ускорители частиц используются для того, чтобы заставить элементарные частицы сталкиваться друг с другом: это позволяет расширить наши знания о Вселенной. Некоторые из этих ускорителей используются также для генерации нейтронов.



### ОКРУЖАЮЩАЯ СРЕДА

В большинстве случаев протонные пучки могут использоваться для обнаружения следовых количеств химических элементов в воздухе, воде или почве. Например, с их помощью можно выявить концентрацию и состав различных загрязняющих веществ и составить уникальный набор признаков, характеризующий качество воздуха.



### ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Пучки частиц могут взаимодействовать с атомами материала мишени, например, чтобы сделать материал более прочным.

## ТИПЫ УСКОРИТЕЛЕЙ ЧАСТИЦ

### УСТАНОВКИ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ

Установки ионной имплантации широко используются в промышленности, например, для того, чтобы сделать материалы более устойчивыми к повреждениям вследствие износа и частого использования. По всему миру насчитывается около 12 000 установок ионной имплантации, которые помогают изготавливать полупроводники для смартфонов и солнечных батарей и повышать прочность металлических, керамических и стеклянных покрытий. С помощью ионной имплантации можно также повышать надежность материалов, используемых для медицинских имплантатов.

### ЛИНЕЙНЫЕ УСКОРИТЕЛИ

Длина линейных ускорителей может варьироваться от нескольких метров до нескольких километров. Многие из них используются в научных исследованиях. Линейные ускорители медицинского назначения, которые устанавливаются в больницах, формируют серии импульсов рентгеновского излучения, направляемые на опухолевые клетки для их уничтожения. По всему миру работает около 1000 медицинских линейных ускорителей.

### СИНХРОТРОНЫ

Более 70 расположенных в разных странах мира синхротронов можно считать настоящими гигантами среди ускорителей частиц. Они используются для научных исследований и помогают ученым понять фундаментальные законы существования нашей Вселенной. Ученые используют синхротроны для изучения различных проблем в области химии, биомедицины, природного и культурного наследия, окружающей среды и многих других предметных областях.

### ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВЫЕ УСКОРИТЕЛИ ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В мире действует почти 10 000 электронно-пучковых ускорителей. С их помощью можно, например, сделать материалы более долговечными в условиях экстремальных температур или устойчивыми к воздействию химических веществ. Кроме того, электронные пучки применяются для стерилизации медицинских препаратов и продуктов питания, а также для дезинфекции сточных вод. Они находят широкое применение в автомобильной и аэрокосмической промышленности, в машиностроении, а также в производстве медицинской продукции.

### ЦИКЛОТРОНЫ

Более 1200 имеющихся по всему миру циклотронов используются для получения пучков ускоренных протонов или дейтронов для медицинских целей. Они нужны для производства радиоизотопов, которые используются для медицинской визуализации при диагностике и лечении раковых заболеваний. Многие циклотроны расположены в больницах и служат для производства радиофармпрепаратов на основе короткоживущих радиоизотопов.

### ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ УСКОРИТЕЛИ

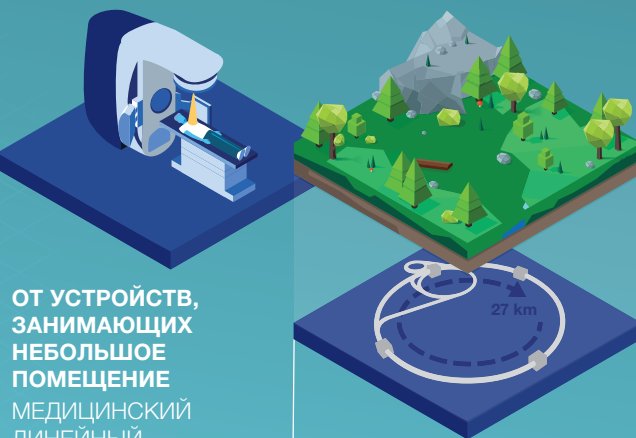
Электростатические ускорители, в частности тандемные ускорители, представляют собой менее дорогостоящие установки. Ученые используют их для исследования свойств материалов, мониторинга окружающей среды, обеспечения биомедицинских исследований, изучения объектов культурного наследия и многих других задач. По прогнозам экспертов, в ближайшие годы количество таких установок, которых в мире в настоящее время насчитывается около 300, будет расти.

НА СЕГОДНЯШНИЙ ДЕНЬ  
НАСЧИТЫВАЕТСЯ БОЛЕЕ

# 20 000

УСКОРИТЕЛЕЙ ЧАСТИЦ,  
НАХОДЯЩИХСЯ В  
ЭКСПЛУАТАЦИИ  
ПО ВСЕМУ МИРУ

**РАЗМЕРЫ**



ОТ УСТРОЙСТВ,  
ЗАНИМАЮЩИХ  
НЕБОЛЬШОЕ  
ПОМЕЩЕНИЕ  
МЕДИЦИНСКИЙ  
ЛИНЕЙНЫЙ  
УСКОРИТЕЛЬ

ДО СООРУЖЕНИЙ,  
ПРОСТИРАЮЩИХСЯ НА  
ДЕСЯТКИ КИЛОМЕТРОВ  
СИНХРОТРОН



# Роль ускорителей в изучении окружающей среды и решении проблемы ее загрязнения

Ленка Дойчанова



Первостепенное значение для решения глобальных проблем в сфере здравоохранения имеет оценка загрязненности воздуха и воды. Более 60% населения планеты проживает в Азии, где расположены 13 крупнейших городов мира. В значительной степени урбанизированных районах континента на передний план выходит проблема загрязнения воздуха и воды. Чтобы помочь экспертам в оценке характеристик проб воздуха, МАГАТЭ сотрудничает с 15 азиатскими странами для еженедельного отбора проб мелко- и крупнодисперсных взвешенных частиц, влияющих на качество воздуха, которым дышат более 110 миллионов человек. В период с 2002 по 2017 год основанные на использовании ускорителей ионно-пучковые методы помогли не только обнаружить присутствие в отобранных пробах многих элементов, но выявить вероятные источники загрязнения воздуха.

## Центр «Элеттра Синхротроне Триесте» в Италии.

(Фото: «Элеттра Синхротроне Триесте»)

**Т**яжелые металлы и другие токсичные химические вещества могут загрязнять воздух, воду и почву и, как следствие, причинять вред флоре и фауне. Чтобы ограничить воздействие таких элементов, сначала ученым нужно лучше понять, как они ведут себя в тех или иных условиях. В этой работе им на помощь приходят ускорители частиц, формируемые которыми пучки элементарных частиц можно использовать для воздействия на выбранные материалы, что позволяет как анализировать, так и изменять свойства их поверхности, состав, структуру или другие свойства.

«Методы, основанные на использовании ускорителей, открывают уникальные возможности и позволяют быстро получить подробное представление о загрязнении окружающей среды, не оказывая разрушающего воздействия и не требуя больших затрат, — говорит физик по ядерным приборам МАГАТЭ Роман Падилья. — Ускорители частиц, используемые для изучения и улучшения состояния окружающей среды, могут иметь самую разную конструкцию и размеры, и, например, формируемые ускорителями ионные пучки помогают нам определять характеристики проб почв, донных отложений, биоты, воды или взвешенных в воздухе микрочастиц».

В большинстве случаев для исследования проб в процессе мониторинга окружающей среды используются электростатические ускорители (см. стр. 4).

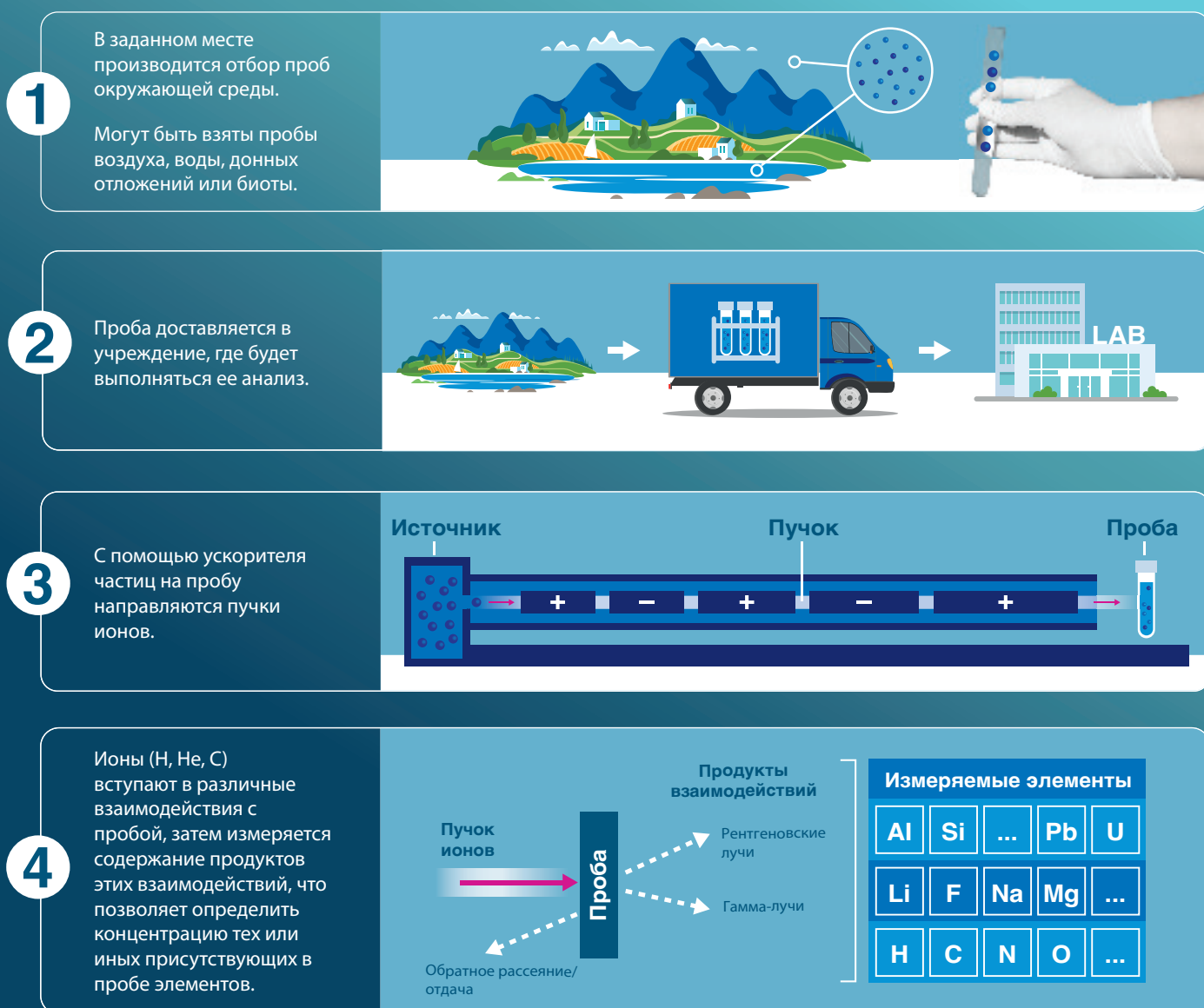
Кроме того, пучки электронов, которые следует отличать от пучков ионов (см. стр. 26), могут применяться для очистки сточных вод или переработки пластика (см. стр. 10). В частности, этот метод имеет явное преимущество по сравнению с обычными технологиями очистки воды, такими как химическая и биологическая очистка, поскольку при использовании электронных пучков не требуется химических дезинфицирующих средств для уничтожения микроорганизмов. В провинции Хубэй, Китай, действует специализированная станция водоочистки, на которой для стерилизации медицинских сточных вод и разложения антибиотиков применяется электронно-пучковая технология. Располагая мощностями по очистке 30 миллионов литров промышленных сточных вод в сутки, эта станция представляет собой крупнейшую в мире водоочистную систему с использованием облучения и в ее основе лежит переданная МАГАТЭ технология. Процесс очистки позволяет ежегодно экономить 4,5 миллиарда литров пресной воды — количество, достаточное для того, чтобы утолить жажду 100 000 человек.

В свою очередь, в экологических исследованиях находят также применение синхротроны — особый тип циклических ускорителей частиц — которые помогают экспертам анализировать загрязняющие элементы, составлять карты их распространения и определять их химический вид. Эти сложные ускорители, которые используют в качестве зондирующего импульса рентгеновское излучение, могут быть востребованы в

горнодобывающей промышленности и промышленных процессах, где традиционные методы не могут обеспечить достаточные данные для прогнозирования вероятных последствий с точки зрения состояния окружающей среды, биодоступности или рисков, связанных с загрязнением. В горнодобывающей промышленности, например, синхротроны помогают предсказывать будущие процессы, такие как перенос или растворение металлов или минералов.

Более семи лет МАГАТЭ совместно с итальянским центром «Элеттра Синхротроне Триесте» (EST) эксплуатирует многофункциональное оконечное оборудование канала вывода рентгеновского излучения для рентгенофлуоресцентного анализа (РФА), а также разрабатывает новое оборудование и аналитические методы. В рамках таких вариантов сотрудничества МАГАТЭ поддерживает и поощряет связанные с применением синхротронного излучения научные

исследования и учебные мероприятия для профильных исследовательских групп, особенно в странах, располагающих ограниченным опытом и ресурсами, чтобы обеспечить доступ к синхротронным установкам и возможность работы на них. Такие эксперименты способствовали исследованию различных проблем, затрагивающих окружающую среду, включая изучение содержания мелкодисперсных аэрозольных частиц в воздухе атмосферы и закрытых помещений в Венгрии и Иордании; пространственного распределения свинца в растительности, произрастающей вблизи горнодобывающих предприятий в Испании; распределения и химического состояния кадмия, накапливаемого в устрицах и морских гребешках в Италии; присутствия титана в сельскохозяйственных почвах, обогащаемых илом водоочистных сооружений в Мексике; также изучению микроскопических процессов, связанных со снижением содержания загрязняющих веществ в реках Италии, загрязненных шахтными отходами.



# Ядерная наука проливает свет на археологию Древнего Рима

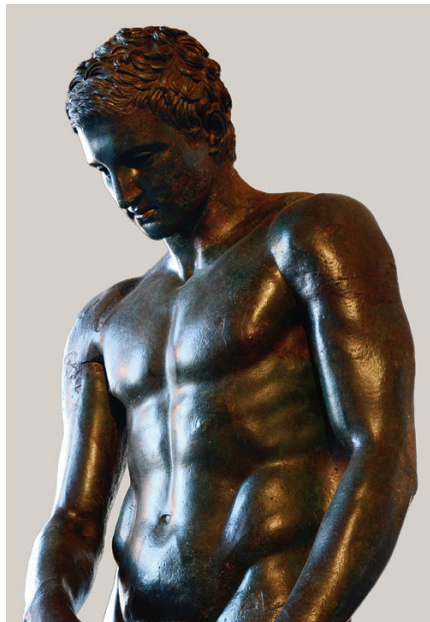
Михаэль Амди Мадсен

В 1996 году бельгийский дайвер Рене Ваутерс сделал уникальную археологическую находку. Исследуя воды на глубине 45 метров у хорватского островка Веле Орюле в Адриатическом море, он обнаружил загадочную древнюю статую из бронзы. Более десятилетия исследователи тщательно изучали статую, чтобы с помощью ядерных методов определить ее возраст, происхождение и даже способ ее создания.

Статуя Апоксиомена изображает соскребающего с себя пот и пыль обнаженного мускулистого атлета. В 1999 году, когда подвергнувшись значительной коррозии статую подняли со дна моря, начался длительный процесс удаления минеральных солей и реставрации. Поскольку изображение Апоксиомена не является чем-то уникальным, то даже после завершения работ в 2005 году для археологов оставалось загадкой место создания статуи — Рим или Древняя Греция. Установить происхождения статуи не представлялось возможным до 2009 года, когда внести некоторую ясность помог ускоритель частиц.

«Для разгадки прошлого Апоксиомена был использован ряд ядерных методов, позволивших лучше определить его структуру на атомном уровне», — говорит Лена Бассель, младший сотрудник по проектам в сфере науки о наследии в МАГАТЭ. Она сотрудничает с экспертами со всего мира в области применения ядерных методов для характеристики артефактов. Бассель ссылается на исследование, опубликованное в 2010 году в журнале «Journal of Archaeological Science» («Журнал археологической науки»), согласно которому исследователи, применившие метод ускорительной масс-спектрометрии для изучения найденных внутри Апоксиомена органических материалов, смогли провести углеродный анализ статуи и датировать ее происхождение периодом между 100 годом до н. э. и 250 годом н. э.

Исследователи применили также методы индуцированного протонами рентгеновского излучения (ИПРИ) на базе ускорителя частиц для определения первоначального состава сплава, а также мультиколекторной масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой для лучшего понимания изотопного состава свинца в статуе. Изотопы — это особые формы химического элемента, которые различаются по атомной массе и физическим свойствам. Для определения места происхождения того или иного образца, ученые проводят анализ соотношения изотопов свинца в его составе и сопоставляют его с известными характеристиками географических районов. «Они применили аналитические методы, основанные на использовании ускорителей частиц, чтобы выяснить,



Исследователи использовали ядерные методы, чтобы определить возраст, происхождение и способы изготовления статуи Апоксиомена.

(Фото: Вассиль/Викимедиа Коммонс)

происходит ли свинец в статуе из Восточных Альп или Сардинии, и пришли к выводу, что статуя является римской копией греческого оригинала», — говорит Бассель.

Пять лет спустя исследователи вновь изучили Апоксиомена, используя метод ИПРИ с высоким боковым разрешением. Они обнаружили, что инкрустированные губы статуи представляют собой весьма чистую нелегированную медь. Благодаря рентгенографии удалось получить представление о том, каким образом инкрустация была вставлена и закреплена в нужном положении, а также о сложной технике литья и соединения конечностей. Исследователи пришли к выводу, что Апоксиомен совершенно очевидно был копией гораздо более древней статуи — середины IV века до н. э. — и был изготовлен методом непрямого литья по выплавляемой восковой модели с использованием сплава с низким содержанием свинца.

«Методы на основе использования ускорителей частиц играют важную роль в характеристике объектов наследия, и опыт Апоксиомена подсказывает, что зачастую требуется подход, предусматривающий использование нескольких типов анализа. МАГАТЭ способствует развитию этих применений», — говорит Бассель. С 2018 года МАГАТЭ и его государства-члены содействуют использованию ядерных методов в области сохранения наследия — в



прошлом году в целях расширения использования ядерных методов для характеристики и сохранения культурного и природного наследия было установлено стратегическое партнерство с Университетом Париж-Сакле во Франции. В сотрудничестве с МАГАТЭ Университет уделил особое внимание научным исследованиям и разработкам, а также передаче знаний и наилучшей практики экспертам со всего мира.

## Римляне со дна Роны

Применение ядерных методов в археологии не ограничиваются целями характеристики — важную роль в сохранении памятников культуры уже давно играет облучение. Как известно, в 1977 году мумия египетского фараона Рамзеса II, возраст которой составляет 3200 лет, была облучена с целью удаления с нее грибов и насекомых, и с тех пор эта технология постоянно используется во многих других проектах.

В 2004 году в реке Рона в Арле, Франция, на глубине менее четырех метров было обнаружено римское судно I века н. э. Дубовая баржа длиной 31 метр, получившая название «Арль-Рона 3», вероятно, затонула в результате ливневого паводка, покрывшего ее тонким слоем глины.

«Глина способствовала сохранению лодки и ценных артефактов на борту, но анаэробные бактерии растворили древесную целлюлозу — ее место заняла вода. В 2011 году, когда исследователи решили поднять судно со дна реки и выставить его в музее, возникла определенная проблема, поскольку по мере высыхания древесина бы разрушилась», — говорит Лоран Кортелла, инженер-исследователь из мастерской «ARC-Nucléart» в Гренобле, специализирующейся на реставрации и сохранении объектов культурного наследия.

В «ARC-Nucléart» нашли решение — древесину погрузили в емкость с полиэтиленгликолем, затем высушили ее сублимацией и части лодки обработали облучением. «Точно так же, как если бы феном сушили клей, реставраторы использовали облучение для затвердевания

радиоотверждаемой смолы и сохранения волокнистой структуры дерева», — говорит Хан Пум Су, специалист МАГАТЭ по радиационной химии, который в рамках программы по сохранению наследия работает над расширением использования радиационных технологий для сохранения объектов материальной культуры. Хан Пум Су оказывает техническую поддержку усилиям, направленным на сохранение объектов материальной культуры по всему миру, и рассказывает о том, что спрос на такие применения растет.

«Сегодня на “Арль-Рону 3” можно посмотреть в находящемся в ведомстве департамента Буш-дю-Рон музее древнего Арля, но чтобы увидеть сохраненные при помощи облучения артефакты, нет необходимости ехать во Францию — такие методы применяются повсеместно», — говорит Хан. Об успешном применении этих методов по всему миру рассказывается в изданной МАГАТЭ в 2017 году публикации «Uses of Ionizing Radiation for Tangible Cultural Heritage Conservation» («Применение ионизирующих излучений для сохранения материальных объектов культурного наследия»). В настоящее время Хан работает над следующей публикацией МАГАТЭ из этой серии, которая будет посвящена положительной практике дезинфекции объектов культурного наследия и архивов с использованием ионизирующего излучения. Ее выпуск намечен на 2023 год.



Сохраненный с помощью ядерных методов древнеримский корабль «Арль-Рона 3» экспонируется в музее древнего Арля департамента Буш-дю-Рон, Франция.

(Фото: Cd13/MdDa/Баржа «Арль-Рона 3» © Реми Бенали)

# Загрязнение пластиком

## Переработка отходов с помощью радиации для защиты окружающей среды

### Пуджа Дая

Расположенный на расстоянии более 5000 км от ближайших крупных участков суши остров Хендерсон, пожалуй, является наиболее изолированным от остального мира местом на земле. И все же, несмотря на полное отсутствие людей, этот райский южно-тихоокеанский остров усеян более чем четырьмя миллиардами фрагментов и частиц изделий из пластика. Заполонивший пляжи Хендерсона мусор не только непригляден, но и смертельно опасен для морских обитателей, которые могут принять его за пищу и проглотить или запутаться в нем и больше никогда не выбраться на волю. Такие пластиковые отходы — это лишь один из примеров того, что стало с более чем восемью миллиардами тонн пластика, произведенного с 1950 года.

Совместные усилия МАГАТЭ и экспертов со всего мира направлены на изменение такого положения дел и защиту морской жизни и окружающей среды от загрязнения пластиком. Вместе с партнерами МАГАТЭ проводит исследования и занимается разработкой методов ионизирующего излучения для недорогостоящей переработки и повторного использования пластика. Эти методы предполагают использование электронно-пучковых ускорителей (см. стр. 26) для облучения использованного пластика с целью его вторичной переработки и упрощения производства из него новых видов продукции.

Метод не является в полной мере новым, он давно и успешно применяется на практике и оттого весьма перспективен. Облученные полимеры встречаются повсюду — от резиновых автомобильных шин до труб горячего водоснабжения и упаковки для пищевых продуктов. «Если этот метод применяется в промышленности для получения новых свойств пластика, ничто не препятствует использованию облучения для изменения формы и структуры пластика в целях повышения эффективности его переработки и

снижения количества пластиковых отходов», — говорит Селина Хорак, начальник Секции радиоизотопных продуктов и радиационной технологии МАГАТЭ.

Пластик состоит из различных типов полимеров — веществ, построенных из длинных цепочек или сеток повторяющихся групп атомов, называемых мономерами. В результате облучения полимеры приобретают различные новые свойства, которые способствуют переработке, сокращению и повторному использованию пластиковых отходов.

Ведущую роль в исследованиях в этой области играет новый проект координированных исследований МАГАТЭ, направленный на расширение использования ионизирующего излучения при переработке полимерных отходов. «Облучение материалов используется уже не только в производстве, но и в переработке, поэтому методы ионизирующего излучения, которые применяются для изменения свойств полимеров, актуальны и для переработки пластиковых отходов», — говорит Бин Джеремая Барба, научный сотрудник Филиппинского института ядерных исследований. Этот институт является одним из 18 учреждений в разных странах, которые сотрудничают с целью изучения возможностей использования таких радиационных процессов, как сшивание, расщепление цепи, прививка и другие методы изменения характеристик поверхности для оказания помощи странам в разработке более доступной и недорогой методологии переработки отходов.

### Сшитые полимеры

Процесс сшивания представляет собой облучение электронным пучком с целью образования мостиков между полимерными цепями. За счет соединения полимерных цепей улучшаются свойства материала, благодаря чему он может быть использован для создания более долговечных, более прочных и более качественных изделий. Такая практика широко распространена в производстве автомобильных шин, поскольку позволяет

**С 1950 года произведено восемь миллиардов тонн пластика. Большая его часть остается непереработанной — на свалках, в океанах и на пляжах.**

(Фото: М. Гашпар/МАГАТЭ)





уменьшить размер и толщину резины, снижая тем самым затраты на сырье и производство и повышая экологическую устойчивость продукта.

## Разложение полимеров

Почти противоположным образом облучение используется в процессе расщепления цепи, в ходе которого полимеры разрушаются, или подвергаются разложению. «Благодаря этому процессу материалы становятся более ломкими и легче поддаются измельчению в более тонкие полимеры. Например, политетрафторэтилен (химическое покрытие, более известное под торговой маркой “тефлон”) после разложения используется в качестве смазочного материала в моторных маслах и как добавка в чернила для печати», — говорит специалист в области облучения полимеров из Университета Хаджеттепе Олгун Гювен, возглавляющий в Турции работу в этой области. В рамках проекта координированных исследований эксперты изучают возможности использования метода расщепления цепи в процессе химической переработки, в ходе которого продукт расщепляется до своей базовой химической формы для получения новых сырьевых материалов или топлива. По словам Гювена, расщепление цепи в целях вторичной переработки может значительно расширить возможности производства новой продукции из одnorазовых полимеров.

## Прививка полимеров

Прививка — это процесс выращивания специально подобранной короткой полимерной цепи на поверхности другого полимера с целью изменения его свойств. Этот метод может также быть использован для соединения обычно несовместимых друг с другом полимеров, что позволяет упростить процесс изменения формы и структуры отходов.

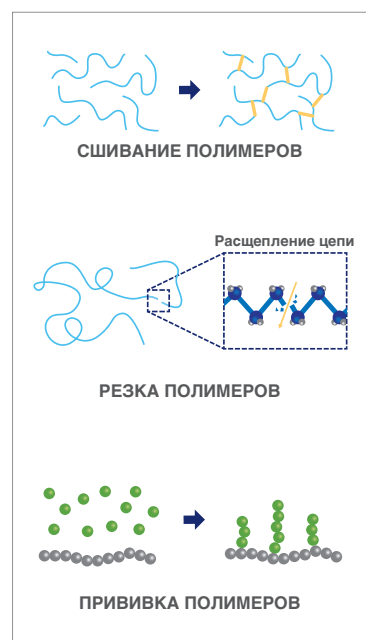
Эти методы — лишь некоторые из направлений, по которым МАГАТЭ ведет исследования в сфере использования ионизирующего излучения для переработки пластиковых отходов. «Те же средства, которые используются в промышленности, могут применяться и в области переработки отходов в качестве одного из доступных и недорогостоящих средств решения проблемы сокращения наносящих ущерб окружающей среде пластиковых отходов», — говорит Хорак. По ее словам, текущий проект координированных исследований позволит усовершенствовать и подтвердить данную

технологии переработки пластика и оценить целесообразность ее использования в странах. В рамках проекта будет также разработан план по передаче знаний и их применению на практике.

Для укрепления потенциала разных стран в области применения инновационных радиационных методов, призванных за счет переработки обеспечить сокращение пластиковых отходов, МАГАТЭ в 2021 году выступило с Инициативой по

использованию ядерных технологий для борьбы с загрязнением пластиком («НУТЕК пластик»). Эта инициатива направлена на оказание помощи странам в использовании различных ядерных методов. Она предлагает научно обоснованные решения для определения характеристик и оценки загрязнения морской среды частицами микропластика, а также демонстрирует возможности использования при переработке пластика ионизирующего излучения, которое позволяет превращать пластиковые отходы в пригодные для повторного использования материалы.

Проекты координированных исследований по линии «НУТЕК пластик» помогают предоставлять точные научные данные, которые используются для обоснования политики в области борьбы с загрязнением пластиком, совершенствования методик отслеживания пластика и повышения масштабируемости технологий переработки. В целях передачи знаний и содействия проектам по переработке пластика в рамках этой инициативы проекты технического сотрудничества МАГАТЭ предоставляют ученым возможность использовать оборудование, а также принимать участие в учебных мероприятиях. Разработка руководящих принципов поможет странам подготовить и создать условия для использования ядерных методов для борьбы с загрязнением пластиком.





# Оптимизация борьбы с вредителями в пищевых продуктах с помощью облучения

Джоанн Лю

Когда в магазине по соседству вы смотрите на специи, семена, фрукты и овощи, которые привезли из дальних стран, ваши глаза могут увидеть далеко не все. Благодаря небольшой дозе радиации продукты питания остаются свежими и не распространяют инвазивные организмы во время перевозки.

МАГАТЭ в партнерстве с Продовольственной и сельскохозяйственной организацией Объединенных Наций (ФАО) поддерживает новейшие разработки в области облучения пищевых продуктов и фитосанитарного облучения в целях оптимизации борьбы с вредителями и содействия международной торговле. Облучение пищевых продуктов и фитосанитарное облучение — это способы послепроductной обработки, предполагающие использование ионизирующего излучения, поступающего от источника, такого как кобальт-60, или ускорителей частиц.

«Ионизирующее излучение не оказывает существенного воздействия на пищевые продукты, при этом уничтожает микробов и инвазивных насекомых, а значит, способствует международной торговле», — отмечает Карл Блэкберн, специалист по облучению пищевых продуктов

**Благодаря облучению, такие пищевые продукты, как клубника, остаются свежими и их можно перевозить на большие расстояния.**

(Фото: P. Митхаре/Unsplash)

Совместного центра ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в области продовольствия и сельского хозяйства.

## Использование собственных облучательных устройств

Перед отправкой в конечный пункт назначения некоторые пищевые продукты сначала готовят или собирают в месте их происхождения, упаковывают, а затем отправляют на облучательную установку. В этих установках в качестве источника ионизирующего излучения обычно используется кобальт-60. «Кобальт-60 легко использовать для получения гамма-лучей, однако его может быть сложно купить и перевезти, — говорит Блэкберн. — МАГАТЭ предлагает новый оптимизированный подход, предполагающий самостоятельное использование мягкого излучения, такого как низкоэнергетические электронные пучки (НЭЭП) и низкоэнергетическое рентгеновское излучение, так как в этом случае облучатель можно установить на заводе пищевых продуктов или в упаковочном цехе».

В 2021 году проект координированных исследований МАГАТЭ показал целесообразность использования НЭЭП и мягкого рентгеновского излучения в целях уменьшения заражения паразитами и микробного загрязнения. «Это означает, что низкоэнергетические



электронные пучки, или мягкие электроны, можно применять для поверхностной обработки, ведь они не влияют на качественные характеристики, — говорит Сэцую Тодорики, участник проекта и руководитель исследовательской группы в Национальной организации Японии по исследованиям в сельскохозяйственной и продовольственной отраслях. — Поскольку энергия низкоэнергетических электронных пучков значительно меньше по сравнению с обычными электронными пучками, их можно встраивать в производственные процессы и использовать на месте». В рамках этого проекта проводилась разработка методов дозиметрии для мягкого рентгеновского излучения. В рамках нового текущего проекта координированных исследований, посвященного обработке с помощью низкоэнергетических пучков, совместно с партнерами из пищевой промышленности ведется разработка и распространение инновационного способа облучения пищевых продуктов на месте, а также разработка инструментов и методов дозиметрии для НЭЭП в отношении конкретных пищевых продуктов.

### Разработка общих методов обработки

За последние 15 лет объем товаров, облучаемых в целях фитосанитарной обработки, значительно увеличился во всем мире и достиг почти 100 000 тонн в год. Однако на рынке облученные пищевые продукты составляют лишь малую долю по сравнению с теми, которые обрабатываются с помощью других фитосанитарных мер. Например, по словам Гая Холлмана, специалиста в области фитосанитарии из Соединенных Штатов Америки, в одной только Мексике объем манго, которые проходят обработку горячей водой, составляет примерно 300 000 тонн в год. «Фитосанитарное

облучение имеет преимущества перед другими видами фитосанитарной обработки, такими как холод, тепло и фумигация, которые могут менять вкус или текстуру продуктов питания, — говорит он. — Увеличение числа международно признанных стандартов в области облучения может способствовать дальнейшему распространению этого метода обработки и расширению торговли».

Международная конвенция по карантину и защите растений (МККЗР), многосторонний договор, административные функции в отношении которого выполняет ФАО, устанавливает стандарты в области предотвращения распространения вредителей и борьбы с ними. По словам Блэкберна, эти стандарты лежат в основе всех двусторонних торговых соглашений в части обработанных фруктов и овощей, но в стандартах обработки методом облучения указаны только дозы излучения для конкретных сортов. Только 2 из 19 видов обработки с помощью облучения, признанных МККЗР, являются общими видами обработки, которые предотвращают распространение плодовых мух посредством торговли свежими овощами и фруктами и их размножение в новых местах, где они могут нанести ущерб сельскому хозяйству и окружающей среде.

В феврале 2022 года МАГАТЭ запустило проект координированных исследований для решения этой проблемы и разработки хотя бы пяти общих методов фитосанитарного облучения для принятия в рамках МККЗР в целях расширения коммерческого использования фитосанитарного облучения. По словам Блэкберна, эти новые общие методы облучения потенциально могут решить более 90% всех проблем, связанных с карантинном, которые возникают при торговле фруктами и овощами.

## Использование радиации для стерилизации медицинских изделий

Помимо использования в санитарных и фитосанитарных целях, а также для обеспечения качества пищевых продуктов, еще с 1950-х годов гораздо большие дозы излучения используются для стерилизации медицинских изделий. Обработка излучением является частью процесса производства почти половины всех одноразовых изделий в медицинской сфере, таких как бинты, перчатки, халаты, маски для лица, шприцы и другие изделия. Радиационная стерилизация уничтожает загрязняющие микроорганизмы, сохраняя свойства и характеристики продукта.

«Почти 50% медицинских изделий стерилизуется с помощью радиационных технологий: гамма-излучения, электронных пучков и рентгеновского излучения, причем эта тенденция набирает обороты, — отмечает Селина Хорак, руководитель Секции радиоизотопных продуктов и радиационной технологии МАГАТЭ. — Кроме того, ионизирующее излучение является эффективным и признанным инструментом для стерилизации средств индивидуальной защиты (СИЗ), которые были очень востребованы во время пандемии COVID-19».

В 2020 году, после начала пандемии, МАГАТЭ провело исследование, посвященное возможности стерилизации использованных медицинских изделий с помощью ионизирующего излучения. Это исследование показало, что существует возможность повторного использования облученной медицинской защитной одежды, за исключением респираторных масок, таких как маски N95 и FFP2. Было установлено, что в случае облучения использованных масок «у них значительно снижается эффективность фильтрации на субмикронном уровне». Это снижение, вероятно, связано с изменениями электростатических свойств фильтра из-за облучения.



# Нейтроны для нейронов и циклотроны для радиоизотопов

Михаэль Амди Мадсен

Глиобластома — это агрессивная злокачественная опухоль, на которую приходится около 15% от всех случаев опухолей головного мозга. Даже если сначала удается обеспечить контроль с помощью лечения, в итоге рак практически всегда возвращается. Операция и лучевая терапия могут продлить жизнь на несколько месяцев, но рак мозга обычно приводит к смерти в течение одного года — двух лет после постановки диагноза, и лишь менее пяти процентов пациентов живут дольше пяти лет. Как и глиобластома, многие опухоли мозга плохо поддаются лечению из-за чувствительности обычных тканей мозга к оперативному лечению и лучевой терапии. Однако есть надежда, что вскоре это может измениться, отчасти благодаря новым видам лечения, связанным с использованием ускорителей частиц, создающих мощные источники нейтронов.

«Когда заходит речь о ядерных реакциях, мало кто думает о том, что они могут происходить в голове человека. Но такое представление неверно», — рассказывает Иэн Суэйнсон, ядерный физик из МАГАТЭ. Он участвует в разработке руководства МАГАТЭ по применению ускорителей частиц для производства нейтронов, в том числе в медицинских целях. По его словам, особенно многообещающим является использование этой технологии для одного из способов лечения рака, а именно для бор-нейтронозахватной терапии (БНЗТ): «При некоторых видах рака мозга, головы и шеи обстрел нейтронами атомов бора может спасти жизнь».

БНЗТ предусматривает использование той разрушительной силы, которую могут вызывать нейтроны, и локализацию ущерба в пределах опухоли в максимально возможной степени. Использовать разрушительную способность нейтронов можно с помощью изотопов бора-10. «Бор-10 нерадиоактивен и отлично улавливает нейтроны. В результате в ходе крайне локализованной ядерной реакции бор распадается на два фрагмента, обладающих большой энергией. Таким образом, вводя пациенту специальные препараты, которые доставляют

бор-10 в опухолевые очаги, мы создаем большую мишень на раковой опухоли», — поясняет Суэйнсон.

БНЗТ все еще носит по большей части экспериментальный характер и не применяется широко. Однако ситуация меняется. В 2020 году БНЗТ начала применяться в клинических условиях на двух установках в Корияме и Осаке в Японии. В том же году МАГАТЭ и японский Университет Окаямы заключили договоренность об активизации сотрудничества в области БНЗТ путем проведения мероприятий, обмена знаниями и информацией, а также создания базы данных по установкам БНЗТ.

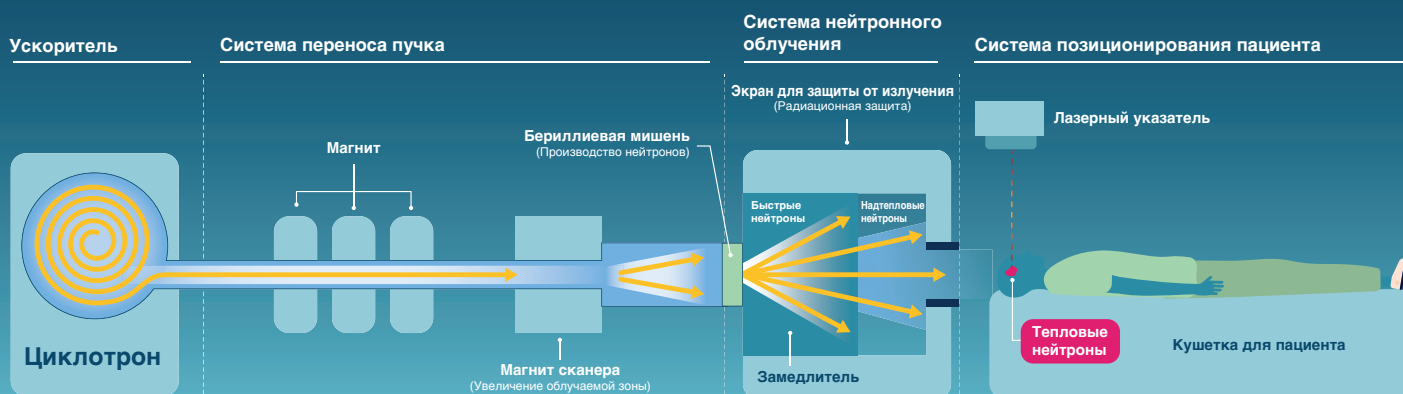
«БНЗТ — это передовой метод лечения рака, — отмечал тогда Хирофуми Макино, ректор Университета Окаямы. — Это удачное сочетание современной ядерной физики и новейшей фармацевтической клеточной биологии. Однако не стоит забывать о длительных сложностях при разработке этой непростой медицинской технологии».

В 2001 году МАГАТЭ подготовило технический отчет по БНЗТ, который стал справочным руководством в этой области. В то время единственными источниками нейтронов были исследовательские реакторы. Позже были разработаны компактные источники нейтронов на базе ускорителей нового поколения, которые могут быть установлены непосредственно в клиниках. Это привело к значительному всплеску интереса к БНЗТ.

Проекты, связанные с БНЗТ, также реализуются в Аргентине, Китае, Финляндии и Республике Корея. «20 лет назад использование нейтронов из ускорителей в лечении рака было лишь теорией. Сегодня это реальность, которая будет отражена в техническом документе под названием “Достижения в бор-нейтронозахватной терапии”, который мы готовим», — говорит Суэйнсон.



## Схематическое изображение одобренной для клинического применения системы БНЗТ в Японии



(Графика: А. Варгас Терронес/МАГАТЭ)

### Циклотронная революция

Для того чтобы определить целесообразность использования БНЗТ, пациенту необходимо ввести соединение бора, меченое фтором-18 ( $^{18}\text{F}$ ), который производят циклотроны, а затем провести визуализацию с помощью метода ядерной медицины, называемого позитронно-эмиссионной томографией в сочетании с компьютерной томографией (ПЭТ-КТ). Соединение, меченое  $^{18}\text{F}$ , называется 4-бор-2- $^{18}\text{F}$ -фтор-фенилаланин, или ФБПА.

«ФБПА — это важное соединение, так как оно дает врачам подтверждение того, что опухоль абсорбировала содержащее бор соединение и готова для применения БНЗТ. Без этого лечение может оказаться неэффективным. По мере расширения применения БНЗТ нам становятся необходимы циклотроны для удовлетворения потребностей в ФБПА», — говорит Амирреза Джалилиан, химик-специалист МАГАТЭ по радиоизотопам и радиофармпрепаратам. Циклотрон — это тип ускорителя частиц, который производит радиоизотопы, используемые в ядерной медицине, путем обстрела стабильных изотопов пучком частиц. В результате этого взаимодействия начинается ядерная реакция, при которой возникают короткоживущие радиоизотопы. Поскольку радиоизотопы распадаются быстро, их необходимо производить около места или на месте, где проводится лечение, и использовать сразу же.

По словам Джалилиан, хотя число исследовательских реакторов, используемых для производства радиоизотопов, довольно стабильно, по всему миру появляется все больше новых, многофункциональных и все более доступных циклотронов. Многие из короткоживущих радиоизотопов, используемых для лечения пациентов, могут производиться на циклотронах в больницах, и это главное преимущество данной технологии.

Одним из примеров является радиофармацевтический препарат фтордезоксиглюкоза. Для нее необходим  $^{18}\text{F}$ , который производится с помощью циклотронов. Этот радиоиндикатор используется примерно в 95% процедур ПЭТ-КТ, а также очень важен для нейровизуализации и диагностики рака.

Еще один часто используемый радиофармацевтический препарат — это галлий-68 ( $^{68}\text{Ga}$ ), который является ключевым компонентом некоторых тераностических радиофармпрепаратов (это тип препаратов, который предполагает использование радиоизотопов как для диагностики, так и для терапии, путем выброса излучения). Такие радиофармацевтические препараты играют важную роль в диагностике и последующем лечении онкологических заболеваний и особенно перспективны в борьбе с раком предстательной железы. Однако производство  $^{68}\text{Ga}$  сопряжено с некоторыми трудностями.

«Сегодня для производства  $^{68}\text{Ga}$  чаще всего используется система, которая не является ускорителем частиц и называется генератором. Однако генераторы просто не способны производить его в достаточных объемах для удовлетворения потребности. Циклотроны — это эффективный альтернативный способ прямого производства. Уже сегодня они способствуют существенному расширению доступности  $^{68}\text{Ga}$ », — отмечает Джалилиан, поясняя, что сегодня десять центров по всему миру постоянно используют циклотроны для производства  $^{68}\text{Ga}$ . В настоящее время МАГАТЭ осуществляет координацию исследовательского проекта, направленного на содействие обмену международным опытом в области производства  $^{68}\text{Ga}$  с помощью циклотронов, а в 2019 году Агентство выпустило публикацию «Циклотронное производство галлия-68», посвященную этой теме.

# Атомы, которые раскрывают тайны

## Аналитические методы, основанные на использовании ускорителей частиц, помогают выявлять подделки произведений искусства

Джоанн Лю

Изучение картины, как правило, начинается с установления личности художника и времени ее написания. И, по правде говоря, даже некоторые весьма высоко ценимые полотна скрывают в себе историю преступного обмана. Подделка произведений искусства может приносить большую прибыль и оставаться незамеченной, но методы анализа, включающие радиоуглеродное датирование с использованием ускорительной масс-спектрометрии (УМС), позволяют выявить фальшивки.

«Ядерные аналитические методы высокоэффективны при определении состава, происхождения, подлинности и возраста образцов или объектов и поэтому они имеют непосредственное отношение к криминалистике, — говорит Ализ Шимон, ядерный физик из МАГАТЭ. — В этой связи ядерные методы могут оказаться эффективным инструментом для решения таких разнообразных задач, как расследование случаев подделки произведений искусства, выявление незаконной торговли, обнаружение контрафактных продуктов питания и некачественных лекарств, а также анализ улики, например осколков стекла на месте преступления».

Криминалистика применяет научные методы и экспертные знания для изучения вещественных доказательств с целью оказания помощи в расследовании уголовных дел. Она включает в себя целый ряд дисциплин — от анализа ДНК и отпечатков пальцев до композиционного анализа и анализа стекла. Для анализа состава, структуры, возраста и других свойств материала в криминалистике используются ускорители частиц. «Рентгеновское излучение, нейтроны и ионы имеют преимущества по сравнению с обычными методами, — говорит Шимон. — Благодаря им возможно провести анализ одной частицы из миллионов и с большой точностью определить ее происхождение без нарушения целостности предмета, являющегося уликой».

### Радиоуглеродное датирование

Все живые организмы поглощают из атмосферы углерод, в том числе углерод-14, а значит его содержат и сделанный из натуральных волокон холст картины, и изготовленная из дерева рама. Углерод-14 — это нестабильный изотоп с известной скоростью распада. Когда растения и животные умирают, они перестают поглощать углерод, а уже накопленный ими радиоактивный углерод распадается. Используя УМС для измерения соотношения изотопов углерода, можно по количеству присутствующего углерода-14 определить возраст материала. Этот метод, известный как радиоуглеродное датирование, широко применяется для определения возраста окаменелостей, а в последнее время — для определения возраста предполагаемых подделок произведений искусства. «Учитывая период между заготовкой льна для холста и фактическим написанием картины, радиоуглеродная датировка холста позволяет определить наиболее раннее возможное время создания произведения», — говорит Люсиль Бек, руководитель лаборатории измерения возраста с помощью углерода-14 в Университете Париж-Сакле во Франции.

В новейшей истории количество углерода-14 в атмосфере колебалось, в частности, из-за испытаний ядерного оружия в середине 1940-х и в 1950-х годах. Приблизительно в 1964 году концентрация углерода-14 в атмосфере достигла пика и с тех пор снижается. «Мы можем легко определить материалы с содержанием радиоуглерода, обусловленного испытаниями современного оружия, из-за более высокого, чем в период до 1950-х годов, уровня концентрации в них углерода-14», — говорит Бек.

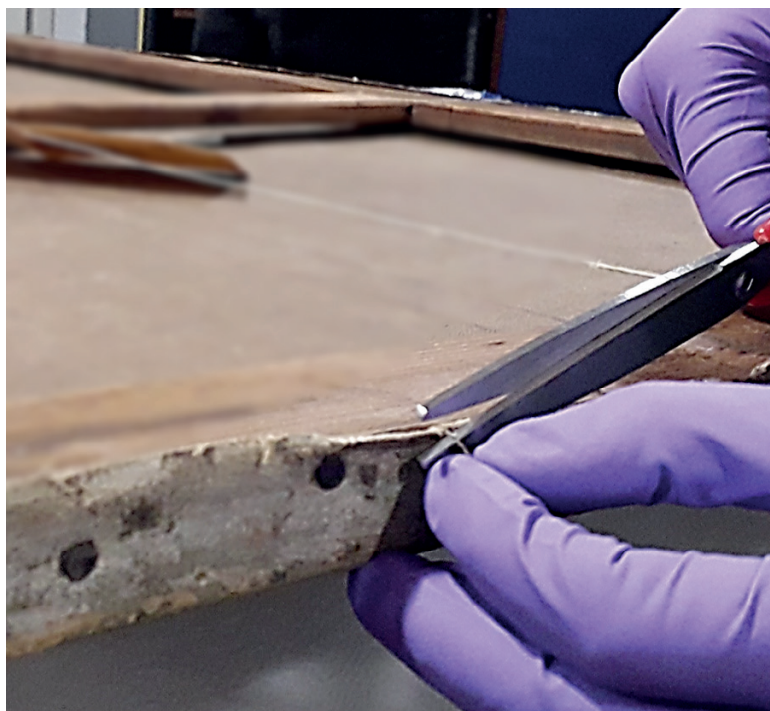
В 2019 году в ходе расследования случаев возможной подделки, проведенного Центральным бюро по борьбе с незаконной торговлей культурными ценностями Франции, Бек проверила две картины из коллекции, которые, как считалось, были написаны в конце XIX — начале XX века. Исследователи собрали образцы волокон с холстов и преобразовали их приблизительно в один миллиграмм углерода, чтобы затем провести измерение с помощью УМС.

«С помощью радиоуглеродного датирования с использованием УМС мы смогли доказать, что подделками были обе картины — и импрессионистская, и в стиле пуантилизма, — рассказывает Бек. — Судя по избытку углерода-14, обнаруженного в волокнах, картины вопреки утверждениям не могли быть написаны в начале XX века художниками, которые умерли в 1940-х годах. Состав волокон показал, что холсты были изготовлены в середине 1950-х годов или, вероятнее всего, после 2000 года». Измеренные уровни углерода-14 соответствовали уровням накануне пика 1960-х годов и после него.

### Ускорение ядерных технологий на службе криминалистики

В 2017 году МАГАТЭ приступило к реализации четырехлетнего проекта координированных исследований, посвященного совершенствованию методов ядерного анализа для удовлетворения потребностей криминалистики. Основное внимание в рамках проекта уделялось таким трем областям, как анализ стекла, установление происхождения пищевых продуктов и вопросы культурного наследия, включая расследования случаев подделки произведений искусства. В проекте принимали участие представители Бразилии, Венгрии, Вьетнама, Израиля, Индии, Италии, Португалии, Сингапура, Словении, Финляндии, Франции, Хорватии, Швейцарии и Ямайки. Некоторые результаты этого проекта — от анализа кофе до анализа образцов ветрового стекла, а также исследование о подделке произведений искусства во Франции — уже опубликованы в специальном выпуске журнала «Forensic Science International» («Международная криминалистика»).

В 2019 году МАГАТЭ совместно с Международным центром теоретической физики им. Абдуса Салама провело в рамках проекта семинар-практикум в Триесте, Италия. На семинаре-практикуме было продемонстрировано, как в ходе уголовных расследований основанные на использовании ускорителей методы могут дополнять стандартные методы криминалистики. Одновременно МАГАТЭ запустило электронный курс обучения по ядерным аналитическим методам в криминалистике.



### Из приписываемого художнику-импрессионисту полотна извлекают волокно для проверки подлинности произведения.

(Фото: Л. Бек/Университет Париж-Сакле)

Опираясь на успешные результаты проекта, МАГАТЭ в 2021 году подписало меморандум о взаимопонимании с Межрегиональным научно-исследовательским институтом ООН по вопросам преступности и правосудия (ЮНИКРИ) с целью активизации сотрудничества в области предупреждения и противодействия преступной деятельности с помощью достижений ядерной науки и технологий.

В качестве следующего шага МАГАТЭ планирует запустить последующий проект координированных исследований, направленный на выявление незаконной торговли объектами наследия и незаконной добычи драгоценных металлов.



# Квантовая модификация

## Использование ускорителей частиц для имплантации отдельных атомов в целях биозондирования

Джоанн Лю

В сфере квантовых технологий ускорители частиц активно используются в течение последнего десятилетия для изменения и определения характеристик материалов. С помощью методов, основанных на использовании ускорителей, высокоэнергетические ионы воздействуют на атомные структуры материалов, что позволяет ученым контролировать поведение отдельных атомов. Основное применение ускорителей связано с ионной имплантацией, которая широко используется в полупроводниковой промышленности и существует уже несколько десятилетий.

«В случае полупроводников большое число ионов имплантируется для изменения электрических свойств, например, кремния, — поясняет Эндрю Беттиол, доцент Национального университета Сингапура. — В случае квантовых технологий цель совершенно другая. Мы хотим контролировать ионы на уровне одного иона. Мы не имплантируем миллионы или миллиарды ионов; мы имплантируем ровно один ион».

Трудности, связанные с имплантацией одного иона, заключаются в определении того, когда и где имплантирован ион и имплантирован ли он вообще. «И даже если ион имплантирован в материал, это не значит, что он работает так, как должен работать в качестве кубита или центра окраски», — отмечает Беттиол. Кубиты, или квантовые биты, — это сложные версии несущих информацию битов, используемых в обычных вычислениях, а центры окраски — это дефекты, которые излучают свет, позволяющий осуществлять квантовое зондирование.

В мае 2021 года МАГАТЭ провело четырехдневный обучающий семинар-практикум по созданию материалов с помощью ионных пучков. В ходе семинара-практикума была представлена базовая информация о работе аппаратуры, обеспечивающей использование направленного ионного пучка, и об обнаружении отдельных ионов. В виртуальном семинаре-практикуме, который проводился в рамках проекта координированных исследований и был направлен на углубление понимания и привлечение новых участников в квантовую область, приняли участие более 80 человек, причем половина из них — из развивающихся стран. Проведение семинара-практикума также совпало с запуском курса электронного обучения МАГАТЭ «Разработка материалов с использованием ионных пучков для квантовых технологий», который направлен на вовлечение нового поколения экспертов в квантовой области.

«МАГАТЭ занимает лидирующие позиции в координации международного сотрудничества, исследований и разработок в области квантовых технологий в соответствии с национальными и международными инициативами, — говорит Ализ Шимон, ядерный физик, занимающийся ускорителями в МАГАТЭ. — МАГАТЭ продолжает свои усилия по проведению координированных исследований для реализации преимуществ квантовых технологий на благо общества». Новый проект МАГАТЭ, запуск которого ожидается позднее в этом году, будет способствовать развитию и оптимизации платформы биозондирования, основанной на использовании центров окраски в алмазе, что позволит исследовать субклеточные механизмы. В квантовой области алмазы используются в качестве полупроводников

для последовательного распознавания электрических и магнитных полей в отдельных живых клетках.

### Использование центров окраски в целях квантового зондирования

Алмаз в чистом виде представляет собой решетку из атомов углерода с более чем 500 задокументированными дефектами, которые излучают свет. Один из этих известных дефектов — это азотозамещенная вакансия (NV-центр окраски). NV-центр окраски возникает, когда один атом углерода удаляется, образуя вакансию, а соседний атом углерода замещается атомом азота. «NV-центры окраски могут возникать в природе и распределяться случайным образом. С помощью ускорителей мы можем искусственно создавать эти дефекты методом ионной имплантации и располагать их в определенных областях внутри наноразмерных кристаллов алмаза», — говорит Беттиол. Из известных дефектов алмаза NV-центр может быть интегрирован в наноразмерные кристаллы алмаза, и его можно контролировать при комнатной температуре. Кроме того, он является биосовместимым, то есть не вредным и не токсичным для живых систем.

NV-центры в алмазах обладают способностью определять магнитное поле с помощью метода, называемого оптически детектируемым магнитным резонансом, или ОДМР. Способность получать изображения магнитных полей имеет значение как для биологии, так и для материаловедения. «Это оптический способ изучения светового излучения и обнаружения очень маленьких

магнитных полей, возникающих в ходе биологических процессов, — поясняет Беттиол. — Этот метод квантового биозондирования может использоваться для визуализации или измерения процессов, протекающих на клеточном уровне и имеющих очень маленькое магнитное поле, как, например, магнитные поля, возникающие при работе нейронов в нашем мозге».

Текущий исследовательский проект Беттиола связан с применением метода ОДМР в целях выявления малярии. «Красные кровяные тельца, зараженные малярией, содержат крошечные магнитные частицы, которые можно обнаружить с помощью ОДМР, — отмечает он. — В принципе с помощью этого метода можно выявлять все, что создает электромагнитное поле».

В рамках предстоящего проекта МАГАТЭ будут продолжены исследования квантового зондирования с использованием ОДМР, а также определение характеристик и оптимизация устройств для зондирования. В основе нового проекта, который объединит исследователей, имеющих общие интересы в области биозондирования, лежит предыдущий проект, который был более масштабным и был направлен на развитие инструментов ионного пучка на базе ускорителей. «МАГАТЭ — отличная площадка для сотрудничества, вокруг которой сложилось сообщество экспертов, что позволяет обмениваться информацией и учиться друг у друга», — говорит Беттиол.

**Новый проект МАГАТЭ будет способствовать развитию и оптимизации платформы биозондирования, что позволит исследовать субклеточные механизмы.**

(Фото: Adobe Stock)



# Использование ядерных методов для разработки усовершенствованных материалов

Анасс Тархи

От «активной» упаковки для пищевых продуктов на основе нанокompозитов с добавлением эфирных масел до радиационно-привитых суперабсорбирующих полимеров — облученные материалы с улучшенными свойствами играют все более важную роль в сокращении пищевых отходов, повышении производительности сельского хозяйства, улучшении здравоохранения и во многих других областях.

Помимо небольшого веса и простоты в изготовлении, усовершенствованные материалы, модифицированные с помощью ядерных методов, обладают улучшенными эксплуатационными характеристиками и долговечностью. Важную роль в этом контексте приобретают радиационные технологии, включая ускорители частиц, которые за счет множества вариантов практического применения вносят свой вклад в обеспечение устойчивого развития.

## Способы использования усовершенствованных материалов

Сегодня для создания усовершенствованных материалов или повышения эффективности производства материалов с высокими характеристиками в промышленности уже разработаны и применяются несколько технологических процессов с использованием излучения. Например, благодаря улучшению свойств пластмасс и резины под воздействием излучения из них можно производить различные изделия, такие как пластиковые трубы, устойчивые к воздействию тепла и давления, которые используются для циркуляции воды и теплоносителя в зданиях.

«Полученные с применением излучения материалы с высокими характеристиками можно встретить где угодно и в чем угодно, — отмечает Селина Хорак, руководитель Секции радиоизотопных продуктов и радиационной технологии МАГАТЭ. — Они встречаются в повседневных

предметах, которые благодаря им становятся прочнее и безопаснее. Некоторые из этих материалов даже используются для того, чтобы сделать наш образ жизни более экологичным».

Обработка излучением применяется также для сушки или отверждения не содержащих растворителей красок, чернил и покрытий, а также для повышения прочности, термостойкости и непроницаемости упаковочных материалов, созданных на основе биотехнологий, и биоразлагаемых упаковочных материалов. Например, сегодня в разных странах для очистки воды в сельских районах используется производимая на месте пористая керамика с наночастицами серебра.

## Преимущества усовершенствованных материалов в контексте изменения климата

Для того чтобы удовлетворить растущий спрос на энергию и одновременно бороться с изменением климата, необходимы дальнейшие разработки в области производства возобновляемой энергии, ее хранения и повторного использования. «Радиационные технологии хорошо подходят для изготовления мембран с конкретными свойствами и порошковых композитов для технологии топливных элементов, чтобы более эффективно получать возобновляемую энергию», — говорит Ксавье Кокре, профессор Университета Шампань — Арденны в Реймсе. По его мнению, предварительная обработка излучением может использоваться для повышения качества лигноцеллюлозной биомассы или преобразования энергии солнечного света с помощью усовершенствованных фотоэлектрических установок.

Что касается решения еще одной экологической проблемы, а именно проблемы глобального бремени пластиковых отходов, то, по словам Кокре, при создании усовершенствованных пластиковых и композитных

изделий, которые с помощью традиционных методов было бы невозможно использовать повторно, необходимо предусматривать эффективные методы переработки с использованием излучения (см. стр. 10).

## Воздействие излучения на усовершенствованные материалы

Прочные, износостойкие и долговечные материалы имеют критическое значение для промышленности в целом, но особенно важны в ядерном секторе, где от используемых материалов зависит безопасность реакторов и осуществимость операций топливного цикла. В случае материалов, используемых в ядерных реакторах, выделяются два наиболее существенных фактора воздействия — это тепло, которое отводится системами охлаждения, и излучение.

«Конструкционные материалы внутри ядерных реакторов подвергаются разрушительному воздействию быстрых нейтронов, которые выбивают атомы и приводят к формированию газообразного водорода или гелия. В конечном итоге это может приводить к радиационному набуханию, образованию пустот и другим структурным и механическим изменениям, ограничивающим срок их службы, — отмечает Иэн Суэйнсон, ядерный физик из МАГАТЭ. — Поэтому большое значение имеет тестирование материалов на устойчивость к излучению, и ускорители помогают сделать такое тестирование более доступным».

В конце своего прохождения через материалы заряженные частицы теряют большую часть своей энергии, вызывая значительные, но локализованные повреждения. По этой причине исследователи планируют испытывать материалы, которые потенциально могут использоваться в будущих ядерных реакторах, с помощью заряженных частиц, генерируемых ускорителями пучка ионов.

«Испытывать материалы с помощью ускорителя быстрее, чем с помощью реактора», — говорит Суэйнсон, поясняя, что с помощью ускорителя за один день можно сделать то, на что в случае использования испытательного реактора с высокой плотностью нейтронного потока потребовался бы год. Как правило, образцы не становятся радиоактивными, и поврежденные участки можно аккуратно отделить и исследовать с помощью микроскопа.

В 2016 году Суэйнсон участвовал в организации пятилетнего проекта координированных исследований МАГАТЭ, в рамках которого образцы одного и того же материала были направлены на множество ускорительных установок для облучения при идентичных условиях и на российский исследовательский реактор на быстрых нейтронах БОР-60 для сравнения. Анализ после облучения поможет улучшить воспроизводимость данных на разных ускорительных установках и покажет, насколько эффективно ускорители выявляют материалы с плохими характеристиками.

В августе 2022 года МАГАТЭ проведет вторую Международную конференцию по применению радиационной науки и технологий (ИКАРСТ-2022), на которой будут рассматриваться эти вопросы и обсуждаться направления применения ионизирующего излучения и разработки в этой области. Среди прочего, конференция будет посвящена достижениям и имеющимся технологическим и экономическим ограничениям в конкретных областях, связанных с усовершенствованными материалами, а также поможет проанализировать успешную практику применения уже зарекомендовавших себя радиационных процессов, используемых для улучшения характеристик материалов.

**Стержневые элементы, используемые в ядерных реакторах, изготавливаются из усовершенствованных материалов, и они должны быть устойчивы к воздействию тепла и излучения.**

(Фото: Adobe Stock)



# Развертывание установок, использующих ионизирующее излучение, на Филиппинах и за их пределами

Пуджа Дая

По данным Глобальной службы по наблюдению за раком, в 2020 году рак являлся второй по распространенности причиной смерти на Филиппинах — онкологические заболевания в этой стране ежегодно уносят жизни почти 100 000 человек. Первостепенное значение для сокращения смертности имеет раннее выявление опухолей, однако при средней стоимости медицинской визуализации около 2000 долларов США многие филиппинцы не могут ее себе позволить.

«Одной из основных проблем на Филиппинах является недостаток ресурсов для развития и поддержания системы диагностики рака. Из-за этого многие случаи рака не диагностируются и не лечатся», — говорит директор Филиппинского института ядерных исследований Карлос Арсилья. Арсилья и его сотрудники надеются решить проблему недостаточного потенциала за счет ввода в работу в Маниле нового циклотрона — использующей ионизирующее излучение установки, которая позволит производить крайне важные для диагностики и лечения рака, а также заболеваний головного мозга и сердечно-сосудистой системы радиофармацевтические препараты.

В настоящее время Филиппины располагают лишь четырьмя циклотронами — все они находятся в частной собственности, а ограниченные возможности страны в области позитронно-эмиссионной томографии в сочетании с компьютерной томографией (ПЭТ-КТ) приводят к тому, что рак своевременно диагностируется только у 5 процентов онкологических больных. Циклотроны — это ускорители, которые используются для производства радиофармацевтических препаратов. Эти препараты вводят пациентам перед процедурой ПЭТ-КТ — медицинским сканированием, в процессе которого формируются высококачественные

трехмерные изображения, в основном, органов и тканей, помогающие обнаружить заболевание и визуализировать опухоль. Благодаря новому циклотрону Филиппины смогут самостоятельно производить больше радиофармпрепаратов для расширения доступа к ПЭТ-КТ.

Новый Центр исследований и инноваций в области ядерной медицины, в котором установлен принадлежащий государству циклотрон и сканер ПЭТ-КТ, обеспечит возможность точного стадирования онкологических заболеваний в среднем еще у 5000 пациентов в год.

«Мы стремимся производить радиофармпрепараты как для Центра, так и для соседней Филиппинской больницы общего профиля в Дилимане, что дает нам возможность обслуживать больше пациентов и выполнять задачи, связанные с исследованием рака», — говорит Арсилья. По его словам, Центр станет также ключевой учебной площадкой для региона, благодаря чему Филиппины и соседние страны смогут обрести самодостаточность в вопросах производства и использования радиофармацевтических препаратов.

## Преимущества новых установок, использующих ионизирующее излучение

Радиоизотопы и пучки частиц, получаемые с помощью использующих ионизирующее излучение установок, например, циклотронов, синхротронов и ускорителей других типов, применяются в таких сферах, как медицина и здравоохранение, водная безопасность, продовольствие и сельское хозяйство, научные исследования, производство энергии, производство промышленных и потребительских товаров, криминалистика и сохранение культурного наследия.





Проблему обеспечения более широкого и менее затратного доступа к таким преимуществам решит создание по всему миру большего количества специализированных центров на основе ускорителей. Поэтому, наряду с Филиппинами, новые центры создаются при поддержке МАГАТЭ в Аргентине, Малайзии и Таиланде.

Спрос на установки, использующие ионизирующее излучение, растет по всему миру, и в целях оказания странам более эффективной помощи в удовлетворении этого спроса МАГАТЭ планирует в этом году выпустить руководящие материалы по развертыванию установок, использующих ионизирующее излучение. «Благодаря этому руководству лица, участвующие в разработке использующих ионизирующее излучение установок, смогут обеспечить тщательную организацию работ по запуску проекта, способствовать успешному ходу его осуществления, а после ввода установки в эксплуатацию и начала предоставления услуг — обеспечить также полномасштабное использование установки. Именно с этой целью в публикации будут сведены воедино экспертные рекомендации в отношении внедрения новых установок, а также совершенствования уже имеющихся», — говорит Нуну Песоа Баррадаш, ответственный за подготовку публикации специалист МАГАТЭ по исследовательским реакторам.

Установки, использующие ионизирующее излучение, могут быть оснащены оборудованием различных типов, предназначенным для обработки ионизирующим излучением. В Таиланде Научно-исследовательский институт синхротронного излучения планирует строительство второго синхротрона. Первый в стране синхротрон (см. фото) действует уже 20 лет и обеспечивает тайским экспертам устойчивую основу для использования ионизирующего излучения для сохранения объектов культурного наследия (см. стр. 8), проведения криминалистических расследований (см. стр. 16) и содействия исследованиям и разработкам.

«Это установка оказала значительное влияние на ситуацию в стране, — говорит Супаргорн Ругмай, помощник директора по учебной работе и руководитель отдела исследовательских установок Научно-исследовательского института синхротронного излучения. — На начальном

этапе ощущалась нехватка знаний, но благодаря разработанным на региональном уровне программам подготовки мы постепенно становимся экспертами в этой области. С помощью новой установки мы сможем приносить еще большую пользу обществу и осваивать новые направления применения этой технологии».

Источники синхротронного излучения способствуют реализации и расширению промышленных, медицинских и фундаментальных научных исследований. Достигаемая новым синхротроном в Таиланде энергия частиц будет в 2,5 раза превышать возможности старой установки. Синхротрон будет использоваться для содействия научно-исследовательской деятельности и, благодаря использованию высокоинтенсивного рентгеновского излучения для нужд промышленного производства и инноваций, улучшит экономическое положение страны.

Специалисты в Аргентине и Малайзии также разрабатывают новые электронно-пучковые ускорители. Они позволят нарастить производство радиоизотопов для медицинской диагностики и лечения и будут способствовать развитию исследовательской деятельности и технологий в этих странах.

В рамках своей программы технического сотрудничества МАГАТЭ направляет экспертов в Аргентину, Малайзию, Таиланд, на Филиппины и в другие страны, чтобы оказывать помощь в вопросах безопасного развертывания и обслуживания установок, использующих ионизирующее излучение, подготавливая местных специалистов к тому, чтобы они могли самостоятельно управлять этими установками и обслуживать их. В дополнение к этой помощи МАГАТЭ публикует нормы безопасности, проводит виртуальные учебные мероприятия, а также предоставляет услуги платформы электронного обучения — Портала знаний об ускорителях. На этом сайте, созданном в интересах и при участии экспертов в области ускорителей, представлены учебные материалы, информация об ускорителях в разных странах мира и многое другое.

### **Синхротрон в Технологическом университете Суранари, Таиланд, применяется для нужд сельского хозяйства, медицины, фармацевтики и промышленности.**

(Фото: Научно-исследовательский институт синхротронного излучения)





# Обеспечение безопасного, надежного и мирного использования облучательных установок в контексте законодательной деятельности

Энтони Уотеролл и Чэньчэнь Лян

Безопасное, надежное и мирное использование ядерных технологий дает обществу большие преимущества, однако ионизирующее излучение, являющееся неотъемлемым атрибутом самых разных применений, может создавать значительные риски для здоровья людей и окружающей среды. Для того чтобы минимизировать такие риски, необходимы хорошо структурированные правовые механизмы, с помощью которых можно оценивать, ограничивать и контролировать воздействие излучения.

Важное место во многих областях, связанных с ядерными технологиями (см. стр. 22), занимают установки, использующие ионизирующее излучение (УИО), которые не несут радиационных рисков по сравнению с атомными электростанциями, и, соответственно, на них не распространяются те требования в области радиационной безопасности и физической ядерной безопасности, которые применимы к ядерным реакторам. В отношении УИО и связанной с ними деятельности должны применяться нормы безопасности в соответствии с дифференцированным подходом. Это подразумевает, что они должны подлежать лицензированию, регулированию и проверке со стороны регулирующих органов.

Фундаментальную ответственность за создание, поддержание и укрепление всеобъемлющих национальных правовых основ, включая нормативно-правовую базу, несут государственные институты. Во многих странах правовая иерархия такова, что на верхнем уровне находятся конституционные инструменты, которым подчинена законодательная база, определяемая на законодательном уровне и состоящая из принятых законов.

Такая законодательная база обеспечивает юридические основания для применения юридически обязывающих и необязывающих документов, таких как Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами и Кодекс поведения по обеспечению безопасности и сохранности радиоактивных источников, а также соответствующих норм безопасности МАГАТЭ и руководящих материалов по физической ядерной безопасности.

Законодательная база является основой для системы регулирующего контроля и предусматривает создание или назначение регулирующего органа, обладающего необходимой независимостью, людскими и финансовыми ресурсами и четко определенным набором функций. К ним относятся нормотворчество, выдача разрешений,

проведение инспекций и обеспечение соблюдения требований, а также четкое разграничение и координация обязанностей. Такая законодательная база необходима для безопасного, надежного и мирного использования ионизирующего излучения, и многие страны рассчитывают на поддержку МАГАТЭ в ее создании.

## Законодательный процесс не всегда идет легко

Уже много лет правительства стран обращаются за помощью в создании или укреплении национальной правовой базы в области ядерных технологий. «Как показывает опыт, разработка законодательства в ядерной сфере не всегда является простой задачей, — говорит руководитель Секции ядерного и договорного права МАГАТЭ Вольфрам Тонхаузер. — Есть три общие технические области — ядерная безопасность, физическая безопасность и гарантии. И все они должны быть охвачены адекватным и всесторонним образом».

Кроме того, национальное ядерное законодательство должно соответствовать конституционным и институциональным требованиям правовой системы каждой страны, при этом в максимально возможной степени обеспечивая гармонизацию и согласованность с законодательной базой других стран в ядерной сфере.

Законодательным и директивным органам важно признавать особый характер ядерных технологий и их применения, не в последнюю очередь в связи с тем, что они могут быть связаны с политическими, конфиденциальными и стратегическими вопросами, а также с рисками в области безопасности, имеющими национальное, международное и региональное значение. Кроме того, законодателям необходимо учитывать межотраслевой характер ядерных технологий и связанных с ними установок и видов деятельности, поскольку они могут встречаться в различных секторах и областях, таких как здравоохранение, энергетика, промышленность, транспорт, водные ресурсы, продовольствие и сельское хозяйство.

Соответственно, законотворчество требует всесторонней оценки различных существующих и применимых в данном контексте регламентированных подходов, законов, а также нормативно-правовой базы и механизмов. Нередко требуется внести серьезные или комплексные изменения в существующие подходы, что влечет за собой значительные межучрежденческие проблемы в области

регулирования. Для многих законодателей ядерная отрасль является узкоспециализированной, сложной и технической областью, и это часто предполагает использование в национальном законодательстве технической терминологии и определений.

Для решения этих и других проблем МАГАТЭ оказывает поддержку национальным компетентным органам по линии программы законодательной помощи. Она осуществляется в рамках программы технического сотрудничества МАГАТЭ с целью повышения осведомленности и создания потенциала в области ядерного права, что позволяет разрабатывать нормы ядерной безопасности и физической безопасности, в том числе применительно к установкам, использующим ионизирующее излучение, а также применительно к аспектам их лицензирования, регулирования и инспектирования.

Многогранная программа помощи МАГАТЭ предусматривает организацию встреч с лицами, принимающими решения, политиками, старшими должностными лицами и законодателями, такими как парламентарии; проведение национальных, субрегиональных и региональных семинаров-практикумов для широкого круга должностных лиц; анализ законопроектов и принятых законов в ядерной области. Эта программа также способствует созданию потенциала на основе профильных учебных мероприятий, таких как Институт ядерного права. Это ежегодная двухнедельная учебная программа в области ядерного права, которую

организует МАГАТЭ и которая посвящена вопросам разработки законодательства. Лишь за последнее десятилетие в Институте ядерного права прошли подготовку более 500 должностных лиц, было проведено более 200 двусторонних мероприятий по разработке законодательства, а также 53 национальных семинара-практикума и 18 региональных и субрегиональных семинаров-практикумов.

В последнее время организуются вебинары по ядерному праву, которые способствовали развитию диалога с государствами-членами в этой области. За последние десять лет более десяти стран в Азиатско-Тихоокеанском регионе, десять стран в Европе и более двадцати стран в Африке благодаря законодательной помощи МАГАТЭ приняли новое законодательство или пересмотрели действующие нормы. Бруней-Даруссалам и Филиппины, где недавно были установлены циклотроны, а также Иордания, где теперь эксплуатируются ускорители, — это лишь несколько примеров стран, которые получили такую помощь. Наконец, авторитетными источниками информации в этой области по-прежнему остаются такие публикации МАГАТЭ, как «Справочник по ядерному праву» и особенно «Справочник по ядерному праву: имплементирующее законодательство».

**Лишь за последнее десятилетие в Институте ядерного права прошли подготовку более 500 должностных лиц.**

(Фото: Д. Кальма/МАГАТЭ)





# Что нужно знать об ионных пучках

## Пуджа Дая и Сотириос Харисопулос

Ученые используют ионные пучки для решения самых разных задач, например, для определения происхождения загрязнителей, установления характеристик загрязнителей в пищевых продуктах, визуализации отдельных биологических клеток или датировки объектов исторического наследия. Но что такое ионные пучки и как с ними работают?

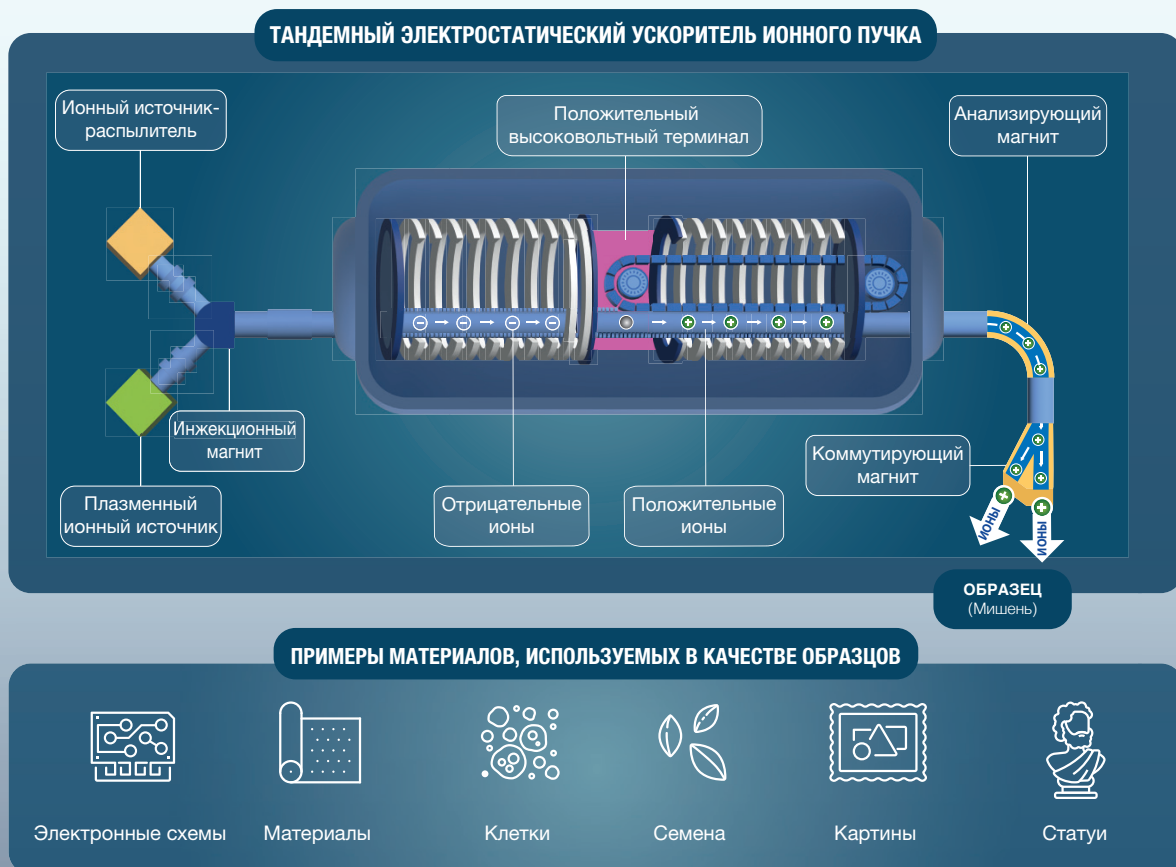
Ионные пучки — это потоки электрически заряженных атомов, как и следует из их названия. Ионы в пучке генерируются специальными приборами, называемыми ионными источниками. При попадании в электрическое поле, которое создается в ускорителе частиц, они набирают скорость и направляются и фокусируются магнитными полями таким образом, чтобы двигаться по параллельным траекториям в вакууме в металлической трубке. В зависимости от типа ускорителя ионные пучки могут разгоняться до скорости, близкой к скорости света.

В случае тандемных электростатических ускорителей (см. рисунок) пучки ионов бомбардируют образец материала или исследуемый объект. В результате взаимодействия с материалом ионы в пучке могут менять свою траекторию, либо их столкновение может привести к выбросу частиц или излучения, в основном в виде

рентгеновского или гамма-излучения. Затем это излучение можно зафиксировать и проанализировать.

Свойства энергии и испускаемого излучения позволяют получить подробную информацию о составе образца, подвергнутого бомбардировке, например, имеет ли он кристаллическую структуру, какова его твердость и физические свойства, представляющие интерес с точки зрения новых технологий. Образцы материалов или объектов, которые подвергаются бомбардировке, также могут различаться по форме и фазам составляющего их вещества, и могут представлять собой тонкую фольгу, небольшие кусочки почвы, клетки человека, животных или растений, семена, камни, жидкости или даже исторические объекты или статуи. В зависимости от формы и состава материала бомбардировка его ионами может происходить в вакууме или в воздушной среде.

Благодаря своим уникальным возможностям для анализа и модификации материала ускоренные ионные пучки используют в самых разных целях. В мутационной селекции растений ионные пучки используются для облучения растительного материала или саженцев, что позволяет ускорить процесс их естественной эволюции





путем индуцирования мутаций, чтобы получить более урожайные или устойчивые к болезням и засухе сорта.

Протоны и другие ионы широко используются для производства радиоизотопов, необходимых для создания радиофармацевтических препаратов для диагностики и лечения рака. В терапии рака пучки протонов и ионов углерода используются для бомбардировки раковых опухолевых клеток, особенно когда альтернативная терапия невозможна. Эти пучки доставляют энергию к опухоли, чтобы нагреть ее и разрушить.

В связи с растущим спросом на более прочные и качественные материалы широкий спектр ионных пучков также применяется для модификации свойств материалов и повышения их прочности. В качестве примера можно привести космические корабли и термоядерные реакторы, где требуются материалы, способные выдерживать высокий уровень радиации.

### Электронные пучки

Как и ионные пучки, электронные пучки представляют собой потоки электронов, генерируемые источниками электронов в различных ускорителях. Они используются для получения рентгеновских лучей, которые находят применение в медицине для облучения и уничтожения раковых клеток. Электронные пучки и рентгеновские лучи используются также для облучения продуктов питания в целях уничтожения опасных бактерий без ухудшения питательной ценности, качества и вкуса продуктов.

### Будущий проект МАГАТЭ по строительству ионно-пучковой установки

Технологии ионных и электронных пучков могут приносить пользу странам по всему миру, и МАГАТЭ планирует построить собственную современную тандемную ионно-пучковую установку (ИПУ) в Зайберсдорфе, Австрия. Располагая этим ускорителем, МАГАТЭ сможет поддерживать исследования и содействовать обучению и подготовке ученых со всего мира в различных областях применения ионных пучков, в том числе для получения вторичных частиц в виде нейтронов.

«Пучки частиц можно рассматривать как уникальные зонды, которые могут использоваться не только для расширения нашего понимания Вселенной, но и для анализа и извлечения пользы из физических явлений, способных улучшать жизнь и способствовать экономическому росту, — говорит начальник Секции физики МАГАТЭ Данас Ридикас. — Ускорители частиц — это экономически эффективная инвестиция, помогающая достичь устойчивого развития. С помощью нового тандемного ускорителя ионного пучка МАГАТЭ сможет более активно помогать странам в укреплении их потенциала в области технологии ускорителей и их применений».

Для того чтобы в рамках проекта ИПУ построить тандемный ускоритель, предусмотреть необходимую инфраструктуру и соответствующие приборы, а также обеспечить ресурсы, необходимые для функционирования установки, МАГАТЭ рассчитывает привлечь около 4,6 млн евро.



(Графика: А. Варгас Терронес/МАГАТЭ)

# Использование облучения в промышленности — чтобы сделать мир лучше

Михаэль Амди Мадсен

*Слово «излучение» вызывает у некоторых людей страх. Однако облучение вот уже более 100 лет играет невидимую, полезную и часто ключевую роль в сфере промышленности и безопасности пищевых продуктов. Технологии облучения являются неотъемлемой частью современного мира — будь то их применение для стерилизации медицинских приборов, обеззараживания свежих овощей и фруктов или повышения стойкости промышленных полимеров.*

*Чтобы лучше понять роль промышленного облучения и узнать, как развиваются технологии в этой области, мы поговорили с Полом Уинном — председателем и генеральным директором Международной ассоциации облучения (МАО).*

*МАО — это некоммерческая организация, в которую входят корпорации, исследовательские институты, университеты и правительственные органы со всего мира. Она поддерживает работу связанных с облучением отраслей и научных сообществ на мировом уровне.*



**В.: В каких областях промышленное облучение с применением ускорителей оказывает наибольшее влияние и в каком направлении, по вашему мнению, развивается эта технология?**

**О.:** Вот уже около 60 лет ускорители используются в промышленных масштабах для улучшения свойств полимеров. Одно из основных применений — обработка изолирующего материала для кабелей с целью повышения устойчивости к воздействию высоких температур, что способствует обеспечению пожарной безопасности и долговечности оборудования. Существует множество других применений, в основе которых лежат другие методы химического модифицирования с помощью электронных пучков, например создание древесно-полимерного композита для напольных покрытий или производство пеноматериалов, используемых в автомобильной промышленности. Многие из этих способов применения являются патентованными разработками и применяются на производственных площадках.

Внедрение ускорителей большой мощности расширило спектр продуктов, которые могут подвергаться обработке, благодаря чему эта технология стала конкурировать с облучением гамма-лучами, создаваемыми источниками на основе радионуклида кобальт-60. В результате стала возможной стерилизация медицинских приборов и упаковки, обработка фармацевтических ингредиентов и компонентов косметических средств, а также противомикробная обработка пищевых продуктов. До этого в таких случаях в основном использовалось гамма-облучение.

**В.: Можно ли говорить о переходе от облучения с помощью радиоактивного источника к технологиям на основе ускорителей?**

**О.:** Такая тенденция есть, и она в основном касается стерилизации медицинских приборов там, где быстро растет спрос на них и, соответственно, на их стерилизацию. В случае чуть менее чем половины мирового объема приборов, требующих стерилизации, предпочтительным методом является стерилизация облучением, причем более 80% этих объемов приходится на гамма-стерилизацию. В силу различных обстоятельств, некоторые из которых могут иметь временный характер, в последнее время предложение кобальта-60 не успевает за ростом спроса. Производители медицинского оборудования обычно не имеют предпочтений в выборе того или иного метода, они просто хотят, чтобы их продукция стерилизовалась должным образом.

Гамма-стерилизация с помощью источников на основе кобальта-60 имеет два больших достоинства: простота и надежность. У ускорителей также есть свои преимущества: для их работы требуется только электричество, и процесс испускания ионизирующего излучения можно приостановить. Какая из этих технологий будет доминировать в будущем, решат рыночные силы, но на данный момент важно, чтобы все они оставались доступными, ведь все они нужны для удовлетворения спроса на стерилизацию.

Следует отметить, что с точки зрения потенциала для обработки излучением все, что может быть обработано с помощью электронно-пучкового ускорителя, может быть обработано и с помощью гамма-излучения, но



не наоборот. Однако некоторые ускорители могут оснащаться металлической мишенью, которая преобразует электронный пучок в рентгеновские лучи, характеристики которых схожи с гамма-лучами.

**В.: Спрос на прикладные решения для промышленности на основе ускорителей растет, особенно в развивающихся странах. Какие проблемы необходимо преодолеть, чтобы эти технологии стали более доступными?**

**О.:** Вполне вероятно, что первенство в поддержании роста рынка традиционных методов гамма-облучения в будущем перейдет к ускорителям. Число поставщиков ускорителей превышает число поставщиков источников на основе кобальта-60, но остается ограниченным — в случае установок высокой энергии и большой мощности их насчитывается около дюжины, а в случае ускорителей с возможностью работы на рентгеновских лучах — гораздо меньше. Разработка рентгеновских систем остается ограниченной, но быстро развивается за счет эффекта низкой базы.

Во многих развивающихся странах ускорители пока не получили широкого распространения. Среди основных причин такой ситуации можно назвать потребность в больших инвестициях, сложность оборудования по сравнению с гамма-облучателями, а также отсутствие достаточного и стабильного электроснабжения. Людские ресурсы, финансовые ограничения и соблюдение требований безопасности — это те препятствия, которые, вероятно, можно преодолеть легче, чем проблемы инфраструктуры и размера рынка. На данный момент технологии на основе ускорителей, судя по всему, не подходят для всех развивающихся стран.

**В.: МАО и МАГАТЭ сотрудничают в рамках различных инициатив, таких как международные конференции и семинары-практикумы для молодых ученых. Как это способствует более широкому использованию технологии ускорителей?**

**О.:** Цели ассоциации совпадают с некоторыми задачами МАГАТЭ. МАО придерживается принципа технологической нейтральности в поддержке безопасного и полезного использования радиационных технологий. В то время как партнерами МАГАТЭ являются правительства и соответствующие государственные учреждения, МАО в основном представляет игроков рынка промышленного облучения. Число инициатив, в рамках которых МАО сотрудничает с МАГАТЭ, растет.

**В.: Какие разработки в области промышленного облучения на основе ускорителей вызывают у вас наибольший интерес? Что может кардинально изменить ситуацию?**

**О.:** Поточное облучение электронами низкой энергии и низкоэнергетическими рентгеновскими лучами — это очень перспективный новый подход. Благодаря использованию уменьшенных ускорителей и ламп-излучателей, эта инновация может сделать облучение доступным для производителей во многих отраслях. Потенциальные варианты применения ограничиваются характером проникновения низкоэнергетических лучей в материалы, но преимущество таких излучателей в том, что они компактны и могут быть интегрированы в производственные линии. Первоначальные варианты применения включают стерилизацию шприцев перед их заполнением в фармацевтической промышленности и стерилизацию материалов на высокой скорости на линиях асептической упаковки молока и безалкогольных напитков.

Например, одна швейцарская компания разработала установку для обеззараживания ингредиентов пищевых продуктов размером с большой шкаф. Такие системы используются также в борьбе с вредителями методом стерильных насекомых, лидером в применении которого является МАГАТЭ, и в исследованиях в области радиационной биологии. Для расширения области потенциального применения, особенно с использованием компактных низкоэнергетических рентгеновских систем, необходимо предпринимать дополнительные усилия, но эта технология, несомненно, способна кардинально изменить ситуацию.

# MYRRHA: система для обращения с радиоактивными отходами на базе ускорителя

Хамид Айт Абдеррахим



Хамид Айт Абдеррахим — заместитель генерального директора SCK CEN по международным делам, а также директор собственно проекта MYRRHA и его некоммерческой организации. Он является профессором физики реакторов и ядерной техники Католического университета Лувена, а также координатором и партнером различных проектов Европейской комиссии, связанных с прогрессивными

ядерными системами, разделением высокоактивных ядерных отходов и управлением трансмутацией. Будучи членом различных научных советов, исследовательских организаций и международных институтов, в 2014 году он был удостоен королем Бельгии степени Великого офицера Ордена Короны за вклад в области изучения проблем ядерной энергии и замыкания топливного цикла.

Одно из основных — и ложных — возражений, которое иногда приводят против использования ядерной энергии, заключается в том, что «у проблемы ядерных отходов нет решения». Отработавшее ядерное топливо, которое не было переработано, остается радиотоксичным выше уровней, характерных для природной урановой руды, в течение примерно 300 000 лет, причем большая часть урана и плутония в нем остается неизрасходованной. Хотя технические решения для столь долгосрочного захоронения существуют, есть и другой путь: регенерация ядерного топлива.

И уран, и плутоний могут быть регенерированы из отработавшего топлива путем переработки и использованы в новом ядерном топливе для дальнейшего производства электроэнергии. Однако после стандартного процесса переработки остаются младшие актиниды — близкие к урану элементы периодической таблицы, которые невозможно сжечь в современных энергетических реакторах. Содержащим их

радиоактивным отходам все равно требуется 10 000 лет, чтобы вернуться к естественному уровню излучения.

MYRRHA (Многоцелевой гибридный исследовательский реактор для высокотехнологичных применений) — это проект, который в настоящее время находится на этапе строительства в Бельгийском центре ядерных исследований (SCK-CEN) и основан на концепции электроядерной системы (ЭЛЯС), направленной на решение проблемы актинидов, а именно младших актинидов. Цель этого проекта состоит в том, чтобы продемонстрировать на инженерном уровне работу ЭЛЯС и целесообразность трансмутации младших актинидов в промышленных масштабах. Благодаря снижению радиотоксичности это может уменьшить объем высокоактивных отходов на 99 процентов, а срок их хранения — всего до 300 лет.

От большинства действующих реакторов проект MYRRHA отличают два важных аспекта. Во-первых, в нем используются быстрые нейтроны, которые необходимы для деления младших актинидов. Во-вторых, он может функционировать в подкритическом режиме (т.е. не вызывая самоподдерживающуюся цепную реакцию деления), так как соединен с сильноточным протонным ускорителем, генерирующим необходимые первичные нейтроны в центре активной зоны реактора посредством реакций скальвания. Это необходимо для управления реактивностью при сжигании младших актинидов и дает дополнительное преимущество, состоящее в том, что как только ускоритель прекращает работу, цепная реакция деления прекращается и реактор останавливается. В качестве ключевой меры безопасности проектом предусмотрено, что остаточное тепловыделение радиоактивного распада может отводиться за счет естественной циркуляции без необходимости наличия какой-либо активной системы или вмешательства.

Для того чтобы осуществить трансмутацию значительной части мировых отходов отработавшего топлива, потребуется сеть промышленных установок. На сегодняшний день технологии, задействованные в MYRRHA, были по отдельности опробованы в лабораторных условиях на



экспериментальных установках. Соответственно, MYRRHA является экспериментальной установкой для предпромышленной эксплуатации, задачей которой является интеграция и тестирование технологий в больших масштабах, обеспечивая при этом существенное повышение надежности.

В ходе реализации этого первого в своем роде проекта предстоит решить множество задач в плоскости науки, техники и нормативного регулирования. Проведенная Агентством по ядерному регулированию Бельгии после тесных консультаций с разработчиками проекта предлицензионная экспертиза не выявила никаких достаточно серьезных проблем, из-за которых будущая процедура лицензирования MYRRHA могла бы оказаться под вопросом. Мы надеемся, что это привлечет большое количество молодежи из Бельгии и других стран в ядерную область, которая, по мнению страны, имеет большое значение.

Хотя основное внимание в проекте уделяется обращению с радиоактивными отходами, для этой установки предусмотрено множество других вариантов применения в передовых научно-исследовательских областях. Проект MYRRHA состоит из трех этапов. В рамках первого этапа уже ведется строительство, и ожидается завершение работ по низкоэнергетической части (100 мегаэлектронвольт (МэВ)) протонного ускорительного комплекса, причем примерно в 2027 году уже могут быть начаты различные исследовательские работы. Основу для их проведения обеспечит система разделения изотопов в оперативном режиме (ISOL@MYRRHA), которая позволяет сортировать отдельные изотопы для производства радиофармпрепаратов и формировать радиоактивные ионные пучки для постановки самых разных ядерно-физических экспериментов, в том числе с возможностью изучения материалов для термоядерного синтеза при подключении установки полной мощности (УПМ).

На радиоактивных пучках, формируемых в ISOL@MYRRHA, можно выполнять высокоточные измерения, результаты которых могут пригодиться при проверке пределов действия «стандартной модели» элементарных частиц. Если удастся успешно завершить первый этап проекта и убедиться, что ускоритель обладает высочайшим уровнем надежности, который необходим для ЭЛЯС, то на втором этапе протонный ускоритель будет выведен на полную мощность (600 МэВ). Заключительным этапом станет сооружение собственно подкритического реактора. В качестве теплоносителя, предназначенного для отвода выделяемого ядерным реактором тепла,

будет использоваться свинцово-висмутовый (Pb-Bi) сплав. Гибкая конструкция активной зоны реактора позволяет загружать в нее смешанное оксидное топливо, младшие актиниды и мишени для производства медицинских изотопов. Будут предусмотрены стенды для испытаний под облучением и испытаний на коррозионную стойкость, где будут тестироваться перспективные конструкционные материалы для реакторов на быстрых нейтронах и даже будущих термоядерных реакторов. Реактор MYRRHA со свинцово-висмутовым теплоносителем может стать площадкой, на которой будут отрабатываться экспериментальные технологии для создания быстрых реакторов четвертого поколения со свинцовым теплоносителем.

Правительство Бельгии уже инвестировало в проект MYRRHA около 200 млн евро, а в 2018 году добавило еще 558 млн евро на период 2019–2038 годов, исходя из общей сметы проекта в размере около 1,6 млрд евро. Была создана некоммерческая организация. Это позволит MYRRHA в будущем привлекать инвестиции от иностранных правительств и организаций, чтобы перейти ко второму и третьему этапу и начать действовать в качестве международной организации. Проект MYRRHA был включен в список Европейского стратегического форума по исследовательским инфраструктурам (ESFRI), состоящий из проектов, которые были определены исследовательскими сообществами как передовые, а Европейский комитет по сотрудничеству в области ядерной физики (NuPECC) включил ISOL@MYRRHA в свой долгосрочный план основных европейских ядерных установок. Кроме того, проект MYRRHA включен в Европейский стратегический план по энергетическим технологиям (SET-План), ориентированный на поддержку низкоуглеродных технологий, что открывает возможности для получения финансирования от Европейского инвестиционного банка.

Возможность регенерации урана и плутония и их превращения в топливо для систем с быстрым спектром нейтронов также снижает спрос на добычу урановых руд и устойчивым образом увеличивает объем получаемой из них энергии. Повышение эффективности использования сырья и сокращение объема отходов — это задачи, актуальные для многих отраслей промышленности, и поэтому проект MYRRHA был включен в бельгийскую национальную политику стратегических инвестиций и комплексный национальный план по энергетике и климату.

### Трехмерная модель всего комплекса MYRRHA.

(Фото: MYRRHA)





## На пути к «справедливому» энергетическому переходу Ядерная энергетика предлагает наиболее высокооплачиваемые рабочие места в секторе чистой энергетики



**По данным нового исследования, инвестиции в ядерную энергетику способствуют созданию большего числа рабочих мест с более высокой заработной платой, чем инвестиции в другие низкоуглеродные источники энергии.**

(Фото: МАГАТЭ)

Согласно новому исследованию, представленному на мероприятии МАГАТЭ, переход к чистой энергетике создаст больше рабочих мест, чем будет утрачено при отказе от ископаемого топлива. При этом самые высокооплачиваемые рабочие места по-прежнему сохраняются в ядерной энергетике, которая обеспечивает значительную и устойчивую занятость, благотворно влияя на местную и региональную экономику.

Более 130 стран взяли на себя обязательство обеспечить к 2050 году так называемую углеродную нейтральность либо рассматривают такую возможность. Поэтому ключевое значение имеет подготовленность к тому, как этот энергетический переход повлияет на рынок труда. Представители отрасли чистой энергетики приняли участие в недавнем вебинаре МАГАТЭ, посвященном тому, как обеспечить рост уровня жизни и создание рабочих мест по мере оптимизации инвестиций в энергетику с учетом целей в области климата.

«Никто не должен пострадать при отказе от использования ископаемых видов топлива — такова концепция «справедливого» перехода, — отметил

руководитель Секции планирования и экономических исследований МАГАТЭ Анри Пайер на вебинаре «Инвестиции в низкоуглеродные технологии: создание рабочих мест для справедливого перехода к чистой энергетике». — Требуется масштабные инвестиции во все чистые технологии, и это должно быть сделано таким образом, чтобы создать рабочие места и обеспечить экономический рост, а также поддержать устойчивое развитие».

Как указано в рабочем документе Международного валютного фонда (МВФ), инвестиции в экологически чистые источники энергии, такие как энергия солнца, ветра и атома, оказывают положительное влияние на валовой внутренний продукт (ВВП), которое в два — семь раз больше, чем влияние средств, расходуемых на органическое топливо, такое как газ, уголь и нефть. Согласно анализу, представленному на вебинаре Международным агентством по возобновляемым источникам энергии (ИРЕНА), в случае реализации сценария, при котором рост среднемировой температуры будет ограничен 1,5°C, что соответствует глобальным климатическим целям, число рабочих мест в секторе возобновляемой энергии к

2030 году может вырасти в диапазоне от 12 до 38 миллионов.

По мнению Михаэля Реннера, сотрудника по программам в Центре знаний и финансов ИРЕНА, число рабочих мест в других областях, связанных с энергетическим переходом, может возрасти с 16 до 74 миллионов за тот же период. При этом число рабочих мест в традиционной энергетике сократится с 39 до 27 миллионов.

Согласно документу МВФ, инвестиции в ядерную энергетику имеют наибольший мультиплицирующий экономический эффект в сравнении со всеми другими источниками экологически чистой энергии. В документе также показано, что ядерная энергетика обеспечивает примерно на 25 процентов больше занятости на единицу произведенной электроэнергии, чем ветроэнергетика, а работники ядерной отрасли зарабатывают на треть больше, чем работники сектора возобновляемых источников энергии.

Аналогичные данные представил Филипп Кост, старший советник Всемирной ядерной ассоциации (ВЯА). «Ядерная энергетика предлагает рабочие места с более высокой заработной



платой, примерно на 25–30 процентов превышающей заработную плату в любой другой отрасли энергетики. Важно подчеркнуть, что в то время как на этапе строительства атомных электростанций рабочие места создаются рядом с ними и на региональном экономическом уровне, как и в случае с ветряными электростанциями, в ходе последующей эксплуатации только ядерная энергетика обеспечивает широкие возможности для трудоустройства и устойчивую занятость на местном и региональном уровнях», — отметил Кост на вебинаре.

По словам Коста, исследование ВЯА показало, что ядерная энергетика обеспечивает примерно на 25 процентов больше рабочих мест во Франции и Соединенных Штатах Америки, чем ветроэнергетика, причем эти рабочие места хорошо оплачиваются,

имеют долгосрочный характер и преимущественно ориентированы на местное население. Он добавил, что долгосрочные экономические преимущества ядерной энергетики также отражаются в повышении уровня замещения иностранных специалистов национальными кадрами в странах, приступающих к развитию ядерной энергетики, и указал на пример Республики Корея, где рост масштабов ядерной энергетики совпал с превращением страны к середине 1990-х годов в 11-ю по величине экономику мира. В Республике Корея ядерная энергетика обеспечивает почти треть электроэнергии.

По данным Международного энергетического агентства (МЭА), около 60 процентов из 30 миллионов новых работников, необходимых к 2030 году для

развития чистой энергетики, повышения энергоэффективности и внедрения технологий с низким уровнем выбросов, будут заняты на новых, требующих получения высокой квалификации рабочих местах, которые предполагают наличие высшего или среднего специального образования, например, профессиональных сертификатов или степени университета. Как отметил руководитель Отдела анализа устойчивых переходных процессов МЭА Даниэль Ветцель, правительствам и учебным заведениям необходимо уже сейчас начать разрабатывать политические меры для подготовки будущих кадров.

— *Николас Уотсон и Люси Эштон*

## При поддержке МАГАТЭ и ФАО в Тунисе в рекордно короткие сроки выявлен ящур



**Ветеринар берет пробу слюны у коровы, которая предположительно больна ящуром, в Набуле на северо-востоке Туниса.** (Фото: Т. Бен Хассин/Министерство сельского хозяйства, водных ресурсов и рыболовства Туниса)

В начале 2022 года вирусологическая лаборатория в Тунисе получила пробы слюны коров, у которых ветеринары подозревали ящур. Ящур — это крайне заразное заболевание, поражающее копытных животных, таких как коровы, свиньи и козы, которое может приводить к перебоям в региональной и международной торговле животными и продуктами животноводства. Для этого заболевания характерно развитие лихорадки и язв, похожих на волдыри, локализующихся в области копыт, во рту, на языке и губах.

Через несколько дней после передачи проб в службу генетического секвенирования Суфьян Сегайе, вирусолог из лаборатории вирусологии Тунисского ветеринарного научно-исследовательского института (IRVT), получил результаты, которые помогли подтвердить циркуляцию штамма ящура. Сегайе смог уведомить ветеринарные органы о необходимости введения мер контроля, чтобы предотвратить распространение болезни. Своевременное подтверждение результатов стало возможным благодаря партнерской

работе МАГАТЭ и Продовольственной и сельскохозяйственной организации Объединенных Наций (ФАО), предусматривающей услуги по секвенированию и обучение персонала, необходимое для обработки результатов. «Мы очень быстро получили результаты секвенирования по подозрению на ящур. Пробы были отправлены в лабораторию в Берлине в пятницу, а в понедельник днем мы уже получили результаты секвенирования, — поясняет Сегайе. — Это позволило нам в рекордно короткие сроки провести анализ и

определить конкретный штамм вируса ящура. Ко вторнику мы отправили отчет об обнаружении штамма ящура в ветеринарные органы». Штаммы ящура необходимо идентифицировать, чтобы подобрать или разработать наиболее эффективную вакцину.

Генетическое секвенирование необходимо для установления того, является ли распространяющееся заболевание эндемичным или оно было завезено из других мест. «Генетическое секвенирование может помочь нам понять, к какому кластеру относится патоген (биологический агент, вызывающий заболевание) и какая вакцина эффективна против этого патогена», — говорит Иванчо Налетоски, специалист по вопросам ветеринарии в Совместном центре ФАО/МАГАТЭ по ядерным методам в области продовольствия и сельского хозяйства. На основе генетического секвенирования можно построить филогенетическое дерево, отображающее родословную вида. «С помощью филогенетического анализа мы определили, что у нас уже есть вакцина, которая способна защитить наш скот. Ветеринарные службы провели перифокальную вакцинацию, чтобы снизить риск распространения ящура», — сообщает Сегайе.

Перифокальная вакцинация, или буферная вакцинация, проводится для того, чтобы предотвратить распространение вируса на другие географические регионы.

### Служба генетического секвенирования МАГАТЭ — ФАО

Бесплатная услуга по генетическому секвенированию позволяет странам проводить секвенирование с целью углубленного анализа патогенов. На сегодняшний день 30 лабораторий из 24 стран Африки, Азиатско-Тихоокеанского региона, Европы и Латинской Америки направили на анализ более 5300 проб.

«Развертывание оборудования для генетического секвенирования в местных лабораториях обходится довольно дорого, — говорит Налетоски. — К тому же нет большой необходимости в секвенировании каждого отдельного штамма; необходимо лишь несколько проб, отобранных во время отдельных вспышек. С точки зрения экономической целесообразности имеет смысл создать механизм, предоставляющий партнерам доступ к услугам по секвенированию». На основе полученных результатов МАГАТЭ разработало и распространило пошаговые технические инструкции по обработке исходных данных и

составлению филогенетических деревьев патогенов, циркулирующих на местном уровне.

Кроме того, Совместный центр ФАО/МАГАТЭ организовал в 2017 году в Марокко и в 2018 году в Аргентине учебные курсы для лабораторий по использованию этой услуги. На национальном уровне эта служба играет важную роль в программах мониторинга заболеваний. На глобальном уровне она способствует проведению соответствующих исследований и вносит вклад в деятельность мирового научного сообщества. На сегодняшний день в рецензируемых журналах опубликовано более 30 статей, основанных на результатах, полученных службой секвенирования, и десятки расшифрованных последовательностей опубликованы в базах данных с открытым исходным кодом.

— Джоанн Лю

## Радиационная защита при проведении медицинских процедур с использованием флюороскопии

В мире все чаще используются минимально инвазивные процедуры, так как они менее рискованны, чем традиционная хирургия, позволяют сократить время пребывания в больнице и ускорить процесс восстановления. В 2020 году было проведено в общей сложности 24 миллиона таких процедур, что более чем в 6 раз больше, чем в 2008 году. Однако здесь есть один тонкий момент: без надлежащих мер предосторожности как пациенты, так и медицинский персонал могут подвергаться ненужному облучению рентгеновскими лучами, которые используются для флюороскопии — метода визуализации, позволяющего врачам «видеть» манипуляции, производимые внутри тела.

«Мы выявили новые проблемы в области радиационной защиты, связанные с развитием технологий и повышением сложности этих процедур, а также потенциальные пробелы в руководствах и учебных программах по повышению уровня радиационной защиты пациентов

и персонала», — отмечает Жения Васильева, специалист по радиационной защите в МАГАТЭ.

При флюороскопии на монитор выводится непрерывное рентгеновское изображение, формируемое проходящим через тело лучом.

На недавнем совещании МАГАТЭ, проведенном в рамках поддержки медицинского сообщества, более 100 экспертов из 42 стран и 18 международных организаций и профессиональных организаций обсудили достигнутый прогресс и проблемы радиационной защиты при проведении интервенционных процедур под контролем флюороскопии. Они рассмотрели способы укрепления радиационной защиты пациентов и медицинского персонала при проведении этих процедур, так как получаемые дозы облучения могут приводить к повреждению кожных покровов у пациентов и радиационно-индуцированной катаракте у проводящего их медицинского персонала.

### Управление радиационной защитой пациентов и медицинского персонала

Часто тканевые реакции на облучение представляют собой только покраснение кожи или выпадение волос, но в некоторых случаях могут возникать более серьезные реакции, такие как образование язв или некроз кожи, — иногда спустя недели, месяцы или даже годы.

«К числу факторов, связанных с высокими дозами, относятся размеры тела пациента и медицинская сложность процедуры, требующей длительной флюороскопии; однако в большинстве случаев непреднамеренные тяжелые тканевые реакции возникают в результате нехватки знаний и осведомленности у оператора», — отметил председатель совещания Стивен Болтер, профессор клинической радиологии и медицины Колумбийского университета, Соединенные Штаты Америки.





**При флюороскопии на монитор выводится непрерывное рентгеновское изображение, формируемое проходящим через тело лучом. Чрезвычайно важно обеспечить радиационную защиту пациентов и медицинского персонала во время этой процедуры.** (Фото: Десислава Костова-Лефтерова, Национальная кардиологическая больница, София, Болгария)

Хол Уоркман — пациент, получивший серьезную травму кожи в результате кардиологического вмешательства 14 лет назад, — рассказал: «Прошло больше года, прежде чем удалось установить, что причиной травмы стала длительная флюороскопия. Свыше 15 месяцев я не спал больше двух часов за раз. Это была самая сильная боль, которую только можно себе представить».

Участники совещания узнали также о последних достижениях в технологии флюороскопии, в том числе познакомились с картами дозы облучения в зависимости от типа кожи с визуальным распределением доз облучения в режиме цветной или серой шкалы. Это дает операторам необходимую информацию для контроля дозы, что позволяет лучше регулировать параметры процедуры и не допускать травмирования кожи пациента.

«Результатом двадцати лет работы стало значительное снижение числа случаев повреждения кожи, — подытожил Болтер. — Основными факторами являются совершенствование оборудования для флюороскопии и медицинского оборудования, используемого для этих процедур». Он подчеркнул важность

планирования, особенно в случае пациентов с ожирением и тех, кто проходит несколько процедур, а также постоянного контроля дозы облучения и проактивного отслеживания возможных кожных реакций, когда в ходе сложной процедуры необходимо использовать значительную дозу облучения.

Кроме того, во многих странах до сих пор существует проблема контроля доз облучения медицинского персонала. Соответствующие меры по повышению радиационной защиты включают, например, использование электронных дозиметров в режиме реального времени, видеосистем для автоматического отслеживания действий персонала и виртуальных тренажеров.

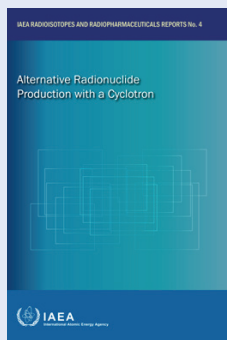
По словам Васильевой, повышение осведомленности медицинского персонала о вопросах радиационной защиты будет также в значительной степени способствовать снижению лучевой нагрузки на персонал и пациентов. Участники совещания отметили, что эффективным в этом отношении является ориентированное на практику обучение с использованием видеоматериалов, таких как новые практические учебные пособия МАГАТЭ по радиационной защите при интервенционных процедурах.

### Исследование МАГАТЭ для повышения информированности

Чтобы восполнить существующие пробелы в данных о тканевых реакциях у пациентов и сравнить примеры из международной практики, МАГАТЭ организовало международное исследование, касающееся доз облучения пациентов и тканевых реакций при проведении интервенционных процедур под контролем флюороскопии.

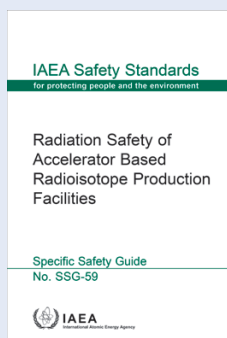
«Наша цель состоит в том, чтобы собрать данные по всему миру, что поможет нам обновить информацию о величинах доз, при использовании которых необходимо последующее наблюдение за пациентами, подверженными риску возникновения кожных реакций», — отмечает Васильева.

— *Маргерита Галлуччи и Наталья Иванова*



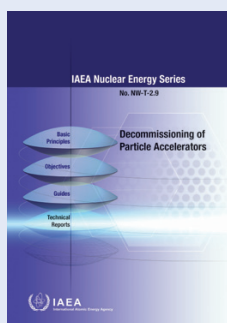
### «ALTERNATIVE RADIONUCLIDE PRODUCTION WITH A CYCLOTRON» («АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ СПОСОБЫ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОНУКЛИДОВ С ПОМОЩЬЮ ЦИКЛОТРОНА»)

В настоящее время для производства целого ряда радионуклидов, которые применяются в однофотонной эмиссионной компьютерной томографии (ОФЭКТ) и позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), используются циклотроны. Поэтому со стороны государств — членов МАГАТЭ растет спрос на получение помощи в области производства на базе циклотронов радиофармацевтических препаратов с использованием радионуклидов. В данной публикации рассматриваются потенциальные способы производства радионуклидов с помощью циклотронов в различных диапазонах энергии, а также представлены методы разработки мишеней и подробно описан химический процесс выделения радионуклидов из материалов мишеней. Публикация предназначена для ученых, операторов, заинтересованных в практическом применении этой технологии, а также работающих с циклотронами техников, желающих повысить функциональность имеющейся аппаратуры, и руководителей, занятых в подготовке производства радионуклидов в своих странах. Публикация может быть также полезной студентам, обучающимся по программам магистратуры и докторантуры в смежных областях.



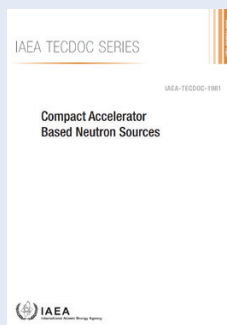
### «RADIATION SAFETY OF ACCELERATOR BASED RADIOISOTOPE PRODUCTION FACILITIES» («РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ УСТАНОВОК ПО ПРОИЗВОДСТВУ РАДИОИЗОТОПОВ НА УСКОРИТЕЛЯХ»)

Радиоизотопы используются по всему миру в различных медицинских, промышленных, исследовательских и научных целях. Большая часть радиоизотопов производится на ускорителях частиц, и число учреждений, которые эксплуатируют линейные ускорители или циклотроны и, например, производят и распространяют радиофармацевтические препараты, является весьма значительным и продолжает расти. В случае эксплуатации ускорителей без соблюдения надлежащих мер радиационной безопасности производство радиоизотопов на ускорителях частиц сопряжено с серьезной радиационной опасностью для работников, населения и окружающей среды. Настоящее руководство по безопасности содержит практические рекомендации по внедрению мер радиационной защиты и безопасности на объектах, связанных с производством и использованием радиоизотопов.



### «DECOMMISSIONING OF PARTICLE ACCELERATORS» («ВЫВОД ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ УСКОРИТЕЛЕЙ ЧАСТИЦ»)

В данной публикации представлена информация об опыте и уроках реализации проектов по выводу из эксплуатации ускорителей частиц. На основе этой информации в публикации приводятся сведения практического характера для всех лиц и сторон, играющих определенную роль в этом процессе, с уделением особого внимания возникающим типичным вопросам и проблемам. Публикация предназначена для использования операторами ускорительных установок, в особенности тех установок, жизненный цикл которых приближается к этапу вывода из эксплуатации, или находящихся в состоянии отложенного демонтажа; регулирующими органами; руководителями работ по обращению с отходами; лицами, принимающими решения на правительственном уровне; местными органами власти; подрядчиками на проведение работ по выводу из эксплуатации; конструкторами ускорителей. Ожидается, что описанные в настоящей публикации уроки будут способствовать тому, что вопросы планирования вывода из эксплуатации будут учитываться на стадии проектирования новых установок и что, следовательно, будет сводиться к минимуму образование радиоактивных отходов без ущерба для конструктивных характеристик и эффективности проведения строительных работ.



### «COMPACT ACCELERATOR BASED NEUTRON SOURCES» («КОМПАКТНЫЕ ИСТОЧНИКИ НЕЙТРОНОВ НА БАЗЕ УСКОРИТЕЛЕЙ»)

Производство нейтронов с помощью ускорителей началось в 1970-х годах со строительства мощных протонных ускорителей для получения нейтронов посредством реакции скалывания. В то же самое время результатом производства нейтронов с использованием электронных ускорителей, ускорителей ионных пучков, циклотронов и низкоэнергетических линейных ускорителей стали процессы получения нейтронов низких энергий. Эти разнообразные источники нейтронов на базе ускорителей получили название «компактных источников нейтронов на базе ускорителей» (КИНУ). В данной публикации представлен обзор различных типов технологий КИНУ, которые доступны в настоящее время или запланированы к использованию в ближайшем будущем. В публикации приводится ряд примеров аналитических и других применений нейтронов. Публикация призвана также продемонстрировать, что, учитывая большой разброс по мощности и затратам, для выполнения определенных функций наряду с заменой национальных среднеточных исследовательских реакторов могут оказаться рентабельными небольшие региональные источники нейтронов, что в конечном итоге может расширить доступ к нейтронным установкам.

**ЗА ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИЕЙ И ДЛЯ ЗАКАЗА КНИГ ПРОСЬБА ОБРАЩАТЬСЯ ПО АДРЕСУ:**

Группа маркетинга и сбыта (Marketing and Sales Unit)

International Atomic Energy Agency

Vienna International Centre PO Box 100, A-1400 Vienna, Austria

Эл. почта: [sales.publications@iaea.org](mailto:sales.publications@iaea.org)





Читайте этот и другие выпуски Бюллетеня МАГАТЭ в интернете по адресу  
[www.iaea.org/ru/bulletin](http://www.iaea.org/ru/bulletin)

С более подробной информацией о МАГАТЭ и его работе можно ознакомиться на сайте  
[www.iaea.org](http://www.iaea.org)

или на наших страницах

