

ВЕСТНИК АТОМПРОМА

№8 | октябрь | 2026

Главная тема

Горизонты науки

Исследования ученых «Росатома» для разработки технологий в интересах атомной и других отраслей

В номере

Темпы НТП	28
-----------	----

Атомное время	34
---------------	----

Мировой рынок урана	44
---------------------	----



Уважаемые читатели!

В 2026 году исполнилось 15 лет со дня образования АО «Наука и инновации» (в 2024 году переименовано в АО «Росатом Наука») — управляющей компании Научного дивизиона «Росатома». Именно тогда, в 2011 году, был реализован важный этап по консолидации научно-исследовательского потенциала атомной отрасли. Главной задачей компании стало развитие прикладной и фундаментальной науки и коммерциализация научно-технических результатов.

Сегодня Научный дивизион проводит новаторские прикладные исследования для разработки критически важных и наукоемких ядерных и неядерных технологий, закладывает научно-технологический потенциал российской атомной отрасли и науки на десятилетия вперед, развивает производство инновационных продуктов и решений в стратегически значимых направлениях промышленности, обеспечивая суверенитет и устойчивое развитие экономики России. Материалы главной темы номера рассказывают о некоторых направлениях работы ученых «Росатома», важных для дальнейшего технологического развития как атомной отрасли, так и всей страны.

Также мы знакомим вас с мнениями экспертов о современных темпах научно-технического прогресса и рассказываем о том, какими бывают атомные часы и для чего они применяются, каковы тенденции мирового рынка урана и каким образом искусственный интеллект меняет качество управления.

**ВЕСТНИК
АТОМПРОМА**

№ 8, октябрь 2026 года

Информационно-
аналитическое
издание



Фото на обложке
«Росатом Наука»

Главный редактор
Долгова Ю. В.
dolgova@strana-rosatom.ru

Выпускающий редактор
Еременко О. В.

Дизайн и верстка
Балдин В. В.

Корректор
Бомбенкова А. Н.

**Учредитель, издатель
и редакция**
Общество с ограниченной ответственностью «НВМ-пресс»

Адрес редакции
129110 г. Москва, Вн. тер. г.
муниципальный округ Мещан-
ский, ул. Гиляровского, д. 57,
стр. 4

**Отдел распространения
и рекламы**
Сазонова Т. С.
sazonova@strana-rosatom.ru
+7 (495) 626-24-74

Журнал зарегистрирован в Федеральной
службе по надзору в сфере связи, инфор-
мационных технологий и массовых
коммуникаций

Свидетельство о регистрации СМИ
ПИ №ФС77-59582
от 10 октября 2014 года

Тираж 1980 экземпляров
Цена свободная
Дата выхода в свет: 31.10.2026

При перепечатке ссылка
на «Вестник Атомпрома» обяза-
тельна. Рукописи не рецензиру-
ются и не возвращаются

Суждения и выводы авторов
материалов, публикуемых
в «Вестнике Атомпрома», могут
не совпадать с точкой зрения
редакции

Журнал отпечатан:
ООО «АртФормат»
115477, г. Москва, ул. Зюбинская,
д. 6, стр. 2.
Тел.: +7 (968) 724-35-91
№ заказа: Аф-008/26.

	Содержание			
Главная тема	ПРЯМАЯ РЕЧЬ	Материализуя будущее 4	Мнения	НТП на перепутье 28
		Основные направления работы ученых-материаловедов «Росатома»		Экспонента или плато: какие факторы сегодня влияют на темпы развития науки и технологий
	ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА	Рак попятится назад 10	Наука и технологии	С точностью до атома 34
		Наука для здоровья: репортаж с нового предприятия «Росатома», где будут выпускать препараты для ядерной медицины		Как работает современная мировая хронометрия
	РАДИОХИМИЯ	Переработка будущего: от модели до предприятия 16	Цифровизация	Адажио для дата-центров 40
		Перспективы развития радиохимических технологий		Российский рынок ЦОДов замедлился, но ищет возможности для роста
ЗАМКНУТЫЕ ЦИКЛЫ		«Без экспериментальной базы создать десятки быстрых реакторов к концу века невозможно» 20	Рынок урана	Уран все дороже 44
		Роль исследований в области реакторов на быстрых нейтронах в обеспечении перехода к замкнутому ядерному топливному циклу		Тенденции и перспективы мирового уранового рынка
		Материалы-экстремалы: научный взгляд 26	Искусственный интеллект	От цифровых услуг к ранним решениям 48
		Что делают димитровградские ученые для новейшего топлива и реакторных установок		Как ИИ меняет государственное управление
			ИЦАЭ	Научный пульс трех городов 54
				Хроники фестивалей «КСТАТИ» от сети ИЦАЭ

Текст: Алексей Комольцев

Фото: Алексей Башкиров / газета «Страна Росатом», ЦКП «СКИФ»,
Ленинградская АЭС, Григорий Сысоев / РИА Новости, СХК

Материализуя будущее

Основные направления работы ученых-материаловедов «Росатома»



Материаловедение часто называют основой развития технологий в самых разных отраслях промышленности. Алексей Дуб, первый заместитель директора частного учреждения «Наука и инновации» (входит в «Росатом»), научный руководитель направления «Материалы и технологии» госкорпорации «Росатом», профессор, доктор технических наук, рассказал «Вестнику атомпрома» о том, какие перспективы открывает создание новых материалов с заданными свойствами, в каких направлениях ведутся исследования в интересах атомной и других отраслей и как должно строиться взаимодействие современной науки и производства.

— Алексей Владимирович, расскажите, каковы основные направления работы в области материаловедения и какие новые возможности для этого открываются сегодня.

— Вопросы материаловедения объективно являются базисом для развития атомной и ряда других индустрий — конвенциональной энергетики, транспортного машиностроения, двигателестроения, производства станков и инструментов и так далее. В нашей работе по материаловедению есть два больших направления.

Первое направление — точное изучение структуры материала, вплоть до энергетического взаимодействия атомов друг с другом. Мы должны обеспечивать стабильность структуры материала на всех масштабных уровнях, начиная от субмикроструктуры. Именно в этом нам помогут возможности мегасайенс-установки «СКИФ» (Сибирский кольцевой источник фотонов), строительство которой завершилось в августе этого года.

Мы ожидаем, что СКИФ позволит рассмотреть атомную структуру не только в статическом положении, как обеспечивали электронные микроскопы, но и в динамике, под внешним воздействием. Стабильность, устойчивость системы — это ее способность возвращаться в исходное энергетическое состояние благодаря внутренней энергии. Есть классический пример с шариком, который замер на вершине, — это неустойчивое равновесие, достаточно толчка, чтобы он скатился. Устойчивое равновесие — это шарик внутри лунки, когда отклонение приводит к стабилизации, возвращению на дно и в покой. Если энергетическое взаимодействие между компонентами вещества приводит к стабилизации после внешнего воздействия, значит, мы нашли нужный нам материал. Если происходит дестабилизация — ищем дальше.

Увидеть атомную структуру в динамике и при воздействиях нам помогут исследовательские станции, которые будут запущены на СКИФ в ближайшее время. Мы совместно с председателем НТС № 5 «Закрывающая стадия ядерного топливного цикла» академиком Степаном Калмыковым выразили консолидированную позицию, что нам нужна станция, где будет осуществляться исследование радиационных воздействий. В инфраструктуре СКИФ такое воздействие не предполагалось, но мы рассчитываем, что в обозримой перспективе эта возможность будет обеспечена. Нам нужно видеть, как ведут себя материалы, в том числе при прямом радиационном воздействии, а также уже прошедшие радиационные испытания, так называемые «теплые» образцы с остаточной радиоактивностью.

В августе 2026 года «Росатом» завершил строительство Центра коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ»). Запуск синхротрона поколения 4+ даст России новый мощный инструмент для прорывных научных исследований



Уже начато формирование программы таких исследований и ведется ее обоснование, поскольку синхротронные исследования дорогостоящие, и мы должны точно показать, с чем не можем справиться традиционными методами. Планируем использовать возможности синхротрона для вопросов замыкания топливного цикла и поиска нужных композиций: поиск пройдет быстрее, если мы сможем глубоко заглянуть в структуру.

Второе направление — это отработка технологий производства. Мало задать химический состав и физическую композицию материала. Мы должны понимать, какая технология будет стабильно приводить к получению конечного изделия со стабильным качеством. Напомню, что один и тот же углерод в зависимости от связей между атомами будет либо алмазом, либо простым углем. Мы должны исследовать, как технологические процессы и фазовые переходы могут влиять на структуру и какова возможность управления этими процессами.

Поэтому исследование поведения материала и возможности управления его структурой в процессе фазовых переходов, особенно самого важного для нас, из расплавленного состояния в твердое, является очень важным. При неуправляемой кристаллизации мы можем получить неоднородную структуру в затвердевшем материале, когда выделяются фазы, в которых одни компоненты присутствуют в большем количестве, другие — в меньшем, в том числе могут концентрироваться и радиоактивные или активируемые материалы. Мы получаем неоднородный материал,

который и поведет себя неоднородно, вплоть до того, что в нем могут накопиться элементы, приводящие к растрескиванию или к чрезмерному тепловыделению при эксплуатации. Для отработки технологий нам тоже будут нужны возможности и установки, которые позволят проследить за протеканием процессов на атомном уровне, в нужном масштабе времени и отработать управление этими процессами.

— Дает ли этот поиск какие-либо практические возможности для других отраслей за пределами атомной промышленности?

— Приведенный выше пример — технологическая задача по управлению процессами формирования твердой фазы, чтобы она была однородной, — актуален для многих индустрий. В том числе это важнейший, определяющий аспект для 3D-печати ответственных элементов. Освоение и масштабирование аддитивных технологий несет огромные изменения для целого ряда отраслей.

Есть экономический показатель — коэффициент расхода материала. Из исходного количества материала, большого слитка, можно дизъюнктивно, то есть убирая лишнее, получить Венеру Милосскую или деталь сложной конфигурации. Из 90-тонного слитка нержавеющей стали у нас получается лишь 20 тонн ажурных внутрикорпусных устройств атомного реактора: выход годного чуть больше 20%. Чем сложнее материал, тем сложнее с ним работать, а коэффициент выхода годного для самых сложных материалов стремится к минимальным значениям. Поэтому мы

должны разрабатывать технологии, позволяющие довести выход годного до экономически приемлемых показателей. В этом помогут аддитивные и другие технологии — например, не вытачивать, а выдавливать сложную по конфигурации деталь на большом прессе за одну технологическую операцию.

Еще один пример. Автомобиль «Нива» полвека назад имел двигатель 76 л.с., за долгие годы этот показатель вырос до 90 л.с. Но при том же объеме и габаритах двигатель Honda имеет порядка 200 л.с., потому что были использованы другие материалы в цилиндрах, поршнях, клапанах, во всех теплоотводящих элементах. В подобных случаях, когда необходим переход на новые, более дорогостоящие материалы, уже невозможно использовать традиционную «отсекающую» технологию: экономически массовое производство так не выстроить. Поэтому мы должны создавать, по сути, цифровую технологию, когда процессом управляет не человек, а автоматизированная система, это существенно уменьшает случайности. Потому что мы не можем допустить, чтобы порошок, волокно, связующие или температура, при которой они расплавляются и спекаются, отклонялись от заданных пределов из-за человеческого фактора.

Если вернуться к материалам атомной отрасли: цирконий, который нужен нам для оболочки твэлов, может иметь примеси, неоднородную микроструктуру. Нам необходимо добиться такой идеальной структуры, которая обеспечит наилучшую его работу в реакторе в обычных и экстремальных ситуациях. Точно так же стабилизированные оксиды циркония для термобарьерных покрытий турбинных лопаток или зубных коронок, имплантатов в костях должны быть изначально такой морфологии, чтобы не возникало сомнений: не появится трещина, не начнутся электрохимические реакции, материал будет абсолютно инертен к воздействию физиологических факторов.

Поэтому нами в интересах «Росатома» и не только проводится очень большая работа по получению такого чистого оксида циркония нужной морфологии. Его получение — многостадийный процесс. Когда начинаешь

управлять процессом в масштабе 10 нм при 3D-печати или напылении, то в конечном счете материал получается тот, который ты хочешь, а не случайный, из которого раньше мы с запасом вырезали изделие. Тогда нам каждый раз не нужен будет искусный станочник уровня Микеланджело или уникальное месторождение, где в руде нет вредных или ненужных примесей.

— Работа над такими сверхчистыми материалами была всегда свойственна атомной отрасли?

— Атомная отрасль изначально задавала очень длинные эксплуатационные ресурсы, и получение максимально качественного/устойчивого материала было условием реализации проектов. Вспомним сверхчистый графит на старте атомного проекта. Но нам ближе другой пример. Когда создавались первые блоки ВВЭР, стало понятно, что ресурс зависит от качества металла. Впервые в атомной энергетике ресурс для станций на основе ВВЭР-1000 был рассчитан на 30 лет (и это считалось большим сроком).

Курчатовский институт определил, что примеси фосфора, серы, меди отрицательно влияют на прочностные характеристики стали и их влияние надо исключить. Ученые и технологи ЦНИИТМАШ (головной материаловедческой организации атомной отрасли), ЦНИИ конструкционных материалов «Прометей», ОКБ «Гидропресс», Ижорского завода сумели при непосредственном контроле и участии президента АН СССР Анатолия Александрова создать технологию производства стали нужной чистоты в требуемых объемах. И это была совсем не рядовая задача, в том числе для этого по всему Советскому Союзу искали шихту, чтобы выплавить такой металл: в одном месте нужного количества чистых исходных компонентов не было. И первый блок-тысячник, запущенный в 1980-м на Нововоронежской АЭС, работает и сегодня.

Прошло несколько десятилетий наблюдений за металлом реакторных корпусов, и исследователи начали намного лучше разбираться в его поведении. Работы начала XXI века привели к появлению так называемых наноструктурированных сталей, у которых характеристики определяются фазовыми нанокompонентами. (За эту работу коллектив ученых вместе с Алексеем Дубом получил в 2013 году Государственную премию РФ в области науки и технологий. — *Примеч. ред.*) От загрязнений, которые традиционно были причиной нарушений микроструктуры, удалось гарантированно избавиться за счет развития технологий рафинирования. Благодаря этому были обеспечены и обоснованы гарантированные 60+ лет эксплуатации корпуса и других незаменимых устройств, и теперь такой срок и такие материалы — стандарт для атомной энергетики.

Это очень весомый вклад и в отрасль, и в целом в народное хозяйство. Сталь, которая работает 60 лет в условиях радиации, вполне может работать и в других условиях. Например, трубопроводные системы России были модернизированы в результате того, что материаловеды атомной отрасли еще в 1990-е годы

«Мало задать химический состав и физическую композицию материала. Мы должны понимать, какая технология будет приводить к получению конечного изделия со стабильным качеством, и исследовать, как технологические процессы и фазовые переходы могут влиять на структуру и какова возможность управления этими процессами».



получили задачу и занялись поиском материалов для трубопроводов, способных выдерживать 50-летний срок эксплуатации, в том числе в сейсмических условиях, и обосновали этот вопрос. Подобные возможности могут быть использованы и для других высокотехнологичных изделий, например высокотемпературных турбин, поршневых и реактивных двигателей, редукторов.

Но важно не «ставить в очередь» решение материаловедческих и производственных вопросов. При управлении процессами на наноуровне работа с материалом и создание технологии должны идти параллельно и одновременно. Бывает, что предприятие приобретает оборудование, например аддитивное, но оно работает не так, как ожидали: решались другие задачи, с другими материалами. Во всех подобных случаях требуется симбиоз — параллельный одновременный анализ и технологии, и материала.

Раз уж мы опять коснулись аддитивных технологий, добавлю, что они родственны сварочным технологиям. Развивая 3D-печать металлом и занимаясь вопросами качества, мы в том числе разработали программно-аппаратный комплекс для управления аддитивными процессами с обратной связью. Эти знания мы можем вернуть назад в сварку, особенно в лазерную. Это уже не только точечная приварка тонких деталей, но и возможности изготовления корпусов для перспективных быстрых реакторов. Там пригодятся наши компетенции и в управлении лазерным лучом, что позволяет управлять энергоподачей и тепловыми процессами (что является определяющим аспектом). На структуру металла сварного соединения влияют и ультразвуковые колебания, которые возникают,

когда лазерное излучение проходит через жидкую — расплавленную — среду. Это не только стабилизирует систему и снимает напряжение, но и приводит к упорядочению расположения атомов.

— **Какие направления исследований обещают долгосрочные экономические эффекты для ядерной энергетики, например такой, как создание суперсверхкритического ВВЭР с принципиально иным КПД?**

— Практический опыт работы ЦНИИТМАШ для традиционной энергетики с суперсверхкритикой (температуры выше 620–630 °C) в 2005–2015 годах привел к выявлению механизмов нанопропрочнения. Оно отличается от классического тем, что является и зернограничным, и внутризерненным. Эти механизмы связаны с процессами, происходящими в границах зерен и внутри объема зерен при деформации или термической обработке. За счет этого удалось поднять минимум на 30 °C, а в предельных случаях и на 50 °C температуру работы горячего тракта турбин — трубопроводов острого пара. Это огромный скачок.

Из последних разработок: мы смогли применить механизм нанопропрочнения при решении актуальных задач по созданию перспективного ядерного топлива: используя так называемые дисперсно-упрочненные оксидами материалы для оболочек, прежде всего быстрых реакторов направления «Прорыв», мы можем поднять температуру их эксплуатации до 750 °C. Наличие равномерно распределенных частиц с дисперсностью менее 25 нм обеспечивает стабильную структуру материала нужное время. Такая оболочка сохранит целостность в период всей топливной кампании.

На фото

Строящиеся энергоблоки Ленинградской АЭС с реакторами ВВЭР-1200 поколения III+ (август 2026 г.). Благодаря в том числе появлению наноструктурированных сталей обеспечены и обоснованы гарантированные 60+ лет эксплуатации корпуса реактора и других незаменимых устройств, теперь такой срок — стандарт для атомной энергетики

«Нам важен запрос и от конструкторов смежных отраслей. Если они захотят воспользоваться нашими материалами, может быть, даже раньше ядерной энергетики, то смогут использовать наши находки в целом спектре индустрий: от добычи и транспортировки нефти и газа до двигателей, летательных аппаратов, материалов подводных, арктических, космических кораблей».

— Насколько мы близки к созданию керамических композитов, позволяющих на порядок улучшить свойства ядерного топлива?

— Такая керамика уже не сугубо поисковая научная проблема, а текущая задача, которая перешла в ряд инженерных, и теперь необходимо восстановить производство качественных исходных компонентов. Например, нужный нам мономер моносилан (тетрагидрид кремния) на российском рынке отсутствует. Мы решаем вопрос о создании производства для получения нужного его количества в приемлемых экономических параметрах. Моментально такую задачу не решить, но проект продвигается. Мы понимаем суть технологии, а также факторы, влияющие на стабильность получаемых изделий.

— Какие наработки ученых «Росатома» могут использоваться для производства турбин, особенно больших паровых, 1 ГВт и выше?

— Создание таких паровых турбин для меня вопрос совершенно не банальный и даже досадный, потому что сегодня в возрождении этого направления в России доминирует подход, что это сугубо производственная задача. Парадигма «не мешайте производству работать», на мой взгляд, глубоко ошибочна, и результат может разочаровать.

В ходе недавнего форума «Технопром» я поинтересовался у представителя нижегородского Института прикладной физики: почему ИПФ и ИЯФ (Институт ядерной физики) успешно лидируют в мире по созданию таких высокотехнологичных устройств, как, например, гиротроны для разогрева термоядерной плазмы? Собеседник ответил ожидаемо: потому что производство и разработчики связаны в единое целое, между ними нет разрыва. Для развития высоких технологий нужно не допускать разрывов и преодолеть те, что есть на сегодняшний момент.

Ученые научились действовать в интересах производственных задач, и сегодня единственный выход для высокотехнологичной промышленности — научиться сотрудничать с учеными в процессе отработки технологий и поддержания постоянного их уровня.

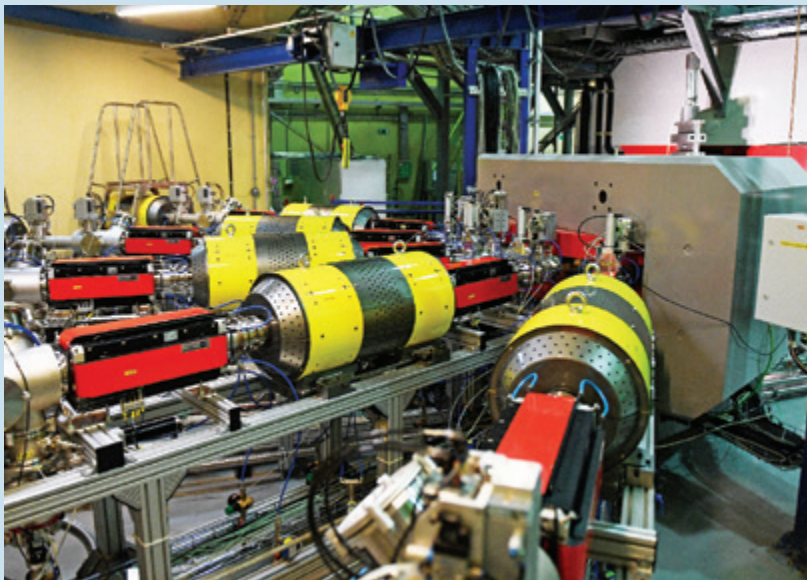
— То есть наука, и не только прикладная, вместо разработки теорий уже полностью готова прийти в цех и в практику производства?

— Как сказал кто-то из великих, «нет ничего практичнее хорошей теории». Мы разрабатываем теории, которые станут практическими, хотя в настоящее время они могут выглядеть извне как абстрактные поиски. Например, мы ищем 119-й и 120-й химические элементы, для этого реализован ряд решений на фабрике сверхтяжелых элементов ОИЯИ в Дубне, у Юрия Оганесяна. Ученые «Росатома» принимают активное участие в этой работе. 118-й элемент, оганесон, закрывает, с одной стороны, седьмой период таблицы Менделеева, с другой — группу так называемых благородных (инертных) газов. Но является ли сам 118-й элемент инертным газом? Сможем ли мы открывать новые элементы далее или закроем таблицу Менделеева в ее классическом понимании? Потому что лишний электрон, который должен появиться в 119-м элементе, приведет к тому, что мы от инертного газа перейдем к созданию активного материала, подобного щелочным — францию, натрию, калию. 119-й элемент, если он возможен, — как он будет себя вести? Пока практического применения этим знаниям нет.

С другой стороны, в практическую плоскость перешел вопрос, как будет вести себя элемент № 96, кюрий, который мы планируем использовать как топливо в жидкосолевом реакторе (ЖСР). Мы рассчитываем, что ЖСР сможет работать без плутония, только на распаде кюрия. Если это подтвердится, то мы не будем захоранивать кюрий на тысячу лет и еще получим 600 МВт энергии. Это уже будет осязаемый успех от наших разработок. Хотя еще

На фото

Циклотрон ДЦ-280, на базе которого работает фабрика сверхтяжелых элементов в ОИЯИ



несколько лет назад кюриум не рассматривался как полезный элемент. На мой взгляд, исследовательский жидкосолевой реактор уже можно считать прообразом компонента замкнутой ядерной энергетики. Также предстоит технологическое освоение задач проекта «Прорыв», результаты проявятся в ближайшие десятилетия.

Все, что, как кажется, не приносит значимой экономической отдачи в ближайшие годы, становится базой — технологической и материаловедческой — для будущих разработок. Это позволит реализовать концепции не только замкнутого ядерного топливного цикла, но и высокотемпературных реакторов, управляемого термоядерного синтеза. И тут нам важен запрос от конструкторов смежных отраслей. Если они захотят воспользоваться нашими материалами, может быть, даже раньше ядерной энергетики, то смогут использовать наши находки в целом спектре индустрий: от добычи и транспортировки нефти и газа до двигателей, летательных аппаратов, материалов подводных, арктических, космических кораблей.

— Складываются ли контакты такого рода с технологическими компаниями и корпорациями?

— К нам регулярно обращаются разные предприятия. В рамках национального проекта «Новые атомные и энергетические технологии», который охватывает энергетику в целом, поменялась парадигма: если раньше достаточно было просто представить разработки, то теперь мы должны довести их до уровня промышленного освоения. Сегодня и внутри «Росатома», и в связке с нашими партнерами, которые занимаются авиационно-космической техникой, судостроением и так далее, мы в рамках нацпроекта решаем задачи создания производственных установок. С НИИТФА, например, занимаемся организацией микрометаллургического производства, чтобы создавать сложные сплавы не на основе железа. Они нужны, к примеру, для ИЖСР и не только. Никелевые сплавы обладают более высокой термостойкостью, мы сможем распространить их на ВТГР и так далее — это подъем рабочих температур до 1000 °С. Также для нас актуально развитие тугоплавких материалов: в НИИ НПО «ЛУЧ» мы создаем производство изделий под температуру более 1500 °С — они пригодятся для космических двигателей, газовых турбин.

Еще одно направление — магнитные материалы. Например, для высокоскоростных поездов, которыми мы в ближайшие несколько лет начнем пользоваться, нужны эффективные магниты. Мы работаем не только с составом магнитов как таковых, а исследуем структуру магнитного поля. Улучшая и совершенствуя его для изделий железнодорожного машиностроения, мы рассчитываем применить эти наработки в электромобиле.

— Где у вас есть возможности применения новых информационных технологий, таких как искусственный интеллект?



— В ближайшее время будет реализован проект под названием «Автоматизированный синтез», который объединит две компоненты. Первая — искусственный интеллект, помогающий определить необходимые характеристики материала. Вторая — это система синтеза, которая будет создавать вещество на основании предложений ИИ. Мы сможем получать в сутки до 10 рабочих образцов материала — это очень быстро. Образцы будем испытывать по новым, ускоренным методикам, а результаты снова загружать для обработки ИИ. Уже в этом году такая система появится у нас в научно-исследовательском институте в Подольске, со следующего года системно начнем на ней исследовать базовые композиции: это нержавейка, титановые, высоколегированные материалы, высокоэнтропийные сплавы, сплавы на основе тугоплавких материалов. Это будет не перебор, а целенаправленный поиск с корректировкой на основе сходимости расчетов и результатов.

— Где вы видите дефицит в аспекте кадрового обеспечения и как с ним бороться, включая вопрос утечки мозгов?

— Мы много занимаемся этим вопросом. Еще в пору руководства ЦНИИТМАШ пришлось создавать лаборатории заново, и я знаю, что нужно решить триединую задачу. Первая составляющая: должен быть лидер, который обладает качествами пассионария, способен убедить людей, что они занимаются великим или хотя бы очень перспективным делом. Вторая составляющая: как завкафедрой МИСИС знаю, что студентов очень привлекает перспектива и конкретной работы, и высокой квалификации, которая позволит реализовать себя в разных сферах. Третья составляющая: нужно предложить прикладную сферу, где молодой ученый сможет увидеть осязаемые результаты своего труда. Не в литературе, а в конкретных деталях, узлах, машинах.

На фото

Строительство энергоблока с инновационным реактором БРЕСТ-ОД-300 в Северске (октябрь 2026 г.). Материаловеды «Росатома» участвуют в решении актуальных задач по созданию перспективного ядерного топлива, в том числе для быстрых реакторов направления «Прорыв»

Текст: Алексей Комольцев

Фото: «Росатом Наука»

Рак попятится назад

Наука для здоровья: репортаж с нового предприятия «Росатома», где будут выпускать препараты для ядерной медицины



В Калужской области в конце августа в опытно-промышленную эксплуатацию запущены две первые технологические линии нового завода по производству радиофармацевтических лекарственных препаратов (РФЛП), который «Росатом» создает в соответствии с международными стандартами фармацевтики GMP (Good Manufacturing Practice). Рассказываем об этом уникальном производственном комплексе и о том, как его продукция будет помогать в диагностике и лечении опасных заболеваний.

Вчера, сегодня, завтра

В Калужской области исследования в сфере радиофармацевтики стартовали с середины 1960-х, точкой отсчета стал запуск исследовательского реактора ВВР-ц в филиале НИФХИ им. Л. Я. Карпова в 1964 году. Этот реактор, регулярно проходя

модернизации, действует и в настоящее время. Начиная с конца 1970-х исследования сосредоточились на радиоизотопных соединениях, которые затем стали основой для диагностических и терапевтических РФЛП. С 1980-х годов было налажено серийное производство генераторов технеция-99m на основе молибдена. На текущий момент произведено более 50 тыс. генераторов технеция-99m, поставляемых в 170 клиник РФ. Запущена программа производства йода-131 благодаря тесному сотрудничеству с МРНЦ им. А. Ф. Цыба, налажен выпуск уникального препарата на основе самария-153 для обезболивания при костных метастазах. Накоплен более чем 40-летний опыт производства радиоизотопной продукции. На выпускаемые в Калужской области препараты действует шесть регистрационных удостоверений.

Новая страница в производстве РФЛП открывается вместе с новым заводом, который начинает работу в Калужской области. В настоящее время завершается строительство первой очереди производства,

в режиме опытно-промышленной эксплуатации будут запущены пять технологических линий, для двух первых линий этот режим уже введен. Оборудование будет протестировано с нейтральными средами, к концу года намечен выпуск опытных партий. Они будут проходить независимое исследование в специализированных медицинских организациях.

В 2027 году планируется завершить строительство всего завода. Выход на проектную мощность запланирован на конец 2028 года, когда все 16 технологических линий начнут работу.

Стерильность с поправкой на дозу

Уникальность объекта в том, что на нем сошлись две строжайшие системы правил — одна по радиационной безопасности, известная «Росатому»; другая — требования к фармацевтическим производствам. Поэтому здание максимально насыщено инженерными системами и решениями, обеспечивающими и радиационную безопасность, и биологическую стерильность. Общий объем инженерных систем весьма значителен — речь идет о сотнях километров трубопроводов и воздухопроводов. Регулятором (Минпромторгом) установлены жесткие требования по соблюдению GMP (Good Manufacturing Practice, «надлежащая производственная практика»). Это международный стандарт производства и контроля качества лекарственных средств. Он признан и в ЕАЭС, утвержден 77-м решением Совета Евразийской экономической комиссии в 2016 году. Документ, основанный на мировых стандартах GMP, периодически актуализируется, когда происходят обновления международного документа.

Требования надлежащей производственной практики предписывают организацию производства лекарственных препаратов в чистых помещениях. Это специально спроектированная среда, в которой под строгим контролем поддерживаются определенные параметры. Помещения обеспечены многоступенчатой очисткой приточного воздуха с установленной кратностью воздухообмена, необходимым количеством систем, обеспечивающих функционирование технологических линий (это обеспечение стерильности сжатого воздуха и газовых сред для работы оборудования, зонирование грязных и чистых зон). С начала 2027 года в ЕАЭС вступает в действие приложение № 1, которое ужесточает эти стандарты. Поскольку решение было ожидаемым, при разработке проектной документации и формировании требований к поставщикам оборудования его учли, и завод с момента начала эксплуатации будет соответствовать требованиям самой современной нормативной базы GMP по производству стерильной продукции.

Поскольку со стороны регулятора предъявляются требования относительно лабораторного входного, операционного и выходного контроля, все единицы лабораторного оборудования должны быть совместимы с радиационным фактором. Поставки такого оборудования завершаются, речь



Юрий Лемехов

Технический директор АО «Росатом Наука» (управляющая компания Научного дивизиона госкорпорации «Росатом»):

— Задачей «Росатома» было как масштабирование выпуска освоенной продукции, так и расширение линейки, чтобы обеспечить доступ пациентов к наиболее востребованным радиофармпрепаратам. Для этого и было принято решение о строительстве завода радиофармпрепаратов на Калужской земле. Предприятие тесно связано с существующей в регионе инфраструктурой — реакторной и энергетической, — которая обеспечена высококвалифицированными кадрами. Новый завод — единое производственное здание площадью почти 35 тыс. м², переменной этажности. На заводе будут созданы 16 производственных линий, способных обеспечить суммарную потребность до 60 тыс. Ки в год. Создается 250 высококвалифицированных рабочих мест. Кроме производства уже освоенных РФЛП, предстоит освоение новых препаратов по востребованной медиками линейке радиоизотопов: выпуск препаратов на основе актиния, лютеция и радия — продуктов, которые ранее «Росатом» серийно не производил.

идет о спектрофотометрических системах, высокоэффективной жидкостной хроматографии и другом аналитическом оборудовании. Собирается единый комплекс, обеспечивающий все этапы контроля качества.

Особенность завода — наличие микробиологической лаборатории, позволяющей работать с радиационным фактором; ранее подобных в нашей стране не было. В лаборатории будут работать с образцами продукции, проводить оценку технологических компонентов, исследовать микробиологическую чистоту воздуха и рабочих сред. Микробиологическая лаборатория предусматривает работу с третьей и четвертой группами патогенности с возможностью выдачи заключений для продукции не только завода, но и других производителей.

Амбиции проекта шире, чем 16 технологических линий и 20 позиций продукции (линии могут производить не один, а несколько препаратов). «Росатом» ведет исследования по РФЛП на основе

тория-227 и тербия-161. Медицинское сообщество тоже работает над расширением нозологий — показаний к применению: РФЛП, основанные на уже применяемых радиоизотопах, могут использоваться в других концентрациях и лекарственных формах, а также для расширенного спектра диагностических и терапевтических целей. В связи с этим на заводе предусмотрели создание собственной R&D-лаборатории и участка, где на широкой номенклатуре изотопов можно будет синтезировать значительный перечень экспериментальных РФЛП. Это обеспечит производство и возможность поставки препаратов в лечебные учреждения для доклинических и клинических исследований.

Раздвигая границы

«Росатом» является лидером и естественным монополистом в области поставки изотопов и по этой причине единственным системным игроком на рынке РФЛП, поскольку способен производить на своих предприятиях максимально широкий спектр изотопов. Для наработки изотопной продукции медицинского назначения используются исследовательские и энергетические реакторы, организована система, в рамках которой различные площадки страхуют друг друга в наработке радиоизотопов, обеспечивая необходимый для рынка объем.

При сооружении завода радиофармпрепаратов в первую очередь ориентировались на удовлетворение национальных потребностей. Производственная программа формировалась совместно с Минздравом, продукты завода включены в показатели нацпроекта «Здравоохранение». «Росатом» как лидер рынка заинтересован в поставках не только сырьевых радиоизотопов (они уже направляются в 50 стран), но и радиофармпрепаратов в страны ЕАЭС и БРИКС. Соответствующие договоренности на межправительственном уровне были достигнуты в 2024 году, и в настоящее время ведется работа по организации поставок. Таким образом, из Калужской области РФЛП будут поставляться и за рубеж.

Уже налажены устойчивые продажи генераторов технеция в Беларусь, выполнены первые поставки в Киргизию, прорабатывается расширение географии внутри ЕАЭС. После получения заводом сертификата GMP ЕАЭС предстоит выстроить договорные отношения с потребителями из дальнего зарубежья, пройти их инспекцию, и можно будет начать системные поставки. После завершения строительных работ и прохождения ряда процедур (сертификации, инспекций) откроется путь к всемирному масштабированию поставок.

Медицинское сообщество заинтересовано в расширении номенклатуры радиоизотопной продукции и расширении сферы применения для пациентов. Поэтому и перечень изотопов и созданных РФЛП будет расти. Наибольший потенциал просматривается у новых РФЛП на основе тербия-161. На данный момент есть публикации по расширению применения

препарата на основе актиния-225. Препарат еще не зарегистрирован, но в ряде стран клинические исследования ведутся, и на калужском заводе рассматривается возможность производства препаратов на его основе, постановки на производство. Заметен и устойчивый спрос на продукты на основе меди-64 циклотронного производства. Но завод под Калугой больше ориентирован на изотопы, получаемые в ядерных реакторах.

Масштаб имеет значение

В основном радиофармпрепараты и в Российской Федерации, и в мире получают в радиофармацевтических — небольших производствах при онкологических центрах. В мире также прижилась технология распределенных сетей, где с большим количеством ручного труда производятся небольшие партии. Достоинства такого подхода — живая клиническая практика, возможность быстро реагировать на запросы врачей. Есть и недостатки: сложнее организовать контроль качества и радиационную безопасность, большие трудозатраты (и, соответственно, стоимость).

Поскольку потребности в РФЛП растут, а в линейках изотопов и препаратов определились устойчивые предпочтения, это создало условия для крупных производств с надлежащей культурой управления качеством и мерами безопасности для персонала. Создаваемый в Калужской области завод — один из крупнейших в мире. По сути, в этом проекте консолидированы поставки радиоизотопов от разных предприятий «Росатома» и создана единая GMP-зона, которая обеспечит выпуск продукции при полном контроле.

На линиях нового завода в смену можно будет выпускать от 100 до 200 флаконов в зависимости от номенклатуры продукции. Самое важное преимущество — не зависящий от человеческого фактора выпуск продукции со стабильным качеством. Под действием рыночных законов системный серийный выпуск приведет к удешевлению радиофармпрепаратов, сделает их более доступными для большего круга пациентов.

Завод под Калугой — лишь первый шаг для обеспечения пациентов Российской Федерации. Запланированные на данный момент производственные мощности удовлетворяют спрос на перспективу до 2030 года, что можно назвать уже завтрашним днем. С учетом возможности масштабирования и работы в режиме нескольких производственных смен, производительность можно будет нараститькратно. Когда возникнет потребность в создании аналогичного завода под конкретную линейку, новую площадку будет целесообразно рассмотреть в привязке к реакторам, которые нарабатывают изотопную продукцию, и, соответственно, к логистическим цепочкам. Но с учетом того, что РФЛП являются короткоживущими, а в мире возникают новые центры потребления этой продукции, может потребоваться создание

новых производственных площадок на рубеже 2040–2045 годов в других регионах.

Хранить бережно, но не долго

Заместитель технического директора АО «Росатом Наука» Иван Сотников продемонстрировал систему обращения с радиоактивными отходами. Вся система обращения с радиоизотопами и хранилище активных отходов — объекты, к которым предъявляются требования Ростехнадзора в части обеспечения радиационной безопасности и обращения с отходами.

«Хранилище — полностью автоматизированная, безлюдная система. В отходы будут попадать расходные элементы, которые используются в технологическом процессе и непосредственно контактируют с радиофармпрепаратом. Это капилляры, трубки, иглы, бутылки для приготовления растворов, фильтры и другие компоненты. Некоторые заменяются после каждого технологического цикла. Дорогостоящие изделия, такие как стеклянные бутылки, можно отмыть, продезинфицировать и вернуть в цикл», — рассказал Иван Сотников.

На технологических линиях для извлечения загрязненных расходных компонентов из боксов предусмотрены манипуляторы и шлюзы. Загрязненные элементы помещаются в защитные пеналы, те размещаются в радиационно-защитной тележке. Она с верхних этажей перемещается лифтом вниз, где оборудованы хранилища (всего их три, под разные виды отходов). Оператор непосредственно в помещении хранилища отсутствует, обращение с отходами осуществляется без присутствия людей.

Поставку комплекса с манипулятором, пеналами и хранилищем выполнило белорусское предприятие «Сосны» в кооперации с российскими предприятиями. Подобные комплексы работают на многих площадках «Росатома», все технические решения надежно себя зарекомендовали. Цилиндрические стальные ячейки «магазина» в полу хранилища вмещают по два пенала. Они закрываются крышками — на одних крышках надпись «Легкая» (эти пеналы для менее активных отходов), одна такая крышка весит 44 кг. Крышка с надписью «Тяжелая» весит 75 кг и закрывает пенал для более загрязненных отходов. Но ни крышки, ни пеналы не придется перемещать руками, все сделает кран-манипулятор с цанговым захватом.

«У манипуляторов предусмотрено три режима работы. Первый — пусконаладка, когда каждая операция выполняется автоматически, но по команде оператора. Второй режим — ручной, наведение осуществляется с рабочего пульта. Третий — полностью автоматический, когда система сама наводится и захватывает объект. Но даже в полностью автоматическом режиме оператор наблюдает за работой из отдельного помещения. На его рабочем месте на нижнем мониторе отображается схема размещения с номерами ячеек, в память системы вводится информация о том, в какой ячейке какой пенал находится, на какой технологической линии и когда он был загружен. Это позволяет оценить



преобладающий радионуклид и время его выдержки. На верхнем мониторе отображается визуализация системы наведения, чтобы оператор мог визуально контролировать наведение или вести работу в ручном режиме. Пульт управления является общим для трех хранилищ», — пояснил Иван Сотников.

Все радиоактивные отходы на этом заводе являются короткоживущими элементами, периоды полураспада которых составляют порядка двух-трех суток. Прележав определенное время, не более 10 периодов полураспада, радиоактивные вещества практически полностью исчезнут. После этого будет проведен контроль в отдельном помещении, это позволит убедиться в отсутствии остаточной активности. Если все чисто, содержимое пеналов (пластик, иглы, фильтры и т.д., уже без радиоактивного загрязнения) будет отнесено к твердым промышленным отходам; если активность сохраняется — то отправится на дополнительную выдержку или в хранилище низкоактивных отходов.

Для случаев возникновения значительного объема активных отходов (это маловероятно, но в отрасли принят консервативный подход к оценке рисков) предусмотрено наличие тяжелого защитного контейнера. В него загружаются загрязненные радионуклидами отходы, затем он транспортируется в хранилище среднеактивных отходов (оно организовано в пределах промзоны предприятия). Это обеспечивает соблюдение полной безопасности завода.

Активный активный

«Перспективными радионуклидами, с которыми в настоящее время проводится наибольшее количество исследований, являются актиний-225, лютеций-177 и радий-223, — рассказал начальник отдела разработки новых продуктов Глеб Локтев, продемонстрировавший линию по производству актиния-225. — Этот

препарат представляет собой наибольший интерес благодаря своим ядерно-физическим свойствам — испусканию альфа-частиц с коротким пробегом, что обеспечивает локальное воздействие на опухолевые клетки. Актиний-225, в отличие от радия-223, может связываться с более широким перечнем молекул для направленного действия на конкретную ткань. Это позволяет осуществлять адресную терапию метастазов, например при раке предстательной железы, по всему организму».

Линия по производству радиофармпрепарата на основе актиния-225 функционирует в режиме опытно-промышленной эксплуатации. Она обеспечит выпуск более 100 флаконов в неделю, что удовлетворит потребность всех клиник страны. Флаконы объемом 15 мл содержат раствор для внутривенного введения; в клиники они поступают в радиационно-защитном контейнере. Закрываются флаконы крышкой, через которую медицинский персонал делает прокол шприцем для набора препарата. Запаянные ампулы не подходят: при их вскрытии существует значительный риск пролития раствора, что в случае с радиоактивными веществами крайне нежелательно.

Особенностью технологической линии является применение автоматизированного модуля синтеза (где происходит соединение изотопа актиния и молекулы-носителя). Модуль российского производства способен обеспечить выпуск больших партий, этим он выгодно отличается от зарубежных аналогов, не обеспечивавших нужную производительность.

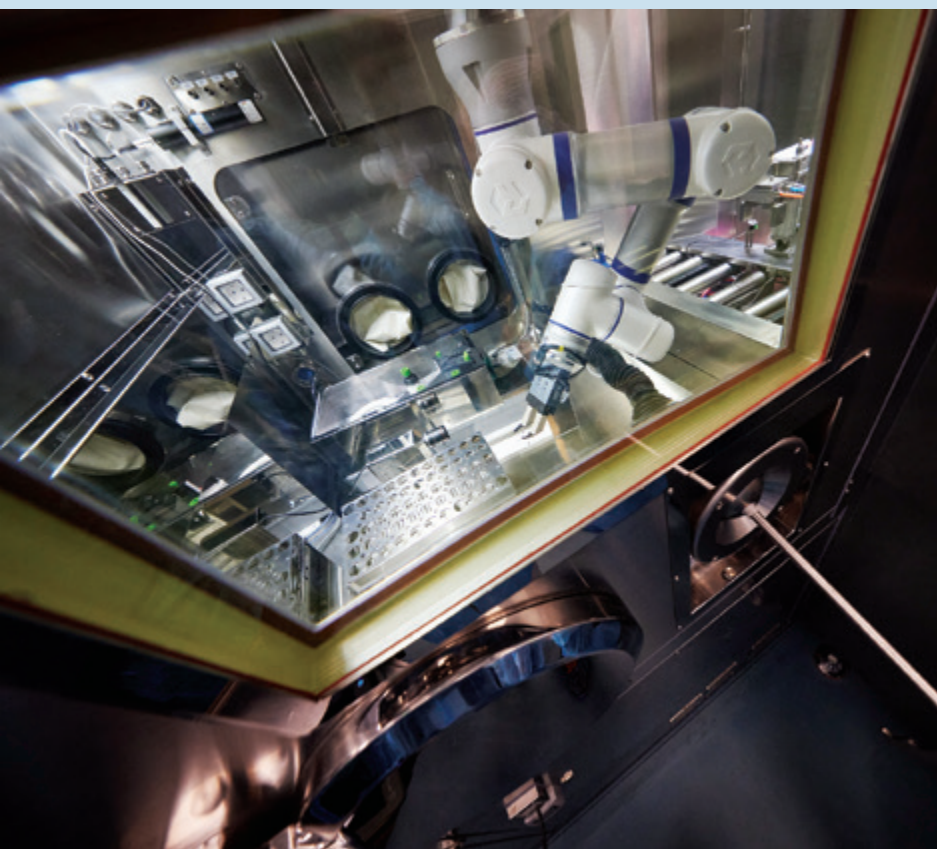
Период полураспада актиния-225 составляет 10 дней. В зависимости от удаленности клиники, время доставки может варьироваться от одного часа до нескольких дней. Чтобы продлить этот действенный период, во флакон можно загрузить более высокую концентрацию радиоактивного вещества; после предкалибровки необходимая больному доза активности будет определена на месте. Линия позволяет быстро перестраивать объем активности, «разливаемой» по флаконам.

«В качестве молекул направленного действия могут использоваться моноклональные антитела, белки, пептиды. В автоматизированном модуле синтеза происходит присоединение молекул к радионуклиду. Это продукция высокотехнологичных фармацевтических производств — их в России пока немного, но они есть, в том числе в Калужской области и Московском регионе. Поэтому и по продукции биотеха завод технологически независим от импорта», — подчеркнул Глеб Локтев.

Производство в пределах линии полностью роботизировано. Актиний вносится в первую горячую камеру, во вторую — компонент с молекулами направленного действия. Автоматизированный модуль синтеза осуществляет приготовление препарата: правильное смешение, нагрев в нужный момент времени и выполнение всех технологических операций. Тонкость в том, что радионуклиду все равно, что лечить — рак или соседнюю молекулу; когда радионуклид связывается с молекулой направленного действия, сама она тоже может разрушаться под воздействием излучения. Поэтому отрабатывается такой режим, чтобы синтез происходил с минимальными потерями.

Затем продукт перемещается по капилляру, расположенному с тыльной стороны технологической линии, в третью горячую камеру, где находится большая емкость, из которой происходит последующее дозирование по флаконам при помощи робота. Далее флаконы завальцовываются. Простая стерилизация паром здесь не применяется, поскольку молекула может разрушиться от высоких давлений и температур. Вместо этого используется стерилизующая фильтрация при помощи фильтров, у которых размер пор меньше размера бактерий. В четвертой камере робот проверяет флакон на наличие механических примесей, наносит этикетку и помещает флакон в транспортный свинцовый контейнер.

Линейка РФЛП на этой линии может быть различной, она зависит от молекул направленного действия. Но изотоп — только актиний-225: нельзя допустить контаминации различными излучениями. Попадание бета-излучателя, такого как лютеций-177, сделает препарат бракованным. И хотя на заводе будут делать и препараты на основе лютеция-177 с аналогичными молекулами для адресной доставки, на полностью аналогичной технологической линии и по такому же процессу, это будет линия только под лютеций. Если биологический компонент препарата варьировать допустимо, то радиологический — категорически нет. В процессе контроля качества приборы детектируют



чрезвычайно малые количества — буквально сотни атомов, которые являются радиоактивными.

Чистые комнаты, горячие камеры и холодный расчет

Еще одна технологическая линия предназначена для производства радиофармацевтического препарата на основе радия, о ней рассказал Владислав Головин, руководитель комплекса GMP-производства. «Радия-223 хлорид — лекарственный продукт, позволяющий проводить терапию костных метастазов, возникающих вследствие рака предстательной железы. Он также отличается тем, что является альфа-эмиттером. Альфа-частицы характеризуются коротким пробегом в тканях — около 100 микрон. После внутривенного введения изотоп циркулирует в кровотоке и избирательно накапливается в костных структурах, поскольку по химическим свойствам схож с кальцием. Раковые метастазы, обладая повышенной метаболической активностью, интенсивно поглощают микроэлементы. Вследствие этого концентрация радия в онкологических очагах оказывается намного выше, чем в здоровых тканях. Таким образом, препарат локально доставляется именно в зону поражения, максимально воздействуя на опухолевую структуру, разрушая ее и одновременно минимизируя радиационную нагрузку на здоровые органы, что является ключевым преимуществом данной терапии», — объяснил Владислав Головин.

Производство препарата осуществляется на линии из пяти камер. Первая предназначена для внесения расходных материалов: флаконов, пробок, колпачков и технологических коммуникаций. Во второй готовится полупродукт, который по радиационно-защищенному каналу передается в третью камеру, где проводится финальное приготовление готового лекарственного средства и его розлив во флаконы.

Автоматизированная система фасует заранее рассчитанный по активности раствор в соответствии с требованиями заказчика. Затем флаконы закупориваются пробками, обжимаются колпачками. Проводится измерение активности готового препарата. Далее роботизированная рука укладывает флаконы в специализированный лоток.

После завершения фасовки проводится измерение номинальной активности изделия, передача измеренных флаконов в лоток роботизированной рукой, а сам лоток с готовым продуктом направляется в паровой стерилизатор, расположенный в четвертой камере, где проводится автоклавирование (в данном случае это допустимо) для обеспечения стерильности конечного продукта, поскольку препарат вводится непосредственно в кровь пациента. После стерилизации флакон перемещается в пятую камеру, где автоматизированная рука подает его на оборудование контроля механических включений. Затем флакон также обкатывается этикеткой с полной информацией о произведенной серии и тем же манипулятором помещается в свинцовый защитный контейнер, закрывается крышкой и выгружается в техническую зону.



Завершающий этап — вторичная упаковка, измерение мощности дозы изделия в защитном контейнере и последующая отправка конечному заказчику.

«Заложенная мощность позволяет обеспечивать препаратом не только отечественных, но и зарубежных заказчиков, нуждающихся в данном радиофармацевтическом средстве. В России применение этого препарата осуществляют онкологические центры, имеющие разрешение на работу с радиоактивными источниками. Белорусские партнеры также осваивают этот препарат. Планируется, что при благоприятных условиях и соответствующем запросе поставлять продукцию из Калужской области будут не только в Российскую Федерацию, но и за ее пределы. Производственная мощность составляет 200 флаконов в смену — это с запасом, чтобы и обеспечивать внутренний рынок, и экспортировать», — рассказал Владислав Головин.

Безопасность вдвойне

В среднем технологический процесс требует участия от двух до трех человек, в зависимости от стадии работы. Например, на линии радия-223 задействованы три человека. Дополнительно имеется вспомогательный персонал, который может находиться в технической зоне либо привлекаться со стороны. Все сотрудники обучены и знают свои обязанности. Линия оснащена защитными радиационными камерами, рассчитанными под загружаемый запас активности. Все работы будут проводиться по нарядодопуску для работ с радиационными источниками. Каждому сотруднику присваивается индивидуальный дозиметр. Если сотрудник приближается к источнику излучения, прибор немедленно предупреждает его о нахождении в небезопасной зоне. Все опасные факторы минимизированы, однако производство требует строгого соблюдения правил радиационной безопасности, которые на заводе будут выполнять в соответствии со стандартами отрасли.

Текст: Ольга Ганжур

Фото: ПО «Маяк», Алексей Башкиров / газета «Страна Росатом»

Переработка будущего: от модели до предприятия

Перспективы развития радиохимических технологий

«Росатом» реализует комплексную отраслевую программу «Развитие радиохимического направления». В планах — модернизировать действующие мощности, построить новый завод и к началу 2040-х годов выйти на переработку свыше тысячи тонн ОЯТ в год. Что уже сделано учеными и инженерами и как им помогает «цифра»?

Программный документ

Разработку комплексной программы работ по радиохимическому направлению инициировала госкорпорация «Росатом». «В 2022 году на Радиевый институт им. В. Г. Хлопина (входит в Научный дивизион «Росатома») была возложена функция главной отраслевой научной организации по радиохимическим технологиям в гражданской части, — вспоминает Дмитрий Рябков, заместитель генерального директора

Радиевского института по науке. — Эта функция потребовала разработки программы НИОКР. Помимо отраслевых организаций, в ее формировании принимали участие ведущие вузы, а также институты Российской академии наук».

К концу 2024 года программу утвердили. Основные ее цели — обеспечить научно-технологическую и производственную базу для двухкомпонентной атомной энергетики с замкнутым топливным циклом, решить проблему накопления отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), а также расширить присутствие госкорпорации на международном рынке переработки ОЯТ. «Мировые запасы ОЯТ составляют порядка 360 тыс. тонн, и активное строительство АЭС российского дизайна за рубежом дает России уникальный шанс закрепить свой лидерский статус на мировом рынке ядерных решений», — подчеркнул заместитель генерального директора госкорпорации «Росатом» по машиностроению и промышленным решениям Андрей Никипелов.

На фото

Перегрузка ОЯТ на радиохимическом заводе ПО «Маяк»



На фото

В Институте Бочвара разрабатывают новые технологии остекловывания радиоактивных отходов

«Чтобы достичь заявленных целей, в программе сформировано три блока решений, — говорит Дмитрий Рябков. — Первый блок нацелен на техническое перевооружение завода РТ-1 на ПО «Маяк», чтобы обеспечить переработку до 400 тонн ОЯТ в год. Второй блок — это ввод в эксплуатацию и поэтапный выход на проектную мощность опытно-демонстрационного центра (ОДЦ) по переработке ОЯТ на Горно-химическом комбинате (ГХК) производительностью 220 тонн в год. И третий блок — это создание нового завода по переработке топлива большой производительности — 400 тонн в год».

Три кита переработки

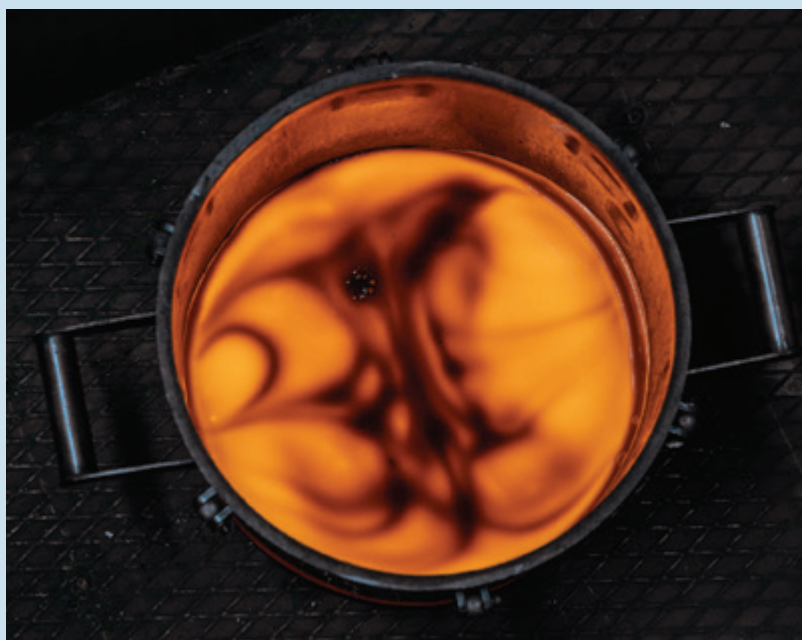
Радиохимический завод ПО «Маяк» готовится к масштабной модернизации. «Мы работаем над проектом дополнительного отделения фильтрации аффинажа, — сообщил заместитель гендиректора Радиевого института по науке. — Новый узел позволит устранить то узкое место в технологической цепочке, которое ограничивало производительность РТ-1. В этом году головная проектная организация, Центральный проектно-технологический институт (ЦПТИ, входит в «ТВЭЛ»), должна выпустить проект для экспертизы».

В прошлом году на ГХК ввели в эксплуатацию вторую очередь ОДЦ — промышленный модуль (первый, запущенный в 2015 году, был лабораторным). «Идут наладка и испытания смонтированного оборудования. В следующем году начнется отработка инновационной технологии», — рассказал Дмитрий Рябков. Обновленный РТ-1 и ОДЦ должны выйти на полную мощность в 2029 году.

На конец будущего десятилетия запланирован пуск нового завода большой производительности. Команда этого масштабного проекта формируется. «Уже определены головная проектная организация — ЦПТИ, головная научная организация — Радиевый институт. Сейчас определяются организации, исполняющие функции главного технолога и главного конструктора, — отметил Дмитрий Рябков. — Институт Бочвара с участием Радиевого института и ряда других организаций разработал исходные данные и материальные балансы технологической схемы нового завода. ЦПТИ в рамках обоснования инвестиций определил три площадки, где экономически выгодно можно разместить этот объект: ПО «Маяк», Сибирский химический комбинат (СХК) и ГХК. Выбор предстоит сделать до конца 2026 года и далее перейти к этапам проектирования».

Завод в перспективе

Уже известно, что новый завод будет модульным, чтобы легче наращивать мощность. Предприятие сможет перерабатывать ОЯТ как тепловых, так и быстрых реакторов. Технологическая схема изменится по сравнению с применяемой на ПО «Маяк». В частности, добавится головная высокотемпературная операция волоксидации (объемного окисления) отработавшего топлива, которая сделает переработку



эффективнее и безопаснее. Кроме того, на заводе обязательно внедрят фракционирование радионуклидов, что оптимизирует объемы и состав образующихся радиоактивных отходов.

«Мы должны извлечь из ОЯТ ценные энергетические компоненты, прежде всего уран и плутоний, чтобы запустить их обратно в топливный цикл и обеспечить потребности в сырье энергосистем четвертого поколения, — подчеркнул директор по государственной политике в области РАО, ОЯТ и вывода из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов госкорпорации «Росатом» Василий Тинин. — А параллельно — извлечь множество компонентов, которые можно использовать и в ядерной медицине, и в промышленности, и в горнорудных изысканиях».

Кроме того, в процессе фракционирования планируют выделять минорные актиниды: нептуний, америций и кюрий, чтобы минимизировать объем высокоактивных отходов. «Америций должен пойти на дожигание в быстрых реакторах. Судьба кюрия пока определяется, — объясняет Дмитрий Рябков. — Еще одна выделяемая фракция — так называемая цезий-стронциевая. В перспективе планируется предлагать зарубежным партнерам услугу переработки ОЯТ с возвращением заказчикам радиоактивных изотопов цезия и стронция с периодом полураспада около 30 лет. Этой фракции не требуется глубинное захоронение, ее можно безопасно хранить на относительно небольших глубинах».

Радиоактивные отходы (РАО) на заводе предполагается остекловывать, но не в громоздких неразбираемых печах — оборудование должно быть малогабаритным, ремонтпригодным и чтобы после выработки ресурса его можно было легко демонтировать. Рассматривается индукционное плавление в холодном или горячем тигле.



На фото

Запуск второй очереди опытно-демонстрационного центра по переработке ОЯТ на ГХК в Железногорске состоялся в 2025 году

«Поженить» химию и математику

В разработке радиохимических технологий, проектировании оборудования и производств атомщикам сегодня помогают цифровые технологии. В эту область атомной науки они пришли позже, чем в другие направления. «Есть мнение, что химию моделировать слишком сложно. Физика и математика всегда были ближе, чем химия и математика. Так исторически сложилось», — считает ведущий эксперт Института Бочвара Ольга Шмидт.

Заместитель директора, директор направления радиохимии частного учреждения «Наука и инновации» Андрей Шадрин добавляет: «При написании физической модели программисты опираются на известные константы и постоянные. В химии, в особенности в водных растворах, мы упираемся в низкоскоростные процессы, в кинетику. У нас реакции могут протекать часами. Возьмем термодинамические расчеты. Термодинамика — наука точная, она показывает, возможно некое событие или невозможно в конкретной точке. Но она не дает однозначного ответа, когда оно произойдет. Берем понятный любому пример. Москва, апрель, температура +10 °C. И посреди улицы лежит гора снега! В каждой конкретной точке все корректно, так как температура в точке не +10 °C. Но нас интересует система в целом. А ее состояние зависит от скорости подвода тепла в точку: снег не тает мгновенно, он превращается в воду постепенно. Так вот, как правило, для радиохимических процессов кинетические зависимости не определены. Никто этим всерьез не занимался. Радиохимических заводов в мире мало, эксперименты весьма дорогие: сложный пробоотбор, высокотехнологичные приборы... Вот и возникает разрыв. Написать модель можно, но с очень большими предположениями».

Тем не менее жизнь заставила ученых «поженить» радиохимию и математическое моделирование.

В начале 2000-х годов институт «Росатома» в Снежинске предложил программный комплекс для разработки технологической схемы будущего ОДЦ. «Вручную считать каждый узел долго, есть большой риск ошибок. Математики-программисты из Снежинска обратились к нам, радиохимикам, с предложением автоматизировать этот процесс, — вспоминает Ольга Шмидт. — Результатом стал виртуальный радиохимический завод — программный комплекс «ВИЗАРТ» (от «виртуальный завод радиохимических технологий»), который мы закончили разрабатывать уже в проектом направлении «Прорыв».

Завод в компьютере

«Прорыв» серьезно стимулировал развитие моделирования в радиохимии. В рамках проекта на Сибирском химкомбинате (СХК) создается опытно-демонстрационный энергокомплекс с быстрым реактором БРЕСТ-ОД-300, модулем фабрикации смешанного нитридного уранплутониевого топлива и модулем переработки (МП) ОЯТ.

«На старте было много неопределенности и технологических развилки. Пробовать все варианты экспериментально — времени, денег и людей не хватит. Надо моделировать, — рассказывает заместитель генерального директора — директор отделения разработки технологий обращения с ОЯТ и радиоактивными отходами (РАО) Института Бочвара Владимир Кашев. — «Прорыв» — проект мультидисциплинарный. Физики давно хорошо понимают практическую пользу математического моделирования, опыт химиков в этой сфере существенно меньше, поэтому использование цифровых технологий поначалу воспринималось ими настороженно. Конструкторы оборудования и проектировщики поначалу сопротивлялись цифровизации. Но опыт показал: когда хотя бы часть команды убеждена в необходимости использования моделирования для достижения цели и научный руководитель активно поддерживает цифровизацию, неуверенность и сопротивление преодолеваются».

«При проектировании МП ОДЭК у технологического оборудования и технологических процессов появились виртуальные модели оборудования и узлов, которые используются для анализа, оптимизации и управления производственными процессами. Созданный специалистами снежинского ядерного центра «Росатома» при активном взаимодействии с химиками-технологами Института Бочвара программный комплекс «ВИЗАРТ» позволяет проверять, как технологические участки модуля переработки будут работать в системе», — рассказывает Ольга Шмидт.

«На любом заводе есть множество замкнутых узлов, и схема взаимодействия между ними нелинейная. Есть потоки с возвратными продуктами, — объясняет Андрей Шадрин. — Посмотрим на примере человеческого организма. Когда вы лечите печень, таблетки и процедуры оказывают влияние и на все остальные органы. На заводе ровно то же самое.

Занимаешься одним процессом, а это влияет на несколько других. Пытаться оптимизировать отдельно работу каждого узла бессмысленно. Оптимизировать можно только систему в целом».

В «Прорыве» «ВИЗАРТ» решает три основные группы задач: расчет материального баланса, в том числе в зависимости от времени и с учетом эволюции нуклидных составов материального потока; моделирование отдельных технологических процессов и аппаратов для обоснования и оптимизации технологических режимов; расчет ключевых показателей технологических линий с учетом характеристик оборудования и различных режимов. Комплексные технологические процессы, такие как переработка ОЯТ, представляются в виде сложной схемы, состоящей из технологических переделов, связей между ними и технологических продуктов, которые передаются от передела к переделу.

Развитие «ВИЗАРТ»

«После того как мы научились считать автоматически материальный баланс последовательности технологических операций, поняли, что можем строить и циклограммы работы технологического оборудования — это важно для проектировщиков радиохимических производств, так как позволяет оценивать реальную производительность оборудования и технологических цепочек в целом, — рассказывает Андрей Шадрин. — Так началась разработка программного комплекса «ВИЗАРТ-РДМ», где РДМ — это регенерация делящихся материалов».

Новая версия виртуального радиохимического завода поможет оценивать все этапы переработки ОЯТ, анализировать состав и количество реагентов, объем образующихся отходов, параметры технологических операций и специфические для радиохимических процессов характеристики. На сегодня разработана структура «ВИЗАРТ-РДМ», заканчивается разработка программного обеспечения.

«"ВИЗАРТ" был заточен под индивидуального пользователя, «ВИЗАРТ-РДМ» — уже многопользовательская программа, размещенная на защищенном сервере, с правом доступа каждого разработчика, — добавляет Андрей Шадрин. — Две версии «ВИЗАРТ» друг от друга независимы. Идея одна и та же, но программы абсолютно разные, у них разная архитектура».

Разработчики продолжают совершенствовать обе версии, модернизируя алгоритмы, повышая скорость обработки данных, упрощая интерфейс и формы представления результатов. «Сейчас «ВИЗАРТ» выгружает расчетную схему в виде электронных таблиц. Мы хотим заменить их на мнемосхемы — наглядные графические изображения устройств, — поясняет Андрей Шадрин. — На каждом аппарате — всплывающая иконка. Нажимаешь и можешь увидеть, что там в данный момент происходит, какой процесс протекает. В общем, меняем форму представления результата на понятную заводским технологам. Программа будет

стоять на удаленном сервере в Москве или Петербурге, и к ней будут подключены предприятия, участвующие в проектировании радиохимических производств».

Сегодня все создаваемые радиохимические объекты «Росатома» проектируются и модернизируются с применением цифровых инструментов. Если в «Прорыве» цифровизация коснулась только деятельности ученых и технологов, то теперь эти технологии вынуждены осваивать и конструкторы, и проектировщики. «Технологи Сибирского химического комбината полюбили пользоваться результатами расчетов в «ВИЗАРТ»», — делится Ольга Шмидт.

«Специалисты ГХК, которые отрабатывают новую технологию на ОДЦ, часто к нам обращаются, — приводит пример Андрей Шадрин. — Когда решают производственные проблемы, просят нас оценить, как то или иное изменение на отдельном технологическом узле скажется на всей схеме завода. Мы надеемся, что в ближайшие годы специалистам комбинатов не придется прибегать к чьей-то помощи: «ВИЗАРТ» станет настолько дружественным, что они смогут его эффективно использовать самостоятельно».

Проект национального значения

«Цифровые технологии в радиохимии будут развиваться, только если новые заводы будут строиться. Если мы затащим процесс, будем продолжать до бесконечности разработки на бумаге, то и созданные цифровые инструменты канут в Лету», — предостерегает Владимир Кашеев.

По словам Дмитрия Рябкова, сейчас основное бремя финансирования комплексной отраслевой программы по радиохимии несет заказчик работ — Топливная компания «Росатома». Планируется, что часть работ будут включены в новый федеральный проект по радиохимии, которым хотят расширить нацпроект «Новые атомные и энергетические технологии». «Такой объект «Росатому» не потянуть без участия государства, — считает ученый. — Многое будет зависеть от того, как быстро ключевые радиохимические задачи «Росатома» будут включены в нацпроект».

Основные цели программы «Развитие радиохимического направления» — обеспечить научно-технологическую и производственную базу для двухкомпонентной атомной энергетики с ЗЯТЦ, решить проблему накопления ОЯТ, расширить присутствие «Росатома» на международном рынке переработки ОЯТ.

Текст: Ирина Дорохова

Фото: ФЭИ

«Без экспериментальной базы создать десятки быстрых реакторов к концу века невозможно»

Роль исследований в области реакторов на быстрых нейтронах в обеспечении перехода к замкнутому ядерному топливному циклу



Физико-энергетический институт — научный руководитель «быстрого» направления в «Росатоме» и один из «мыслительных центров» атомной отрасли, где формируются образ, структура и логика замыкания ядерного топливного цикла (ЯТЦ). Чтобы узнать, какое сейчас в госкорпорации представление о замкнутом ЯТЦ и что делается для того, чтобы он стал реальностью, «Вестник атомпрома» пообщался с начальником департамента физики реакторов ГНЦ РФ — ФЭИ им. А. И. Лейпунского Андреем Гулевичем.

— Какова сейчас концепция замкнутого ЯТЦ в представлении ученых ФЭИ?

— Для начала напомним, что этот год для ФЭИ юбилейный, ему исполнилось 80 лет. И практически с самого начала, с конца 1940-х годов, наш научный руководитель Александр Ильич Лейпунский, основываясь на самых свежих данных, которые тогда были в области ядерной физики, сформулировал свое видение роли быстрых реакторов и замыкания ЯТЦ. С тех пор наш институт — лидер в тематике быстрых реакторов в стране. Под нашим руководством были построены все отечественные быстрые натриевые, а также свинцово-висмутовые реакторы, которые использовались на подводных лодках.

В нашем институте более 20 лет назад зародилась концепция натриевого быстрого реактора БН-1200. Уже тогда предполагалось, что реактор БН-800 будет работать на уранплутониевом топливе и на нем будут реализовываться элементы замкнутого ЯТЦ, а БН-1200 станет головным коммерческим блоком. С 2022 года БН-800 полностью работает на МОКС-топливе, но пока в «открытом» по плутонию цикле, хотя первый опыт переработки топлива БН-800 уже имеется. По сути, это первый шаг в замыкании ядерного топливного цикла: при облучении в быстрых реакторах нарабатывается плутоний для новых порций топлива для быстрых и тепловых реакторов. Потенциально быстрый реактор может обеспечивать не только себя, но еще и тепловые реакторы, если природного урана будет не хватать или он будет очень дорог. Здесь все решит экономика топливного цикла.

Еще одна функция быстрого реактора — выжигать долгоживущие радиоактивные отходы, в частности минорные (младшие) актиниды. В «Росатоме» уже сейчас выполняется широкая программа по отработке технологий обращения с ними. Три сборки с единичными твэлами с америцием и нептунием были облучены в БН-800 и выгружены. Они остывают, затем с ними будет выполнен комплекс послереакторных исследований.

— Вы упомянули про использование плутония для тепловых реакторов...

— Да, это тоже часть работы по замыканию ядерного топливного цикла. В тепловом спектре изотопный состав плутония из МОКС-топлива довольно сильно портится, и повторно его использовать в тепловом реакторе нельзя. Но можно использовать в связке с быстрым реактором, так как изотопный состав плутония при облучении в быстром реакторе улучшается. Мы этот процесс называем «облагораживанием». Кроме того, сейчас разрабатывается реактор ВВЭР-С средней мощности, 600 МВт. Предполагается, что он будет управляться с помощью изменения водно-топливного отношения в активной зоне таким образом, чтобы спектр нейтронов становился более жестким. Тогда можно использовать МОКС-топливо, увеличивается коэффициент воспроизводства до приблизительно 0,7.

— Вы сказали, что БН-1200 будет головным коммерческим блоком. А БН-800?

— Этот реактор опытно-промышленный, развитие реактора БН-600. На БН-800 реализованы технологии, разработанные еще в прошлом веке. Но он получился дороже тепловых реакторов, в частности ВВЭР-1200. Для натрия, бурно реагирующего с воздухом и водой, требуются три контура и ожухование трубопроводов (дополнительная защитная оболочка), чтобы избежать разгерметизации первого контура. Чтобы натриевая технология стала конкурентоспособной, были предприняты, да и сейчас предпринимаются, большие усилия по снижению

себестоимости будущего БН-1200. И мы видим, что по своим финансовым параметрам (пока на бумаге) он приблизился к ВВЭР-ТОИ — такие блоки сооружаются на Курской АЭС-2, и первый уже запущен в эксплуатацию в этом году. Поэтому мы называем БН-1200 коммерческим.

Наш институт принимает активное участие в создании БН-1200. Мы предполагаем, что он заработает в середине 2030-х и с самого начала будет работать на МОКС-топливе в замкнутом ядерном топливном цикле и иметь возможности для выжигания америция и нептуния. Также мы ищем решения для выжигания кюрия — очень опасного элемента, возникающего при трансмутации америция, — в топливном цикле самого реактора БН-1200, не перекладывая эту проблему на специализированные установки типа жидкосольевых реакторов. Кюрий может принести много хлопот исследователям и эксплуатантам, но мы сейчас прорабатываем концепцию, которая позволит избавляться и от него, и от америция. Конечно, пользователю главное — цена электричества в розетке, а не то, что происходит в топливном цикле, но это же хорошо, что быстрые реакторы помогают сократить объем высокоактивных отходов. Благодаря совокупности всех этих факторов, уверен, БН-1200 может в XXI веке стать базой для развития коммерческих быстрых натриевых реакторов.

— Много разговоров было о том, какова должна быть пропорция быстрых и тепловых реакторов. Какова сейчас позиция ФЭИ по этому поводу?

— Да, среди специалистов есть разные взгляды на то, как будут развиваться тепловые и быстрые реакторы в двухкомпонентной системе и на каком топливе. Мы считаем, что в течение XXI века у нас будет сохраняться значимое количество тепловых реакторов, хотя часть ныне действующих уже скоро будут выведены из эксплуатации — это РБМК, ВВЭР-440 и первые тысячники. На замену им к середине века должны быть развиты технологии реакторов ВВЭР-С, которые смогут работать как на урановом, так и на МОКС-топливе. Для того чтобы обеспечить нужный объем плутония, нужны быстрые реакторы, работающие на МОКС- или СНУП-топливе. Например, один реактор БН-1200 на СНУП-топливе может полностью обеспечивать качественным плутонием два реактора ВВЭР-С мощностью 600 МВт. По нашим оценкам, к концу XXI века 50–60% реакторов будут с быстрым спектром нейтронов, 40–50% — реакторы ВВЭР-1200 и реакторы ВВЭР-С на уранплутониевом топливе, а общий объем атомной генерации в России на конец века, предположительно, составит 90–100 ГВт.

— Чтобы обеспечивать плутонием быстрые и тепловые реакторы, коэффициент воспроизводства должен быть больше 1. Каков, по вашим оценкам, оптимальный или наивысший коэффициент?

— Все зависит от задачи, стоящей перед быстрым реактором. Например, БН-800 был спроектирован таким образом, чтобы коэффициент воспроизводства

в активной зоне (КВА) был существенно меньше единицы. Это было связано с проблемой утилизации избыточного оружейного плутония в России и США, которая стояла лет 20 назад. Называлась цифра в 34 тонны. Россия предлагала сжечь этот плутоний в быстром реакторе, поэтому БН-800 проектировался как сжигатель плутония — с низким КВА и без бокового экрана. Но американцы не захотели идти по этому пути.

В БН-1200 коэффициент воспроизводства будет зависеть от используемого топлива. На МОКС-топливе реактор с боковым экраном и нижней торцевой зоной воспроизводства может обеспечить коэффициент воспроизводства порядка 1,2. Загружаем, условно, 1 тонну плутония, выгружаем 1,2 тонны более качественного плутония. На более плотном СНУП-топливе он может быть еще больше, вплоть до 1,3 или даже 1,35. Этого, мы считаем, вполне достаточно для обеспечения топливом системы из быстрых и тепловых реакторов.

В своих системных исследованиях мы учитываем, сколько у нас природного урана для тепловых реакторов, сколько будет в их облученном топливе плутония и каков его изотопный состав, что и сколько лежит на складе и что мы можем использовать прямо сейчас и так далее. Баланс непростой: мы, например, не можем просто наращивать производство плутония и складировать его. Плутоний — это такой продукт, который, как мы шутим, «протухает» со временем. Его изотоп плутоний-241 — очень ценный для реакций деления, но период его полураспада всего 14 лет. Поэтому ценность плутония со временем уменьшается. Есть и другая проблема: накапливается америций, с которым надо бороться. Поэтому мы моделируем, сколько нам надо плутония, чтобы не затоваривались склады, не накапливались минорные актиниды в системе ядерной энергетики, но и не было его дефицита.

— Как, предположительно, будет распределяться во времени строительство быстрых реакторов?

— В Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2042 года запланированы девять быстрых реакторов. У них может быть разная мощность и теплоноситель. Первым запланирован опытно-экспериментальный реактор БРЕСТ-ОД-300, а затем головной коммерческий БН-1200. Решения о том, какие именно блоки станут вводиться далее, будут приниматься по итогам пуска и эксплуатации БРЕСТ-ОД-300. Если все пойдет успешно и свинцовая технология покажет себя достаточно низкозатратной, то следующий реактор, вероятно, будет БР-1200. Он сейчас проектируется, главный конструктор — НИКИЭТ, руководит и координирует работу АО «Прорыв». После 2042 года планируется построить еще около 50 быстрых блоков, то есть примерно по блоку в год. Получится ли выполнить такой сценарий, сказать сложно. В атомной отрасли еще ни в одной стране, по-моему, не сбывся ни один долгосрочный прогноз. В начале 1970-х годов, например,

предполагалось, что к 2000 году в мире будут работать блоки совокупной мощностью несколько тысяч ГВт, из них в СССР — более 300 ГВт. Сейчас, как мы знаем, совокупная мощность атомных энергоблоков в мире около 400 ГВт. Правда, Китай ставит амбициознейшие цели — более 300 ГВт к 2050 году.

— Но это не значит, что вообще планировать не надо.

— Да, и мы рассматриваем различные сценарии: активного развития, стагнации и даже прекращения работы. Вывести из эксплуатации ядерный объект — задача не менее сложная, чем строительство. Куда девать плутоний, как безопасно уничтожить отходы — все эти вопросы требуют системного рассмотрения. Но мы уверены, что без атомной энергетики человечество не обойдется.

— Что ученые ФЭИ делают для того, чтобы атомная энергетика развивалась? Расскажите об экспериментах на стендах БФС-1 и БФС-2.

— Не только в ФЭИ, но и в целом в России многие ученые поддерживают тематику быстрых реакторов. Мы сотрудничаем с «Прорывом», ОКБМ, НИКИЭТ, Курчатовским институтом, АО «ТВЭЛ» и концерном «Росэнергоатом».

Про стенды: БФС-1 у нас появился в 1961 году. Он создавался как инструмент моделирования нейтронно-физических процессов в быстром реакторе. Это реактор нулевой мощности. Там нет отдельных твэлов и ТВС, а есть несколько сотен труб, в которые мы закладываем делящиеся и конструкционные материалы, замедлители, поглотители и так далее в виде блокочков. В быстром реакторе у нейтронов длинные пробеги — сантиметры или десятки сантиметров, поэтому нейтронам не важно, в какой форме у нас топливо — в стержнях или блокочках. Мы создаем упрощенную активную зону и можем вывести ее в критическое состояние с $K_{эфф}$, равным 1. Известно, что реактор может существовать при $K_{эфф}$, равном 1 на любой мощности — и 1 Вт, и 1 ГВт. Наша мощность — несколько десятков, может, сотня ватт. БФС-1 хорош тем, что даже на такой мощности мы можем экспериментально воспроизвести на нем нужный спектр нейтронов, измерить интересующие нас спектральные индексы, эффективность органов управления, распределение энерговыделений, эффективную долю запаздывающих нейтронов, пустотные эффекты реактивности и другие параметры активной зоны, похожей на активную зону «большого» реактора.

Вскоре после запуска БФС-1 стало понятно, что нужен стенд большего размера, и он был построен. Если на БФС-1 диаметр бака у нас примерно 2 м, то на БФС-2 — 5 м. Там моделировались БН-350, БН-600, БН-800 на уране и МОКСе, БРЕСТ-ОД-300, сейчас работаем над БН-1200. Два года моделировали его работу на СНУП-топливе, а в прошлом и этом году — на МОКСе.



В 2010 году в федеральную программу «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010–2015 годов и на перспективу до 2020 года» вошло техническое перевооружение комплекса критических стенов БФС. Мы обновили стендовое оборудование, различные системы, получили много материалов — делящихся, поглощающих и других, — необходимых для моделирования больших энергетических реакторов типа БН и БРЕСТ. Повторный ввод в эксплуатацию БФС-1 состоялся в 2019 году, а БФС-2 — в 2021 году. С тех пор ведем очень широкий спектр исследований. Мы моделировали китайский SEFR, французский ASTRID, выполнили большой спектр исследований для многоцелевого быстрого исследовательского реактора (МБИР). С конца 2023 года мы моделируем на БФС-1 ВВЭР-С. Используем как традиционные, так и нетрадиционные технологии. Достаточно сказать, что нам удалось поместить в центр нашего стенда бак с водой и реальными МОКС-твэлами, которые изготовил Сибирский химический комбинат. Заказчиком работы выступает АО «ТВЭЛ».

— Что делаете на обоих стендах сейчас?

— У нас большая программа, рассчитанная до 2029–2030 годов. На БФС-1 мы продолжаем эксперименты для ВВЭР-С, исследуя различные конфигурации активной зоны. В ближайшее время приступим к работам с борным поглотителем — борной кислотой, затем — с выгорающими поглотителями и так далее. Это большая и интересная работа. По просьбе НИКИЭТ и Горно-химического комбината (ГХК)

мы изучаем возможности смоделировать на БФС-1 характеристики жидкосолевого реактора ИЖСР, который планируется построить на ГХК. Это реактор небольшой мощности, порядка 10 МВт, для решения проблемы минорных актинидов, в частности кюрия. Чтобы такой реактор запустить, надо экспериментально смоделировать его «физику», а, кроме БФС, другого такого инструмента нет нигде в мире. Мы изыскиваем возможности приступить к этим работам с 2028 года.

— А на втором стенде что делаете?

— Моделируем БН-1200. Дела идут очень активно. Для моделирования его активной зоны нам потребовалось собрать миллион (!) блоков примерно 5 см в диаметре и 3 мм высотой — как гигантское лего. Все это прошло через руки наших инженеров, техников и рабочих. Таких моделей никто и никогда в мире не создавал.

— Очень круто!

— В этом году мы планируем завершить эксперименты, моделирующие нейтронно-физические характеристики штатной активной зоны БН-1200 с МОКС-топливом. Затем на этом же стенде запланирована серия экспериментов по безопасности: как себя будет вести реактор при гипотетической аварии с локальным расплавлением активной зоны и перемещением топлива. Конечно, не в реальности, а моделируя на стенде (перебирая блочки с делящимися и конструкционными материалами) активную зону

и измеряя на каждом этапе ее характеристики. Так мы верифицируем наши коды и, конечно, обоснуем и повысим безопасность будущего реактора.

Кроме того, мы планируем войти в национальный проект технологического лидерства «Новые атомные и энергетические технологии» и начать моделирование характеристик активной зоны БН-1200 на стенде БФС-2 со вставкой из нептуния. Это уникальные эксперименты, которые в мире никто не проводил, по уточнению нейтронно-физических констант для минорных актинидов. Есть также задумки по америцию и даже по кюрию. В этой работе мы активно взаимодействуем с физиками из «Прорыва» и планируем пригласить специалистов из других организаций для верификации кодов.

— Про верификацию кодов тоже расскажите, пожалуйста.

— За десятилетия развития атомной энергетики в разных странах и даже организациях появилось очень много нейтронно-физических кодов. Системы констант тоже разные, единой не существует. Исторически они формировались в США, Японии, СССР, странах Европы и в последнее время — в Китае. Десятки лет ученые обменивались информацией по константам под эгидой МАГАТЭ, поэтому библиотеки ядерных данных частично пересекаются, частично уникальны, особенно по тем элементам, которые редко использовались в атомной энергетике. Это касается, в частности, некоторых изотопов плутония и минорных актинидов.

Для корректировки и верификации констант расчетчики выполняют кросс-верификацию, то есть решают одну и ту же задачу с помощью разных кодов и систем констант, а затем сравнивают результаты и анализируют расхождения. Помимо этого, все константы надо верифицировать в реальных экспериментах. Делать это можно либо на действующих реакторах, либо на стендах. На действующих реакторах проводить эксперименты сложно. На стендах, таких как наши БФС, гораздо проще. Из этих экспериментов можно получить информацию, а правильно ли вообще коды считают либо, наоборот, правильно ли поставлен сам эксперимент, потому что его результаты могут расходиться со всеми кодами.

— Бывало такое?

— Да, иногда. Это значит, что эксперимент плохо подготовлен (недостаточно информативен) либо расчетчики плохо знают константы или не учитывают технологические погрешности и так далее.

— Какие новые эксперименты вы бы хотели провести на обоих БФС?

— Их много. Например, для термоядерного реактора. Сейчас его в России рассматривают как компонент гибридной системы, где термоядерный синтез выступает источником высокоэнергетических нейтронов для облучения делящихся материалов в специальном бланкете, в котором можно как нарабатывать топливо для ядерных реакторов, так и выжигать, например, младшие актиниды. Ту часть установки,



которая касается blankets, — по сути, это подкритический реактор деления — можно моделировать на БФС с «подсветкой» внешним источником нейтронов. Таких исследований тоже никто еще не делал.

— А ВВЭР-СКД?

— До экспериментов дело не дошло, хотя мы вместе со специалистами Курчатовского института нашли подходы, как характеристики ВВЭР-СКД смоделировать на БФС. Основная проблема в том, что в эксперименте необходимо корректно смоделировать воду с переменной по высоте активной зоны плотностью (как известно, в реальном сверхкритическом состоянии вода превращается во флюид с плотностью от 0 до 1 г/см³). Моделировать его — непростая задача. Пока нам эти эксперименты не заказывают, но мы готовы.

— Насколько сильно загружены стенды? Есть ли дефицит мощностей или, напротив, заказов?

— В разное время было по-разному. Иногда приходилось искать заказы, но в целом сейчас «Росатом» реализует много проектов, которые требуют физического моделирования, и у нас достаточно заказов на проведение экспериментов.

— А у БФС есть радиоактивные отходы?

— В следовых количествах. Если мощность реального реактора в сто миллионов раз больше, чем у БФС-2, то и материалы у нас активируются в сто миллионов раз меньше.

— Вы упомянули про инженеров и рабочих, которые могут собрать «атомное лего» из миллиона компонентов. В ФЭИ молодежь приходит?

— Да, и довольно хорошая, ребята активно влились в работу и в коллектив. Любопытно только, что они больше сориентированы на использование кодов и проведение расчетов, а для физики важен еще и эксперимент. Ведь не все можно смоделировать «на бумаге». А в эксперимент идут гораздо менее охотно.

— Почему? Неинтересно?

— Не только. Специалистов, которые будут работать на новых реакторах, надо растить, и для этого нужно современное оборудование, а экспериментальная база с 1990-х годов по настоящее время частично была утрачена, а то, что осталось, надо модернизировать или приводить в соответствие с современными нормами и правилами. Ну и, конечно, надо создавать новое. Мы, например, очень хотим создать большой натриевый стенд. Он необходим, чтобы натриевые технологии развивались быстрее и соответствовали масштабам и характеристикам реакторов нового поколения. Без экспериментальной базы создать десятки быстрых реакторов к концу века невозможно. Действующие мощности устаревают, а требования к ним у Ростехнадзора растут. И беда в том, что если стенды ликвидируются или консервируются, то через какое-то время исчезают



и специалисты. А восстановить — значит начинать с нуля. Это беда не только ФЭИ, это во всем мире так. Вот американцы, например, более 40 лет не строили АЭС у себя и в значительной степени утратили свои реакторные компетенции.

— Каким должен быть этот натриевый стенд?

— Он должен быть крупным, с большим объемом натрия, с электромагнитным насосом и современным оборудованием. Хотим моделировать там работу крупных элементов реальных реакторов — расходомеров, холодных ловушек, систем безопасности и др. Решать задачи поддержания чистоты, температуры, давления натрия. Для всего этого нужны специалисты с хорошими руками, которые могут провести исследования. К сожалению, пока нас не поддерживают, говорят, что дорого. Но за знания нельзя платить мало, знания всегда стоят дорого. Потом придется платить больше. Что может быть альтернативой стенда? Выполнять эксперименты и исправлять ошибки на реальном реакторе? Это гораздо дороже. Сейчас выгадаем копейку, а потом проиграем: чем меньше мы знаем о наших реакторах, тем хуже. Еще нам нужен стенд мощностью до 2 МВт со свинцово-висмутовым теплоносителем и естественной, не требующей насосов циркуляцией. Но это отдельный большой разговор. Есть и другие предложения и задумки.

— Каковы цели ФЭИ до конца года?

— Успешно завершить экспериментальную программу по БН-1200 на МОКС-топливе на БФС-2, начать работы с борной кислотой на макете ВВЭР-С на БФС-1, выполнить и отчитаться по работам с минорными актинидами, а также системным исследованиям развития атомной энергетики. И, конечно, создать заделы на будущее.

Материалы-экстремалы: научный взгляд

Что делают димитровградские ученые для новейшего топлива и реакторных установок

Научный институт «Росатома» в Димитровграде — один из ключевых участников замыкания ядерного топливного цикла, над которым работает российская атомная отрасль. Ученые института изучают возможности выжигания минорных актинидов, экспериментируют с новыми топливными композициями и конструкционными материалами, а еще строят многоцелевой быстрый исследовательский реактор (МБИР) и рассчитывают, что на нем исследования будут интереснее и глубже. Об этом «Вестнику атомпрома» рассказали заместитель директора — научный руководитель института Алексей Ижутов и заместитель директора по сооружаемым объектам Сергей Киверов.



Алексей Ижутов

Заместитель директора — научный руководитель института «Росатома» в Димитровграде

— Алексей Леонидович, расскажите, пожалуйста, в чем особенности вашего института.

— Мы проводим большой объем внутри- и после-реакторных исследований материалов и элементов активных зон для перспективных реакторов различных типов и назначения. Условия их эксплуатации обещают быть значительно более экстремальными, чем действующих, поэтому конструкционные материалы должны обеспечивать надежную работу оборудования, а безопасность топлива должна быть экспериментально обоснована в режимах нормальной эксплуатации, ее нарушения и в условиях аварий.

Наш исследовательский комплекс — единственный в стране и один из немногих в мире, где исследовательские ядерные установки (в институте их шесть) дополнены материаловедческими и радиохимическими лабораториями. Специалисты института исследуют перспективные виды топлива при глубоких выгораниях и поведение ТВЭЛов и ТВС в переходных, циклических и аварийных режимах, решают проблемы выжигания долгоживущих изотопов, изучают перспективные конструкционные материалы для длительной эксплуатации реакторных компонентов и новые радиационно и жаростойкие материалы и стали ферритно-мартенситного класса. Эти исследования помогают подобрать материалы, работоспособные

при высоких температурах, с минимальным формоизменением и высокими показателями прочности и пластичности. Их использование обеспечит долгую и безопасную эксплуатацию реакторов и улучшит экономику энергоблоков. Кроме того, институт проводит нейтронно-физические, фундаментальные и прикладные исследования и выпускает широкий спектр радиоизотопной продукции для науки, промышленности и медицины.

— Какие работы ведет институт в рамках реализации замыкания ЯТЦ? Особенно интересует выжигание минорных актинидов.

— Позвольте сначала сказать несколько слов о проблеме. Значимую долю мирового парка АЭС занимают реакторы на тепловых нейтронах. Один из их недостатков — накопление долгоживущих высокоактивных изотопов. Их надо долго хранить, и затраты на хранение постоянно растут. Единственное комплексное решение этой проблемы — технологии двухкомпонентной ядерной энергетики, включающей новые типы реакторов на тепловых и быстрых нейтронах. Эти технологии предполагают рециклирование делящихся нуклидов и дожигание высокоактивных отходов и в итоге замыкание ядерного топливного цикла. Для этого требуется «всего лишь» построить и эксплуатировать реакторы на быстрых нейтронах (РБН), создать технологии обращения и переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), рефабрикации из него топлива для повторной загрузки в реакторы и утилизации высокоактивных отходов. Все это, конечно, сложные задачи.

Институт давно вовлечен в работу по «быстрому» направлению. С 1968 года в институте действует исследовательский быстрый опытный реактор БОР-60, а теперь сооружается МБИР. Это важный компонент ядерной энергосистемы будущего поколения, который поможет российской атомной отрасли удержать мировое лидерство в области быстрых реакторов и замыкания ядерного топливного цикла.

— Приведите, пожалуйста, примеры исследований по «быстрой» тематике.

— В рамках федерального проекта «Новая атомная энергетика» и проекта «Прорыв» в реакторных установках института испытываются макеты

твэлов с уранплутониевым нитридным топливом. В радиационно-защитных камерах материало-ведческого комплекса проводятся исследования экспериментальных ТВС после облучения в реакторах на быстрых нейтронах. Мы получили данные об особенностях формоизменения твэлов и о состоянии их микроструктуры, поведении продуктов деления, характеристиках радиационного набухания нитридного топлива, механических свойствах и коррозионном состоянии оболочек твэлов. В радиохимическом комплексе института идут работы по экспериментальному обоснованию оборудования и технологических режимов пирохимической переработки ОЯТ.

Благодаря экспериментальной базе института стала возможна разработка стратегии обращения с минорными актинидами. Один из вариантов — их трансмутация в стабильные или короткоживущие нуклиды с помощью облучения в РБН. Трансмутировать минорные актиниды можно с помощью гомогенной и гетерогенной технологий.

Гомогенный вариант предполагает введение минорных актинидов (МА) в штатное топливо РБН в небольшом количестве, менее 5%. При многократном рецикле такого топлива его нуклидный состав стабилизируется, скорость накопления МА сравняется со скоростью их уменьшения и достигается равновесный нуклидный состав ОЯТ. Возможности радиохимического комплекса института позволили отработать технологии создания такого топлива, и в настоящее время оно облучается в реакторах. Планируются послереакторные исследования, чтобы оценить эффективность гомогенного варианта.

— А что с гетерогенным вариантом?

— Он считается более перспективным направлением, так как выжигание МА в боковых экранах РБН дает высокие показатели трансмутации МА при минимальном влиянии процесса на характеристики реактора. Благодаря инертным матрицам можно избежать образования вторичных МА, а смягчение спектра нейтронов повысит эффективность трансмутации. Эксперименты в реакторе BOR-60 показали перспективность технологии. В настоящее время в реакторе BOR-60 мы испытываем специальные элементы для выжигания америция и нептуния. Если все пройдет как задумано, результаты экспериментов лягут в основу обоснования безопасности следующего эксперимента, уже в БН-800. Он должен продемонстрировать эффективность технологии гетерогенного выжигания МА в энергетическом РБН. Это позволит перейти к разработке уже промышленной технологии с последующей реализацией на перспективных реакторах БН-1200 и окончательному решению вопроса по обращению с МА в рамках двухкомпонентной ядерной энергетики.

— Перейдем к МБИР. Сергей Александрович, какие новые возможности будут у института с появлением МБИР, в том числе в сравнении с BOR?

— С появлением исследовательской ядерной установки МБИР у нас появятся дополнительные экспериментальные объемы, позволяющие проводить внутриреакторное облучение в условиях высокого потока (более 10^{15} н/с·см²) нейтронов жесткого спектра. Эти преимущества будут обеспечиваться за счет значительно более высокой тепловой мощности и кратного увеличения объемов экспериментальных устройств новой реакторной установки по сравнению с BOR-60.

Проектом предусмотрена возможность проводить инструментированные облучательные эксперименты, которые обеспечивают вывод за пределы корпуса реактора коммуникаций датчиков контроля параметров облучательных устройств в шести каналах ИЯУ МБИР. Три канала позволят проводить исследования в различных теплоносителях в пределах одной ячейки активной зоны, а еще три канала — это полноценные автономные петлевые установки, занимающие по семь ячеек активной зоны и бокового экрана. Для сравнения: в BOR-60 есть только один внутризонный инструментированный экспериментальный канал. Дополнительно следует отметить шесть радиальных и тангенциальных горизонтальных экспериментальных каналов для прикладных и фундаментальных исследований, в том числе связанных с активационным анализом и нейтронной радиографией, а также шесть вертикальных каналов в тепловой защите реактора для ядерного легирования кремния.

— МБИР сам будет участвовать в реализации замыкания ядерного топливного цикла, будучи быстрым реактором?

— МБИР будет работать именно как инструмент, обеспечивающий исследования в обоснование конструкционных материалов, поглотителей или топливных композиций в различных эксплуатационных условиях. Работы, связанные с радиохимическими процессами или переработкой топлива, на нем проводиться не будут.

— Расскажите, пожалуйста, о прогрессе на площадке МБИР.

— В течение 2026 года мы выполнили большой объем работ по монтажу технологического оборудования. В частности, начат монтаж элементов главных циркуляционных насосов первого контура, смонтированы в проектное положение аварийные теплообменники, смотровые окна исследовательских защитных камер, ряд элементов транспортно-технологической части. Кроме того, был дан старт монтажу оборудования турбинного блока. В проектное положение установлен конденсатор турбины, деаэратор и мостовой кран, обслуживающий машинный зал реакторной установки.

В настоящее время на строительной площадке МБИР выполнено более 80% общего объема строительных работ, продолжается монтаж основного и вспомогательного технологического оборудования.



Сергей Кивров

Заместитель директора института «Росатома» в Димитровграде по сооружаемым объектам

Текст подготовил Сергей Петровский

Иллюстрации: газета «Страна Росатом» / GPT Image

НТП на перепутье

Экспонента или плато: какие факторы сегодня влияют на темпы развития науки и технологий



Научно-техническим прогрессом (НТП) называют непрерывный процесс взаимосвязанного развития науки, техники и технологий, а также внедрения их достижений в производство и другие сферы жизни. Сегодня можно услышать диаметрально противоположные мнения о том, каковы темпы НТП в настоящее время. Технооптимисты говорят, что наука на подъеме и скорость внедрения новых технологий беспрецедентна, приводя в пример цифровую революцию (внедрение систем ИИ и роботизация), биоинженерные и медицинские (редактирование генома, новые лекарства), а также энергетические (коммерциализация ВИЭ, накопители энергии) технологии. Пессимисты же утверждают, что большинство технологий, которые мы сегодня широко используем в промышленности и в быту,

базируются на фундаментальных научных открытиях прошлого века, современные инновации — это просто развитие уже разработанных технологий, цифровизация дает лишь иллюзию быстрого прогресса, который на самом деле вышел на плато. Своими взглядами на эту проблематику с «Вестником атомпрома» поделились Сергей Лозинский, кандидат экономических наук, заместитель директора центра Института статистических исследований и экономики знаний НИУ «ВШЭ» (ИСИЭЗ НИУ «ВШЭ»), и Юлия Мильшина, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, заместитель директора Международного научно-образовательного Форсайт-центра долгосрочного прогнозирования научно-технологического и социально-экономического развития НИУ «ВШЭ».

Какая из двух точек зрения на современные темпы научно-технического прогресса вам ближе? Считаете ли вы, что развитие идет быстрыми темпами или, наоборот, стагнирует?

Сергей Лозинский: Обе точки зрения не учитывают фундаментальные рамочные условия, которые изменились с XIX и даже с XX века. Рассмотрим эти три условия.

1. Кардинальное (на несколько порядков) усложнение требований к инфраструктуре для проведения научных исследований.

Условно до первой половины XX века исследования могли вестись силами одной научной лаборатории в составе нескольких человек, с очень простым по нынешним меркам лабораторным оборудованием. В тех условиях получение прорывных идей и решений было связано с определенным упорством, умением нестандартно мыслить, с тем, что сейчас называют серендипностью, и прочими свойствами личности, в целом характеризующимися тем, что принято называть талантом или гением в науке. В настоящее время любые научные исследования — это результат сотрудничества нескольких лабораторий с коллективами в десятки людей и оборудованием стоимостью в миллионы/миллиарды долларов. Роль личности становится все меньше, а все большее значение имеют объем инвестиций в исследования и правильная организация работы. Это как в большом спорте — любой новый рекорд требует целой индустрии, работающей на спортсмена.

Например, исследование Стефана Вутчи, Бенджамина Ф. Джонса и Брайана Удзи (Wuchty, S., Jones, B. F., Uzzi, B.) «Возрастающее доминирование команд в производстве знаний» (опубликовано в журнале Science, 2007) показало, что в начале XX века среднее количество авторов на статью составляло один-полтора человека. К 1980 году этот показатель вырос до трех-четырех человек, а к 2020-м годам в таких областях, как физика высоких энергий или биомедицина, средний размер команды достиг пяти — восьми

человек, а в крупных проектах (например, CERN или исследования генома) исчисляется тысячами.

Для фармацевтики был даже сформулирован так называемый закон Ирума (обратно закону Мура для процессоров: Moore — Eroom): эффективность НИОКР в фармацевтике падает, а стоимость каждого нового одобренного препарата удваивается примерно за 10 лет.

2. Изменение ролей государства и бизнеса в развитии науки.

Опять же, примерно до начала XX века наука двигалась в значительной степени учеными-энтузиастами, использующими ресурсы благотворителей и в ряде случаев государства. Затем государства поняли, какую отдачу дают научные исследования для их мощи, прежде всего военной, и начали активно инвестировать в развитие науки. Вершиной такого подхода стали гонка вооружений и космическая гонка 70–80-х годов XX века. Все это соответствовало условно кейнсианскому подходу к развитию экономики, которая, предположительно, двигалась за счет масштабных инвестиций государства. Однако экономические проблемы в те же 1970-е годы привели к появлению нового подхода: основным двигателем развития должен становиться частный сектор, а государство для этого должно создавать условия. Успех этого подхода в экономической сфере привел и к изменениям в науке: государство (в разных странах) все больше уходило из прямого финансирования науки, оставляя себе отдельные приоритетные направления, а бизнес становился основным инвестором, и он, соответственно, определял ключевые цели и требования к результатам. В целом такой подход действует до настоящего времени.

Так, по данным Национального научного фонда США (NSF), в 1950-х годах в США федеральное правительство финансировало около 65–70% всех научных

В копилку знаний

Серендипность (от англ. serendipity — «счастливая случайность, удачное совпадение») — термин, который употребляется в философии и социологии науки и в наиболее общем смысле означает умение находить новые возможности и совершать открытия на основании выводов из случайных наблюдений. Английский писатель Хорас Уолпол впервые использовал его в 1754 году в письме своему другу, придумав слово, которое отсылает к персидской истории

о трех принцах из Серендипа (Серендип — это древнее арабское название острова Цейлон, ныне Шри-Ланка). Его герои постоянно делали неожиданные открытия и принимали мудрые решения благодаря своему вниманию к случайным событиям. Паттерн серендипности отсылает к распространенному опыту наблюдения неожиданных, аномальных явлений (данных), которые становятся поводом для появления новой теории или расширения уже существующей.

Важно отметить, что серендипность возникает только при наличии подготовленного наблюдателя, способного превратить замеченную случайность в открытие. Хрестоматийным примером серендипности является открытие пенициллина, совершившее революцию в медицине, но ставшее результатом случайности: Александр Флемминг, изучавший стафилококки, обнаружил плесень, губительную для бактерий, в невымытой чашке Петри.

В копилку знаний

Кейнсианство — макроэкономическая теория, в основе которой лежит идея о необходимости государственного регулирования экономики для защиты от негативных последствий экономических спадов. Теория названа по имени английского экономиста Джона Кейнса, который изложил ее в книге «Общая теория занятости, процента и денег»

(1936 год). Теория получила огромную популярность после Великой депрессии, которая поставила на грань экономического краха промышленно развитые страны и показала, что свободные рыночные механизмы («невидимая рука рынка» по Адаму Смиту) не способны быстро справиться с возникшими проблемами. Кейнс считал, что во время

экономического кризиса государство должно вкладывать в экономику как можно больше денег, не боясь дефицита бюджета. Если потребители не могут оживить спрос, то сделать это за них должно государство, запуская крупные инфраструктурные проекты, снижая налоги, делая доступными кредиты и увеличивая денежное предложение.

исследований, а бизнес — лишь около 30%. К 2020-м годам ситуация стала зеркальной: на долю бизнеса приходится 70–75% всех расходов на НИОКР, тогда как доля федерального правительства упала до 20–25%. К чему такой подход приводит, продемонстрировала, например, история с COVID-19. Колоссальные инвестиции фармкомпаний направлялись в НИОКР по «инвестиционно привлекательным» лекарствам, то есть таким, для которых цена и массовый спрос обеспечивали высокую прибыль производителей, а лечение инфекционных заболеваний находилось за пределами их интересов. В условиях глобальной эпидемии понадобилась инициатива государств, чтобы фармкомпании срочно разработали необходимые вакцины и методы лечения.

С учетом новых глобальных вызовов государство в разных странах все больше возвращается в активное руководство научной сферой и определение приоритетов и направлений, тем не менее последние 20–30 лет в разных странах наука фокусировалась на обслуживании интересов и задач бизнеса, которые не всегда заметны для широкой публики.

3. Снижение «порога чувствительности» общества к негативным последствиям проведения НИОКР и внедрения их результатов.

Безусловно, регуляторные рамки в наше время являются более жесткими, чем 70–100 лет назад. Обусловлено это в первую очередь более высокой чувствительностью общества к возможным негативным последствиям. Направить человека в космический полет или подводное плавание с недостаточным уровнем безопасности, запустить в массовое использование изобретение, которое может привести при определенных условиях к вреду для здоровья и жизни людей, — все это в наши дни является такой ценой, которую общество не готово платить за научные достижения. Соответственно, любые действия по разработке и внедрению научных идей и решений требуют значительного объема предварительной работы, в том числе юридической, со стороны как организаций, проводящих НИОКР и внедряющих их результаты, так и регуляторных органов. Все это, безусловно, усложняет и в ряде случаев замедляет развитие науки и технологий. Примеры — беспилотный транспорт и все в большей степени ИИ.

Все эти три драйвера изменений рамочных условий действуют сонаправленно и приводят к тому, что значимых с точки зрения общества (и, следовательно, видимых обществом) фундаментальных открытий становится меньше. Это, однако, не означает, что их становится меньше в принципе.

Где, на ваш взгляд, проходит граница между принципиальной инновацией и модернизацией уже существующей технологии? Например, можно ли считать современный электромобиль принципиально новым устройством или это развитие конструкции, известной еще с XIX века, с применением более совершенных аккумуляторов, электроники и программного обеспечения?

Сергей Лозинский: Как мне кажется, такую границу проводить не очень правильно. Вообще, сам термин «инновация» в большей степени существует в экономической, бизнес-логике, то есть это такое новое решение, новая комбинация различных технологий, которая успешна с точки зрения бизнеса. Кроме того, любая крупная продуктовая инновация, как, например, современный электромобиль или

современный смартфон, является суммой большого числа отдельных научных и производственных решений, некоторые из которых являются прорывными, некоторые нет, но в совокупности они приводят к определенному прорыву — с точки зрения потребительского продукта. Так, например, прорывом стало создание iPhone, потому что в совокупности он стал качественно новым решением для потребителей,

не только удовлетворяющим их старые потребности, но и создающим (и также удовлетворяющим) новые. И все это стало возможным благодаря качественно новому уровню развития мобильной связи к этому моменту. Можно ли назвать такое решение принципиальной инновацией? С точки зрения научно-технологической новизны — скорее нет, с точки зрения использования рыночного и технологического момента для достижения успеха в бизнесе — да, безусловно. Схожая ситуация и с электромобилями: сумма используемых технологий достигла

критического уровня для того, чтобы стать успешным потребительским решением.

Сейчас очень похожая ситуация может сложиться для антропоморфных роботов, однако лишь в том случае, если для них найдется коммерчески успешная и достаточно масштабная ниша для применения в логистике, промышленности и т.п. И, как мы видим, успешность этой инновации зависит не только от характера и новизны используемых технологий, но и от рыночного момента.

Почему некоторые технологии, которые в середине XX века казались достижимыми уже в обозримом будущем, до сих пор не получили ожидаемого развития? В частности, почему коммерческая термоядерная энергетика и масштабное освоение космоса оказались значительно более сложными задачами, чем предполагалось?

Сергей Лозинский: В каждом конкретном случае есть свои причины, и они различные. Что касается масштабного освоения космоса, то роль сыграли все перечисленные в ответе на первый вопрос факторы — «повышение планки» для создания новых достижений, замена государства бизнесом в качестве основного игрока и более высокая чувствительность общества к рискам и катастрофам. С другой стороны, есть и объективные факторы: при достижимом уровне скоростей космических аппаратов даже полет человека к Марсу и обратно займет до трех лет, что потребует экстраординарных мер для обеспечения комплексной безопасности экипажа. А полеты в автоматическом режиме в пределах Солнечной системы давно уже стали достаточно рутинной деятельностью, которая не выглядит в глазах широкой публики каким бы то ни было достижением.

Юлия Мильшина: При этом важно отметить, что точность технологического прогнозирования сегодня существенно выросла благодаря новым

инструментам. Если прогнозы середины XX века часто оказывались слишком оптимистичными и оторванными от инженерной реальности, во многом из-за недооценки сложности систем, то современные форсайты [1], опирающиеся на передовые методы анализа больших данных и продвинутые экспертные процедуры (опросы Дельфи, форсайт-сессии), демонстрируют высокую прогностическую силу [2], [3]. Так, в долгосрочном Прогнозе научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года (ПНТР-2030), утвержденном правительством РФ в 2014 году, который определяет наиболее перспективные области развития науки и технологий, обеспечивающие реализацию конкурентных преимуществ страны, было обозначено быстрое развитие интерфейсов «мозг — компьютер» для передачи сигналов конкретным паттернам нейронов. Еще один пример прорыва, описанного в ПНТР-2030, — препараты на основе живых клеток и продуктов их культивирования, которые превращаются сегодня в рутинную практику.

В копилку знаний

Форсайт — это комплексный метод предвидения, в основе которого лежат коллективное экспертное знание и количественные методы прогнозирования. Организация регулярного экспертного взаимодействия, во время которого ученые и бизнесмены, преподаватели вузов и чиновники, специалисты смежных областей могут систематически обсуждать общие проблемы, рассматривается как одно из главных преимуществ форсайта. В последнее десятилетие развитие

форсайта идет по пути усиления его доказательной базы, преимущественно за счет усовершенствования инструментов анализа больших данных. Форсайт особенно актуален в условиях высокой неопределенности траекторий развития будущего, непредсказуемости воздействия экономических, социальных и экологических рисков, междисциплинарности и рассредоточенности экспертных оценок. Обычно в форсайт-проекте применяется комбинация количествен-

ных и качественных методов. Такой подход позволяет создавать альтернативные сценарии развития с учетом не только возможных или желательных событий, но и так называемых «диких карт» — маловероятных событий, которые потенциально могут оказать значительное влияние на будущее исследуемой сферы. Форсайт ориентирован не только на определение возможных альтернативных вариантов будущего, но и на выбор наиболее предпочтительных из них.

Может ли развитие искусственного интеллекта заметно ускорить сам научно-технический прогресс? В каких областях ИИ способен сильнее всего повлиять на скорость научных открытий, разработки новых технологий и их внедрения?

Юлия Мильшина: Да, конечно, развитие искусственного интеллекта способно качественно и заметно ускорить научно-технический прогресс, став наиболее значимым переломным моментом в истории цифровизации науки за последние десятилетия. Если в XX веке компьютеры автоматизировали вычисления, а в 2000-е годы облачные технологии и открытая наука ускорили обмен данными, то современная эра характеризуется превращением ИИ из экспериментальной технологии в полноценную часть научного метода, способную выдвигать новые гипотезы и обещивать прорывные открытия.

Первые заметные результаты такого ускорения проявились в начале 2010-х годов с появлением продвинутой сверточных нейронных сетей. Это позволило радикально увеличить скорость анализа огромных массивов данных в задачах, где ранее требовались годы ручной работы. Ключевыми областями стали обработка изображений МРТ, КТ и гистологических срезов в биологии и медицине, анализ треков частиц в физике элементарных частиц, а также автоматизированный поиск и распознавание новых космических объектов в астрономии.

Ключевую роль для практического применения нейросетей в науке сыграла разработка оптимальных для рутинного рабочего процесса рабочих сред (фреймворков), превративших ИИ-модели из эксперимента в рабочий инструмент. Во второй половине 2010-х годов, благодаря появлению удобных фреймворков, глубокое машинное обучение вышло далеко за пределы простой классификации. В физике получили развитие физически информированные нейронные сети (Physics-Informed Neural Networks, PINN) и модели квантовых состояний (Neural Quantum States) для моделирования процессов на квантовом уровне. В химии начали активно применяться средства дизайна молекул, а в науках о Земле появилась возможность быстро моделировать и прогнозировать климатические изменения и поведение сложных экосистем.

С начала 2020-х годов новую волну ускорения научных исследований задали большие языковые модели (LLM) и целенаправленные научные платформы. Специализированные поисковые системы и аналитические инструменты, а также мультимодальные модели, способные одновременно работать с текстами, данными и изображениями, сделали передовые аналитические возможности общедоступными. Это существенно сократило время на работу с научной литературой и синтез знаний.

Не менее важное влияние ИИ оказывает на управление научными процессами, устраняя организационные барьеры. Если в 2010-е годы облачные платформы сняли географические ограничения и ускорили совместную работу, то в 2020-е годы появились интеллектуальные системы управления исследовательскими портфелями. В отличие от классических электронных журналов, эти системы с помощью ИИ извлекают ключевые сущности (названия веществ, типы клеток) из записей, предлагают скрытые связи между различными экспериментами и автоматически генерируют шаблоны протоколов.

Дополнительно системы искусственного интеллекта оптимизируют логистическую и хозяйственную сторону науки. Платформы, такие как LabVantage, автоматизируют учет образцов, управление запасами расходных материалов, планирование доступа к оборудованию и сбор данных с приборов. В сочетании с платформами открытой науки (например, OSF), которые стандартизируют хранение кода и данных, эти инструменты комплексно сокращают время всего исследовательского цикла: от формулирования гипотезы до практического внедрения новых технологий.

Ускорение научно-технического прогресса с помощью ИИ требует наличия собственных верифицированных



инструментов стратегического анализа. Передовые системы на базе ИИ активно применяются в российской науке уже сегодня, например система интеллектуального анализа больших данных iFORA на базе суперкомпьютера НИУ «ВШЭ» (в реестре российского ПО), созданная ИСИЭЗ НИУ «ВШЭ» более 10 лет назад и отмеченная в отчетах ООН и докладе Генерального секретаря ООН в 2025 году в качестве передового инструмента технологического прогнозирования. Она помогает выявлять фронтиры науки — наиболее значимые тематики научно-технологической повестки, отражающие ее передний край, а также отслеживать ранние признаки изменений в части развития технологий, рынков, продуктов, компетенций и др. В отличие от облачных моделей общего назначения, разработанная в ИСИЭЗ модель iFORA.LLM функционирует как «интеллектуальный процессор», адаптированный исключительно к профессиональной лексике и логике научно-аналитических текстов [4]. Она способна в защищенном корпоративном контуре (исключая риски утечки чувствительных данных) структурировать информацию, оценивать технологические риски и готовить верифицируемую аналитику, работая при этом в три раза быстрее и с существенно меньшими вычислительными затратами, чем аналоги.

Исходя из текущих темпов развития ИИ в науке, можно выдвинуть предположения о возможных научных прорывах, достижимых с помощью ИИ, на горизонте следующих 10–15 лет. В фундаментальных науках ИИ эволюционирует от инструмента автоматизации вычислений до полноценного соавтора открытий, переходит к самостоятельной генерации гипотез и построению интерпретируемых моделей

сложных явлений, параллельно обеспечивая анализ колоссальных наблюдательных данных. В медицине, биоинформатике и материаловедении технологии искусственного интеллекта радикально сжимают цикл разработок за счет создания «цифровых двойников» организма, предсказания структур белков и генеративного дизайна материалов с заданными свойствами. Особый прорывной потенциал ИИ раскрывается при моделировании сверхсложных динамических систем и развитии человеко-машинного взаимодействия. Так, в компьютерных науках и робототехнике фокус смещается на создание объяснимого ИИ (XAI), достоверных генеративных моделей без «галлюцинаций», а также адаптивных ИИ-агентов и высокоточных нейроинтерфейсов. Наконец, в гуманитарной сфере технологии обеспечивают глубокую персонализацию, цифровое моделирование психики и сохранение языкового разнообразия, что в совокупности делает ИИ универсальным катализатором перехода к качественно новому уровню генерации и верификации научного знания [5].

Сергей Лозинский: Вероятнее всего, ИИ способен сильнее всего повлиять на скорость научных открытий, разработки новых технологий и их внедрения в тех областях, где требуется ускорение масштабных расчетов, например в гидро- и аэродинамике, расчете траекторий движения летательных аппаратов, то есть баллистике (в том числе космической), новых материалах, биотехнологиях и т.п. Там, где ИИ может помочь с анализом и расчетом больших массивов данных (причем на таких массивах данных, где исключена возможность и потребность в «додумывании» и изобретении новых данных самими нейросетями), это будет давать определенные результаты.

Насколько скорость распространения новых технологий сегодня ограничивается самой наукой, а насколько — институтами, регулированием, экономикой и общественной готовностью к изменениям? Можно ли говорить об «институциональном торможении» некоторых уже технически реализуемых решений, например беспилотного транспорта?

Сергей Лозинский: Это как раз третий фактор — более высокая чувствительность к возможным рискам и потерям. Сейчас невозможно гарантировать 100-процентную безопасность беспилотного транспорта при массовом внедрении, а первый же

серьезный инцидент приведет к необходимости искать виновного и распределять ответственность. Пока же не выработаны такие правовые механизмы решения, которые бы удовлетворили все стороны при подобных инцидентах.

¹ Международный научно-образовательный форсайт-центр. — Электронный ресурс: сайт.

² 10 лет прогнозов: насколько точными оказались отечественные форсайты // РБК. Тренды: сайт.

³ Долгосрочный прогноз научно-технологического развития Российской Федерации до 2030 года // Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»: сайт.

⁴ iFORA.LLM — адаптированная модель для сферы науки, технологий и инноваций // Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»: сайт.

⁵ Будущее мировой науки: коллективная монография / Л. М. Гохберг, Т. Е. Кузнецова, Ю. В. Мильшина и др.; под редакцией Л. М. Гохберга. — Москва: ИСИЭЗ ВШЭ, 2024.

Текст: Роман Жолудь

Фото: Wikipedia, Юрий Машков / ТАСС, Олег Урусов / РИА Новости

С точностью до атома

Как работает современная мировая хронометрия

Атомные часы — самый точный на настоящий момент способ измерения времени. История атомных часов показывает, как метрология постепенно привела от наблюдения за астрономическими процессами к управлению квантовыми состояниями отдельных атомов. Мы рассказываем, как проходила эта эволюция от первых экспериментов с магнитным резонансом к современным оптическим решеточным часам и началу экспериментов с ядерным переходом. Объясняем, каким образом используются сверхточные часы в навигации, геодезии, поисках темной материи и проверках фундаментальных законов физики.

Человеку время кажется совершенно естественным понятием. Сутки определяются вращением Земли, год — ее обращением вокруг Солнца. Именно эти процессы долго служили основой для измерения времени. Но уже в XX веке для точной науки и техники этого оказалось недостаточно. Земля вращается, как выяснилось, не идеально равномерно, а значит, ее движение нельзя использовать как абсолютно стабильный маятник.

В середине прошлого века метрология — наука об измерениях — получила более надежный ориентир. Вместо астрономических наблюдений за гигантскими телами ученые обратились к микромиру — атомам. Их энергетические уровни определяются законами квантовой механики, поэтому переход между двумя такими уровнями происходит с исключительно высокой стабильностью. Энергетический переход — это изменение квантового состояния атома, сопровождающееся изменением его энергии. Атомные часы работают именно на этом принципе. Внутри них есть генератор электромагнитного излучения, а атомы служат своеобразным эталоном, с которым он постоянно сверяется. Если частота генератора немного отличается от частоты атомного перехода, система обнаруживает расхождение и корректирует генератор.

В Международной системе единиц основная единица времени — секунда — долгое время рассчитывалась как часть астрономического периода. Сначала это была часть солнечных суток, потом — доля эталонного 1900 года. С 1967 года секунда определяется как интервал времени, равный 9 192 631 770 периодам излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного

квантового состояния атома цезия-133 в покое при 0 К (–273 °C). Сигналы атомных часов используют в навигации и телекоммуникациях, системах синхронизации, а сами часы стали инструментом для экспериментов, где проверяются фундаментальные законы физики.

Атомный эталон

Идея использовать атомы как частотный эталон возникла еще в XIX веке: Джеймс Максвелл и Уильям Томсон, более известный как лорд Кельвин, обратили внимание на то, что атомы одного вида обладают одинаковыми внутренними характеристиками. Однако применить это предположение на практике удалось только после появления теории квантовой механики. В 1930-х годах физик Исидор Раби разработал метод молекулярных пучков и магнитного резонанса. Суть его заключалась в воздействии на молекулярный пучок двумя полями — постоянным магнитным и переменным. При этом происходит энергетический резонанс, который фиксируется по изменению числа частиц в определенном состоянии. Этот метод показал, что переходы между квантовыми состояниями атомов можно регистрировать с очень высокой точностью. Физик предложил использовать его для калибровки генераторов. За эти работы Раби получил Нобелевскую премию по физике в 1944 году.

Первые атомные часы появились в конце 1940-х годов. В 1949 году Гарольд Лайонс в Национальном бюро стандартов США создал часы на основе линии поглощения аммиака. Но в силу специфики молекулы аммиака эти часы не были точными: они отставали или убегали на одну секунду за 10 млн секунд. Это было связано с тем, что резонансная линия была широкой, а чем она шире, тем сложнее определить ее центральную частоту. Но эксперимент подтвердил сам принцип работы атомных часов.

Следующий важный шаг был сделан в 1955 году в Национальной физической лаборатории Великобритании. Там создали высокоточные часы на атомах цезия-133. Для них был выбран переход между двумя сверхтонкими уровнями атома цезия. Использование этой частоты в атомных часах стали называть цезиевым стандартом. Он и лег в основу современного определения секунды. В 1967 году Генеральная конференция по мерам и весам закрепила этот эталон. Сегодня такое определение секунды лежит в основе международных шкал атомного времени и всемирного координированного времени (UTC).

Миниатюризированные рубидиевые атомные часы созданы для обеспечения сверхточных и стабильных сигналов времени и частоты в компактных устройствах



Рубидиевая альтернатива

Еще одной разновидностью стали атомные часы на основе рубидия. Работа над ними началась в 1950-е годы и была связана с технологией оптической накачки, которую разработал французский физик Альфред Кастлер. Специалисты американской компании Varian Associates лицензировали метод, в котором атомы парообразного рубидия переводили в другое квантовое состояние с помощью света, а затем считывали этот эффект по изменению прозрачности газа.

В отличие от цезиевых часов пучкового типа, требующих сложных систем вакуума, мощных магнитов и больших габаритов, рубидиевые были компактными, недорогими и могли работать от обычной электросети или батареек.

Ключевая особенность работы рубидиевых часов — использование газовых ячеек. Свет от спектральной лампы или от полупроводникового лазера (в современных моделях) проходит через ячейку, содержащую пары рубидия и буферный газ. Газ частично предохраняет атомы рубидия от столкновения со стенками ячейки и сохраняет тем самым их квантовое состояние. Затем на ячейку воздействуют микроволновым полем от кварцевого генератора. Когда частота микроволнового поля совпадает с частотой перехода рубидия, атомы меняют свое энергетическое

состояние, что влияет на прозрачность ячейки для проходящего света. Фотодетектор фиксирует это изменение. Сигнал фотодетектора корректирует частоту кварцевого генератора, привязывая ее к атомному резонансу.

Современные модули с рубидиевыми стандартами весят всего от 100 г до 2 кг, они компактны, так как газовая ячейка занимает мало места. Для их питания достаточно мощности от 3 до 50 Вт в зависимости от размера модели. Прогрев и выход в рабочее состояние занимает минуты в отличие от устройств на цезии, где этот период может растягиваться на несколько часов или даже дней.

К сожалению, у рубидиевых стандартов есть и недостатки. Если в ячейке со временем изменяется давление газа, происходит сдвиг частоты. Интенсивность света лампы из-за ее старения также влияет на энергетический сдвиг атомов рубидия. Поэтому такие часы требуют периодической коррекции от цезиевого или других стандартов, которые более стабильны.

Точное водородное

Развитие атомной хронометрии в Советском Союзе началось на фоне прогресса в квантовой электронике и радиофизике в 1950–1960-е годы. Одним из главных центров этих работ стал Всесоюзный научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ). Также заметную роль в этом процессе сыграли Физический

институт им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН) и Ленинградский электротехнический институт (ЛЭТИ).

Одной из важных советских разработок в этой сфере стали водородные мазеры — устройства для точного измерения времени, в которых микроволновое излучение получают при воздействии на атомы водорода. Их можно представить как микроволновые генераторы, в которых источником чрезвычайно стабильной частоты служит переход атомов водорода между двумя близкими энергетическими состояниями. Частота этого перехода составляет около 1,42 ГГц.

Хотя первый водородный мазер был создан в 1960 году в Гарвардском университете США, советские ученые модернизировали и улучшили эту технологию. Работы начались в 1960-е годы, в 1964 году был создан отечественный стандарт водородной частоты. В 1967 году в Советском Союзе на основе квантово-механических водородных генераторов и высокоточных кварцевых часов был утвержден государственный первичный эталон единицы времени и частоты. Правда, позднее для него стали использовать цезиевый стандарт.

В 1970–1980-е годы появились разработки советских мазеров с высокой кратковременной стабильностью. В них использовались специальные накопительные камеры, в которых атомы могли сохранять нужное состояние достаточно долго. Такие стандарты применялись в космической связи, научных исследованиях и метрологических системах. Их высокая стабильность делала водородные мазеры полезными там, где было важно сравнивать сигналы на коротких интервалах времени.

Атомные часы стали особенно важны при создании отечественной глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС). Работы над ней начались в 1970-х годах, а спутниковая группировка стала

создаваться в следующем десятилетии. На самих космических аппаратах устанавливались устройства на цезии, так как они оказались более простыми и устойчивыми при стартовых перегрузках и в дальнейшей эксплуатации. В новых аппаратах чаще всего используются рубидиевые часы, так как они легче, компактнее и потребляют меньше энергии. А вот водородный стандарт нашел свое применение на Земле: на его основе работают станции системы контроля и управления и узлы формирования национальной шкалы времени. Наземный комплекс с водородными часами позволяет отслеживать работу цезиевых часов на спутниках благодаря своей выдающейся кратковременной стабильности. Тем не менее экспериментальные космические разработки водородных мазеров в СССР и России все же велись и применялись на космическом радиотелескопе «Спектр-Р» и в рамках других отдельных проектов. Однако их сложность, масса, чувствительность к перегрузкам во время запуска аппаратов и большое энергопотребление стали барьерами на пути серийного использования в этой сфере.

Фонтаны и решетки

Современные цезиевые часы используют так называемую фонтанную схему. Сначала атомы цезия охлаждаются лазерами до температур порядка нескольких микрокельвинов. При этом они начинают двигаться чрезвычайно медленно. Затем лазерные импульсы направляют облако атомов вверх. Под действием гравитации атомы возвращаются вниз, траектория их движения напоминает струи воды в фонтане. На своем пути вверх и вниз они дважды проходят сквозь микроволновый резонатор. Между двумя взаимодействиями проходит достаточно времени, чтобы система очень точно определила частоту перехода.

Но даже такая система не идеальна. На показания цезиевых часов влияют небольшие эффекты, которые тоже приходится измерять и затем компенсировать. Во-первых, мешает тепловое излучение окружающей среды. Оно немного изменяет энергетические уровни атомов и тем самым смещает частоту перехода. Во-вторых, сами столкновения холодных атомов друг с другом влияют на частоту. Есть еще и так называемый эффект Дика: часы работают не непрерывно, между измерениями есть интервалы подготовки атомов. В эти моменты шум локального генератора не контролируется атомами напрямую и может ухудшать их кратковременную стабильность. Все эти эффекты приходится учитывать. Поэтому современные атомные часы — это не один прибор, а целый комплекс лазеров, микроволновой электроники, вакуумных систем и вычислителей.

Цезиевые часы работают на очень высокой по сравнению с традиционными радиоволнами частоте — около 9 ГГц. Но метрологи нашли еще более привлекательный диапазон — оптический. Частоты видимого и близкого к нему диапазона в несколько десятков тысяч раз выше цезиевого перехода. Такая высокая

На фото

Водородные транспортируемые часы, разработанные в России, применяются для сравнения шкалы времени территориально разнесенных эталонов времени и частоты



частота дает более плотную шкалу колебаний. Если представить часы как устройство, которое отмечает каждый цикл волн, то оптические часы делают это значительно чаще. В результате можно повысить стабильность измерений и уменьшить влияние квантового шума — помех из-за неопределенного состояния частиц.

Однако с оптическими часами возникла другая проблема: электронная аппаратура не может напрямую пересчитать сотни терагерц. Решением стала так называемая оптическая частотная гребенка. Ее можно представить как очень точную линейку для световых частот. Она создается фемтосекундным лазером, излучающим сверхкороткие импульсы. В спектре такого лазера появляется множество узких линий, расположенных строго через одинаковые интервалы. Зная одну из этих частот и расстояние между соседними линиями, можно связать оптический сигнал с гораздо более низкими частотами, которые уже можно измерять электроникой. За развитие этой технологии в 2005 году Джон Холл и Теодор Хенш получили Нобелевскую премию по физике.

Следующим шагом стали оптические решеточные часы. В них атомы, например, стронция-87 или иттербия-171 удерживаются в стоячей световой волне. Такая структура напоминает набор микроскопических ячеек, в которых удерживаются холодные атомы. Если при этом выбрать правильную длину волны лазера (физики ее называют магической), его воздействие на два энергетических состояния, между которыми работает переход часов, становится практически одинаковым. Поэтому лазер может удерживать атомы, не внося дополнительного смещения в саму частоту перехода.

Оптическая решетка решает еще и проблему эффекта Доплера: из-за теплового движения атомов частота лазерного излучения в их системе отсчета смещается. В решетке же атомы сильно ограничены в движении, поэтому этот эффект резко уменьшается.

От атомных к ядерным

Оптические часы используют переходы между состояниями электронов. Но у атома есть еще один элемент, который можно задействовать, — ядро. Ядерные переходы обычно требуют гораздо больше энергии, поэтому управлять ими с помощью лазеров очень трудно. Но у изотопа тория-229 существует возбужденное состояние с очень низкой для этого процесса энергией — около 8,4 эВ. Она соответствует ультрафиолетовому диапазону, поэтому такой переход в принципе можно возбуждать лазером.

И тут появляется важное преимущество. Электронная оболочка атома сильно реагирует на внешние электрические и магнитные поля, температуру и другие факторы. А вот ядро в значительной степени защищено от этих воздействий. Поэтому ядерный переход может быть потенциально менее чувствителен к внешним возмущениям.

В сентябре текущего года в авторитетном научном журнале Nature опубликованы результаты исследования ученых из Национального университета Сингапура, которые разработали самые точные на сегодня атомные часы. Стабильность устройства на лютеции-176, по заявлениям исследователей, настолько высока, что для накопления погрешности в одну секунду ему потребуется более 260 млрд лет, что намного превышает возраст Вселенной. Ученые не только рассчитали точность своих часов, но и проверили ее, сравнив двое лютециевых часов друг с другом: их «тикание» совпало до 19-го знака после запятой.

Долгое время ученые не могли определить точную энергию перехода ядра и напрямую возбудить его лазером. Ситуация изменилась в 2024 году: несколько независимых исследовательских групп сообщили об успешном лазерном возбуждении ядерного перехода тория-229 и наблюдении последующего возвращения в начальное состояние. Это пока не означало, что полноценные ядерные часы были созданы. Скорее, был продемонстрирован ключевой физический принцип, необходимый для их построения. Но уже в 2026 году несколько научных коллективов в разных странах создали рабочие прототипы ядерных часов.

Зачем нужны часы, которые не спешат и не отстают

Сверхточные часы давно перестали быть только устройством для измерения времени. Их точность позволяет замечать слабые изменения окружающей среды. Можно сказать, что в этих случаях часы становятся датчиками.

GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou невозможно представить без точной синхронизации времени. Навигационный приемник в этих системах определяет расстояние до спутника по времени прохождения радиосигнала. При этом из-за различных помех время может быть рассчитано неправильно. Это приводит к неточностям в определении местонахождения объекта. Так, ошибка в 1 наносекунду дает погрешность в 30 см на Земле. Сверхточный ход атомных часов на орбитальных спутниках позволяет наземным приемникам вычислять и компенсировать собственную неточность и обеспечивать правильное позиционирование.

Еще одно необычное применение атомных часов связано с гравитацией. Согласно теории относительности ход часов зависит от гравитационного потенциала. Проще говоря, часы на разных высотах идут с немного разной скоростью: чем ближе к Земле, тем медленнее. Для обычных часов эта разница ничтожно мала, а вот для оптических она становится уже измеримой. Это превращает часы в своеобразный датчик.

Атомные часы применяются для обеспечения сверхточной навигации космических аппаратов и работы глобальных систем позиционирования



Сравнивая показания двух сверхточных часов, можно определять разницу гравитационного потенциала и, как следствие, высот. Такой подход называют релятивистской геодезией. В перспективе он может использоваться при наблюдении за изменением земной поверхности.

Физики надеются, что атомные часы помогут зарегистрировать темную материю в космосе. Она невидима, не взаимодействует со светом, но влияет на галактики через гравитацию. Некоторые гипотезы предполагают, что она может вести себя как слабое поле, которое способно немного менять фундаментальные физические параметры. Например, могут возникать крошечные изменения постоянной тонкой структуры или отношения массы электрона и протона. Сравнивая часы, работающие на разных атомах, ученые ищут согласованные изменения их частот. Исследователи допускают, что часы покажут эти изменения и существование темной материи будет доказано экспериментально.

Возможно, развитие атомных часов приведет к очередному переопределению секунды. Как уже говорилось, сейчас она определяется через микроволновый переход в атоме цезия. Это создает необычную ситуацию с точки зрения науки: самые точные современные часы уже работают в оптическом диапазоне, они превосходят цезиевые стандарты по стабильности и точности, но официальное определение секунды остается связанным с цезием. Международное метрологическое сообщество из-за этого ведет дискуссию о возможном новом определении

секунды на основе оптического перехода. Работа над критериями и процедурами ведется уже сейчас, официальное принятие нового стандарта намечено на 2030 год.

«В октябре 2026 года в Версале (Франция) состоится Генеральная конференция по мерам и весам, на которой будет рассматриваться этот вопрос. В частности, будет определен единственный кандидат из 10 атомов и ионов, который будет использован для нового определения секунды. Среди наиболее возможных кандидатов рассматриваются атомы стронция и иттербия и их ионы. Процесс переопределения завершится на следующей Генеральной конференции, которая состоится в 2030 году. Ядерные стандарты частоты на тории-229 не входят в число кандидатов на новое определение секунды, поскольку его точность в настоящее время недостаточна, чтобы удовлетворять требованиям, предъявляемым для нового определения. Однако в перспективе ядерный стандарт может стать этим кандидатом», — рассказал Виталий Пальчиков, профессор кафедры физико-технических проблем метрологии Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ «МИФИ».

Еще одно направление — перенос атомных часов за пределы лабораторий. Проект ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) на Международной космической станции стал одним из экспериментов, направленных на сравнение работы часов в космосе и на Земле. В будущем сети оптических часов на спутниках могут использоваться для более точной навигации, синхронизации и научных экспериментов.

Для дальней космической навигации будет особенно важна автономность. Сигнал между Землей и космическим аппаратом распространяется с конечной скоростью, поэтому при больших расстояниях команды с Земли будут приходить с большой задержкой. Точные бортовые часы позволят аппарату самостоятельно измерять интервалы времени и использовать их для навигационных расчетов.

Где находятся атомные часы

Современная мировая хронометрия построена на принципе распределенной сети, поэтому нельзя сказать, что атомные часы находятся где-то в определенном помещении или здании. Сотни атомных часов разбросаны по всему земному шару, и их показания объединяются для формирования Международного атомного времени и всемирного координированного времени.

В первую очередь это национальные метрологические институты. Они выполняют роль хранителей времени для своих стран. Именно они вносят свой вклад в формирование шкалы UTC. Чаще всего там используются комбинированные стандарты: цезиевые фонтаны для абсолютной точности и калибровки и водородные мазеры для кратковременной стабильности.

Атомные часы есть в научных центрах: в Парижской обсерватории, Федеральном физико-техническом институте в Германии, государственном метрологическом институте ВНИИФТРИ в России, Национальном институте информационных и коммуникационных технологий в Японии, Национальном институте метрологии в Китае и др. Во многих из них разрабатываются или уже используются оптические решето-точные часы на стронции или иттербии. Например, в итальянском Турине есть стронциевые оптические часы, которые можно транспортировать и использовать для релятивистской геодезии. А Япония лидирует в проекте создания космических оптических часов для связи с наземными станциями.

Кстати, на спутниках вокруг Земли вращаются несколько сотен компактных атомных часов. На Земле обсерватории по всему миру — в США, России, Европе — используют для радиоастрономических исследований в основном водородные мазеры. Там критически важна не столько абсолютная точность, сколько феноменальная кратковременная стабильность частоты сигнала.

Базовые станции мобильной связи (особенно 5G), узлы интернет-трафика, трейдинговые центры применяют для точной синхронизации времени коммерческие рубидиевые стандарты или миниатюрные атомные чип-часы на цезии или рубидии.

Работы над прототипами ядерных часов на основе тория-229 ведутся международными научными группами, в том числе в России, Германии, США, Китае и Австрии.

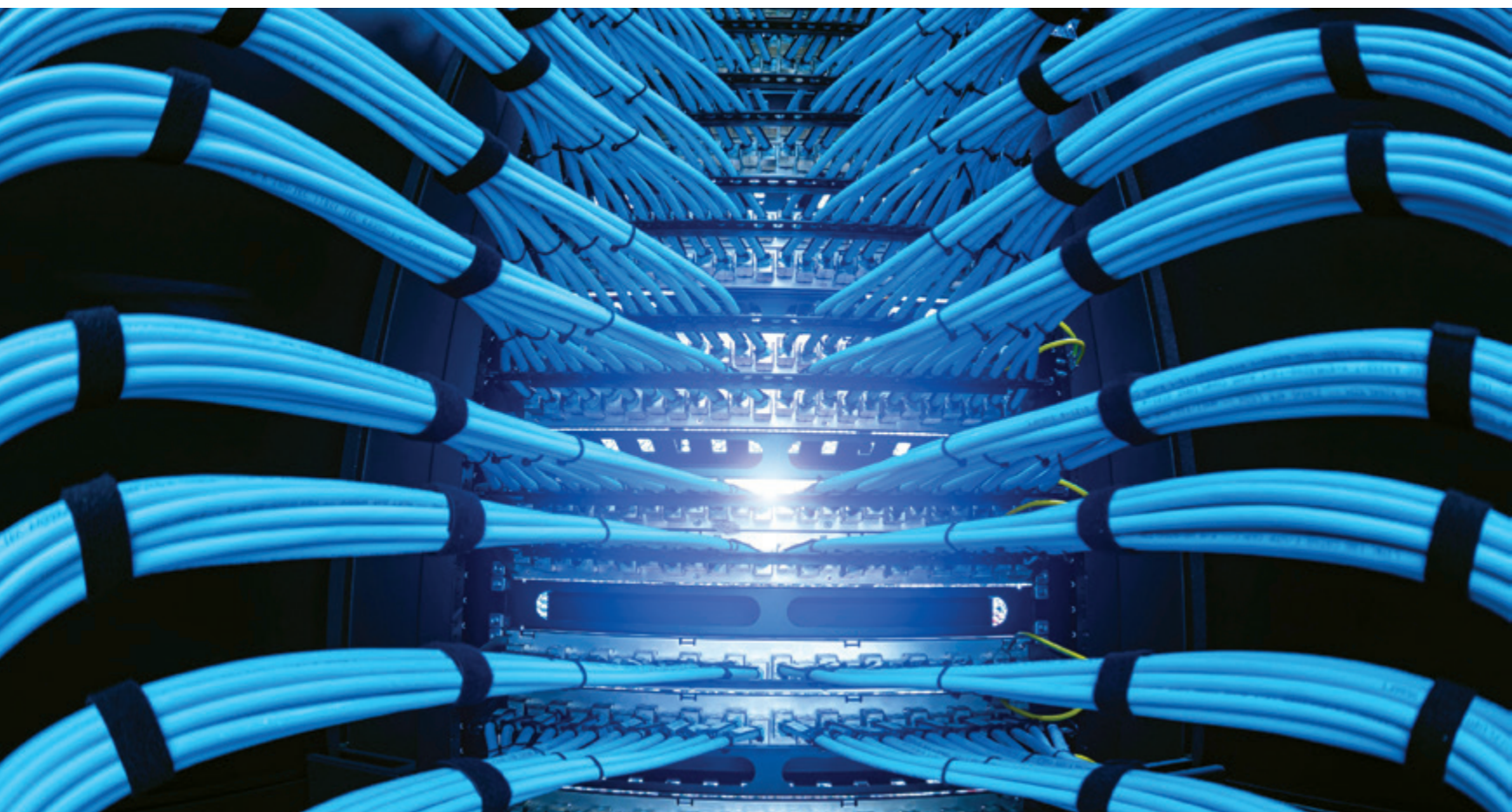


Виталий Пальчиков

Профессор кафедры физико-технических проблем метрологии Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ «МИФИ»:

— Для фундаментальных исследований используются высокоточные часы как в микроволновом диапазоне спектра (цезий-133 и рубидий-87), так и оптические стандарты частоты. В качестве примера можно привести решение задач навигации и поиск полезных ископаемых по гравитационным полям. Дело в том, что точность современных оптических часов такова, что измерения частоты «чувствуют» гравитационный потенциал в конкретной точке. Имея карту гравитационных полей, можно решать задачу «внепогодной» навигации. Такой же подход может быть использован для ортометрического определения перепада высот, когда другие методы либо неприменимы, либо не обладают достаточной точностью. Высокоточные измерения оптических частот могут быть использованы и для оценки неизменности фундаментальных физических констант во времени и тем самым определять границы применимости Стандартной модели, общей теории относительности и т.д. Этот список можно еще долго продолжать, поскольку современная точность измерений атомной частоты как минимум на шесть-семь порядков превосходит точности любых других средств.

Атомные часы могут использоваться для синхронизации пространственно удаленных промышленных объектов, для решения временных задач в сложных технологических процессах, в беспилотном транспорте, в «умном» сельском хозяйстве, в полиции для фиксации правонарушений и т.д. Разумеется, для решения перечисленных задач вовсе не обязательно требуется высокая точность. Они могут решаться, например, с помощью использования тайм-серверов в интернете. Достаточно сказать, что в настоящее время число обращений в сутки к тайм-серверам ВНИИФТРИ составляет порядка миллиарда.



Адажио для дата-центров

Российский рынок ЦОДов замедлился, но ищет возможности для роста

Цифровых данных, требующих обработки, становится все больше — особенно с учетом потребностей искусственного интеллекта (ИИ), которые продолжают расти. Для обработки, хранения и передачи этих данных нужны центры обработки данных (ЦОД), или дата-центры. Россия развивает сегмент ЦОДов, но темпы роста в последние годы резко упали. Причины такого положения дел, возможности его исправить, динамику цен и перспективы улучшения экономики дата-центров обсуждали в «Росатоме» в середине сентября на открытом семинаре из цикла мероприятий по цифровым технологиям, организованном департаментом поддержки новых бизнесов.

«Развитие инфраструктуры для хранения и обработки данных — необходимое условие технологического лидерства. По мере роста спроса на вычислительные мощности ЦОДы становятся не просто инфраструктурным объектом, а частью технологической экосистемы, на базе которой развиваются облачные сервисы, искусственный интеллект и другие новые цифровые решения. Поэтому важно одновременно развивать собственные технологии, компетенции и бизнес-модели, которые позволяют отвечать на растущий спрос российского рынка», — отметил директор департамента поддержки новых бизнесов «Росатома» Дмитрий Байдаров.

ЦОД как бизнес

С установочным докладом «ЦОД как технология и рынок» на семинаре выступил главный эксперт

компания «Консист-ОС» (входит в «Росатом») Александр Прохоров. Появление дата-центров стало возможным благодаря развитию компьютеров и сопутствующей инфраструктуры. В 1940–1970-е появились мейнфреймы (большие универсальные компьютеры) и технологии улучшенного токоподвода и охлаждения. Так, IBM впервые применила для этого фальш-полы, сейчас их повсеместно устраивают в ЦОДах.

Первые дата-центры, как и сам термин, появились в начале 1990-х годов. Тогда же ЦОДы впервые стали восприниматься как самостоятельный бизнес, на рынке появились услуги колокации, то есть размещения серверного, сетевого или телекоммуникационного оборудования компаний-клиентов в дата-центре поставщика услуги. Спустя примерно 10 лет дата-центры предложили рынку облака — услуги доступа к серверным мощностям через интернет. Во второй половине 2010-х появились так называемые краевые ЦОДы (от англ. edge — «край, периферия») — небольшие дата-центры, размещавшиеся близко к потребителям, а чуть позже — гиперскейлы (ЦОДы на десятки и сотни тысяч стоек).

Эволюция в сторону увеличения и уменьшения размеров дата-центра продолжилась. С одной стороны, появились модульные и даже контейнерные решения. С другой — все более внушительные сооружения. Так, если в 2000-е годы площадь дата-центров составляла порядка 2,5–5 тыс. м², то в настоящее время нормой стал 1 млн м² и более. Число стоек за то же время выросло с 350–1500 до 100 тыс. и выше. Мощность стоек увеличилась с 5–8 кВт до 150 кВт и выше. Александр Прохоров структурировал все многообразие решений различных размеров и назначений по пяти направлениям (см. «Типология современных ЦОДов»).

Растет и электропотребление ЦОДов. Так, в 2024 году оно составило около 350 ТВт·ч. «Это примерно столько, сколько потребляет вся Япония, и немного меньше, чем Южная Корея», — пояснил Александр Прохоров. Один только Google использовал 25 ТВт·ч — столько же, сколько 2,5 млн домохозяйств. По прогнозам, к 2030 году потребление

Типология современных ЦОДов

Периферийные — небольшие распределенные объекты, расположенные близко к конечным пользователям. Обеспечивают минимальную задержку при обработке данных.

Корпоративные — масштабы определяются задачами организации, которой необходимо управлять своими ИТ-операциями и критически важными нагрузками.

Колокационные — объекты, где различные организации размещают свою ИТ-инфраструктуру.

Гиперскейлы — масштабные объекты для провайдеров крупных облачных и цифровых платформ.

Для ИИ — оснащены для обеспечения рабочих нагрузок ИИ и высокопроизводительных вычислений. Отличаются высокой плотностью размещения стоек и продвинутыми (жидкостными) системами охлаждения.

электроэнергии вырастет примерно в 2,5 раза, и это несмотря на растущую энергоэффективность ЦОДов. Так, если в середине 2000-х PUE, коэффициент эффективности энергопотребления дата-центра (отношение общего энергопотребления к потреблению только ИТ-системами), составлял 2,5, то в 2024 году он в среднем по рынку достиг показателя в 1,56. На рынке у новейших ЦОДов он составляет 1,2.

Динамика российского рынка

Рынок коммерческих ЦОДов в России в период с 2019 по 2022 год рос со скоростью 8,5–12,3% в год. В 2023 году рост ускорился до 20,7% в год, а затем начал спадать и в 2025 году составил лишь 5,6% в год. Общее число стойко-мест в российских дата-центрах в 2025 году составило 85,8 тыс. штук. «Когда мы прогнозировали динамику российского рынка пять лет назад, то ожидали в 2025 году 90 тыс. стойко-мест. Так и получилось, чуть-чуть не дотянули», — прокомментировал Александр Прохоров.

Для «Росатома» ЦОДы — часть внутренней критической инфраструктуры и одновременно бизнес-направление и коммерческий продукт. «Росатом» входит в четверку лидеров российского рынка по числу введенных в эксплуатацию стойко-мест. По данным iKS Consulting на август 2026 года, у «Росатома» 6570 стойко-мест, у компании DataPro — 7033, у IXcelerate — 12 479, у лидера, РТК-ЦОД, — 27 631. «У «Росатома» стояла задача войти за пятилетку, до конца 2025 года, в пятерку лидеров. Получилось даже в четверку войти», — подытожил свою лекцию Александр Прохоров.

Словарь

ЦОД — это специализированное инженерно-техническое сооружение для размещения ИТ-оборудования для хранения, обработки и передачи больших объемов информации. Основная задача ЦОДа — обеспечить непрерывную работу оборудования. Для этого необходимы определенный микроклимат, физическая безопасность и надежное электроснабжение.



Гендиректор компании «РОКИТ» (управляющая компания дивизиона «Информационная инфраструктура и цифровые технологии» госкорпорации «Росатом») Тимур Аляутдинов назвал три ключевых причины замедления рынка. Первая — высокая себестоимость. Так, 1 МВт мощности ЦОД стоит 1 млрд рублей. Вторая причина — высокая ставка кредитования (порядка 20%). Третья — дефицит энергообеспечения. По этой причине, например, в Москве введен мораторий на строительство дата-центров. Из-за дефицита генерации в крупных городах набирает обороты новая тенденция — размещение дата-центров в регионах.

Близость ЦОДа к объектам генерации, с одной стороны, позволяет минимизировать потери в сетях, но, с другой, появляется задержка во времени при обработке данных. «Физику не обманешь: чем больше расстояние от ЦОДа до центральной архитектуры, тем больше потери при передаче сигнала даже по оптоволоконным кабелям. Для структур типа банков или маркетплейсов задержки свыше 65 миллисекунд критичны для бизнес-процессов», — пояснил Тимур Аляутдинов.

Бизнес готов смотреть варианты в радиусе 400 км от Москвы и Санкт-Петербурга. Дальше могут располагаться ЦОДы для ИИ, так как у них нет жесткого требования обеспечивать быстрый ответ. «Мой субъективный прогноз: большие игроки, которым надо развивать ИИ, с учетом потребностей в стабильной генерации, физической безопасности и возможности размещаться дальше от центральной архитектуры будут рассматривать варианты размещения при АЭС», — предположил Тимур Аляутдинов.

По мнению советника гендиректора по стратегии промышленной трансформации компании «АТОМ-ДАТА» Олега Золотарева, дефицит мощностей будет сохраняться на российском рынке в ближайшие

три — пять лет. Именно это время — окно коммерческих возможностей. На фоне дефицита и падения ввода новых мощностей российский рынок в деньгах растет двузначными темпами. Так, в 2025 году он вырос на 25% по сравнению в 2024 годом. Ожидается, что в 2026 году он составит 18–20%.

Поскольку капитальные затраты на строительство дата-центров велики, деньги дороги, а физическая безопасность становится вызовом, интерес в краткосрочной перспективе может сместиться в сторону модульных и быстровозводимых ЦОДов. «По нашим оценкам, в ближайшие пару лет этот сегмент может занимать до 10% от рынка», — отметил Олег Золотарев. С ним согласился и Тимур Аляутдинов: «В текущей ситуации лучше много маленьких ЦОДов, чем один большой».

В ближайшее время, считает Олег Золотарев, следует ждать много слияний и поглощений мелких и средних участников рынка: «Многие финансовые и промышленные структуры, обладающие капиталом, землей и энергией, смотрят на этот бизнес достаточно пристально, как на возможность заработка».

Об экономике ЦОДов

ЦОД может зарабатывать на разных услугах, и цена на них сильно различается. Как рассказал директор департамента по инновационным технологиям «Росатома» Михаил Лысачев, услуга аренды стойко-места (колокация) внутри дата-центра с надежными электрообеспечением, охлаждением и охраной — это база. Если ЦОД предоставляет услуги аренды серверов и вычислительного оборудования, то доходы могут вырасти в 10 раз. Приток денег от аренды увязанной в единое целое инфраструктуры (Infrastructure as a Service), включающей облачные и сетевые услуги (в том числе корпоративные сети передачи данных) и информационную безопасность, может быть в 30 раз выше базы. Использование услуг доступа к почте, бухгалтерским программам и иным бизнес-приложениям может дать доход в 100 раз выше базового. А выполнение на заказ вычислений, обработка данных и ИИ может обеспечить выручку в 1000 раз выше базовой.

Как рассказал Олег Золотарев, на фоне растущего дефицита предложения колокации цены в этом сегменте рынка растут. Например, в Москве за два года они поднялись на 30–40%. Услуга аренды

Цифра

> \$500 млрд

мировые инвестиции в дата-центры
в 2025 году

145–155 млрд рублей

объем российского рынка дата-центров
по итогам 2025 года

графических процессоров (GPU) B200 в этом году подорожала в 2–2,5 раза по сравнению с прошлым, и очередь на получение доступа может составлять несколько месяцев. Маржинальность этой услуги примерно в полтора раза выше колокации. Растет спрос на облачные сервисы: все больше компаний предпочитают арендовать инфраструктуру, а не размещать собственное «железо». Маржинальность облачных сервисов и GPU-услуг в расчете на одну стойку в два-три раза выше услуги колокации.

Изменение структуры услуг, предоставляемых ЦОДами, — не только возможность, но и реализуемая «Росатомом» стратегия. «Мы в этом направлении идем, причем довольно давно, — заверил коммерческий директор компании «АТОМДАТА» Илья Рогов. — Помимо колокации мы предлагаем услуги аренды оборудования, собирая кластеры оборудования под потребности клиента: вычислительные ресурсы, системы хранения данных, сетевая часть. Если надо, оборудование может быть импортозамещенным. Кроме того, на разных площадках мы предлагаем облачные сервисы — публичные и частные облака, — рассчитанные на разные аудитории. И мы начали заниматься ИИ с точки зрения как поставки оборудования, так и предлагаемых сервисов». Правда, как отметили участники семинара, пока спрос на ИИ-услуги находится на начальном этапе формирования. «У нас другого варианта, кроме как развивать дополнительные сервисы, нет, потому что достичь финансово-экономических показателей, которые записаны в стратегической программе ЦОДов, можно только так», — добавил Тимур Аляутдинов. Сейчас «АТОМДАТА» ищет сильного партнера с облачными решениями и сервисами. «Мы идем к созданию вертикально интегрированного ИТ-холдинга с партнером, который поможет нам обеспечить полную цепочку разработки программно-аппаратных комплексов, облаков, разработки PaaS- и SaaS-решений (платформа как услуга и оборудование как услуга. — Примеч. ред.) с выходом на решения с ИИ», — подытожил он.

Возможно, себестоимость сооружения ЦОДов для бизнеса снизится, если к ним можно будет применить механизм специнвестконтрактов (СПИК). Он предполагает до 50% возврата капитальных затрат. Пока законодательно это невозможно, но недавно президент России Владимир Путин на совещании с главой Минпромторга Антоном Алихановым одобрил такие поправки. Инициатива по распространению механизма СПИК на проекты ЦОДов включена в план законодотворческой деятельности на 2027 год.

Также прорабатывается разработка специальных правовых режимов для ЦОДов в составе объектов генерации. Обсуждаются поправки, в соответствии с которыми дата-центры смогут получать электроэнергию напрямую от электростанций. Сейчас — только от распределительной компании с включенным сетевым тарифом. Оптимизация правил технологического присоединения может положительно влиять на капитальные и операционные расходы ЦОДов и улучшить их экономику, рассказал директор по специальным проектам АО «АТОМ-ДАТА» Видия Железнов.

Для зарубежных партнеров

«Росатом» предлагает свои решения в области дата-центров зарубежным заказчикам АЭС. У ЦОДа в партнерстве с «Росатомом» есть несколько преимуществ. Во-первых, это размещение ЦОДа рядом с АЭС, крупным источником стабильной генерации. «География потребителей электроэнергии и география потребителей трафика совпадает чуть меньше, чем полностью. ЛЭП и линии передачи трафика — тоже. АЭС «Аккую» и «Эль-Дабаа» находятся в очень выгодном положении, особенно если решить вопросы трансграничной передачи трафика. Перспективы ЦОДов вблизи объектов генерации есть совершенно точно, особенно для приложений, нечувствительных к задержкам», — уверен Михаил Лысачев.

Во-вторых, это накопленный опыт. Так, строительный холдинг «Титан-2», который участвует в сооружении АЭС российского дизайна в России и за рубежом, был генподрядчиком строительства одного из центров обработки данных. В сети «Росатома» все ЦОДы разные. Теперь на базе этого разнообразного опыта проектирования, согласований, сооружения и эксплуатации «Росатом» прорабатывает типовый проект ЦОДа при АЭС для строительства как внутри России, так и за рубежом.



Уран все дороже

Тенденции и перспективы мирового уранового рынка

В середине сентября была опубликована «Красная книга — 2026» — очередной выпуск издания Uranium: Resources, Production and Demand. Одна из ключевых тенденций, отмеченных в «Красной книге», — инвестиции в геологоразведку и развитие рудников растут. Другая — постепенное увеличение себестоимости добычи урана. Для того, чтобы рудники своевременно обеспечивали растущий спрос мирового парка АЭС, необходимо, чтобы цены на уран выросли.

В свежем выпуске «Красной книги» (издании Агентства по ядерной энергии (NEA) ОЭСР и МАГАТЭ) анализируются данные с 1 января 2023 года по 1 января 2025 года. Также в издание вошли значимые события 2025 и 2026 годов.

Больше инвестиций в разведку

Как отмечается в издании, в 2023–2024 годах сохранилась начавшаяся в 2021 году тенденция к росту расходов на геологоразведку и строительство рудников. Причинами названы повышение цен на уран и интереса к атомной энергетике. «Эти факторы оживили, а в некоторых случаях ускорили геологоразведочную деятельность», — отмечается в отчете. За четыре года инвестиции выросли почти вдвое: с \$490 млн в 2021 году до \$810 млн в 2023-м и \$965 млн в 2024-м. Однако, если сравнивать эту цифру с историческими данными, говорить о полноценном восстановлении инвестиций преждевременно. Так, в 2011 и 2012 годах они составили \$1,95 млрд и почти \$1,92 млрд, а в постфукусимском 2014-м — \$2,1 млрд.

Девятизначные суммы в геологоразведку и строительство рудников инвестируют только две страны — Канада (\$312,36 млн и \$370,61 млн в 2023 и 2024 годах соответственно) и Китай (\$223 млн и \$232 млн в 2023 и 2024 годах соответственно). На эти две страны приходится примерно две трети от мирового объема инвестиций. На третьем месте по итогам 2024 года оказались США, которые более чем удвоили инвестиции за оценочный период (\$53,3 млн и \$69,2 млн в 2023 и 2024 годах соответственно против \$26,2 млн в 2022 году). На четвертом — Узбекистан. В этой стране вложения в урановую геологоразведку и строительство рудников увеличились с \$20,37 млн в 2022 году до \$35,89 в 2023-м и до \$56,46 в 2024-м. На пятом — Индия. Но там инвестиции, напротив, падали: с \$66,81 млн в 2022 году до \$60,32 в 2023-м и \$53,16 в 2024-м. Инвестиции России в урановую геологоразведку

по сравнению с 2022 годом (\$10,96 млн) практически удвоились в 2023 году (\$20,23 млн) и более чем утроились в 2024-м (\$34,77 млн).

Предварительные данные за 2025 год показывают небольшое снижение инвестиций, однако, как предполагают авторы отчета, это может быть связано с тем, что Казахстан, США, Монголия, Нигер, Турция, Саудовская Аравия, Мавритания и Замбия не предоставили данные на этот период. Поскольку на них пришлось порядка 13% (\$120 млн) от общего объема инвестиций в геологоразведку в 2024 году, авторы «Красной книги» ожидают, что итоговый результат все же покажет рост примерно до \$1 млрд — \$1,1 млрд.

В 2026 году интерес к атомной энергетике сохраняется, а цены на уран продолжают подрастать, поэтому можно предположить, что и по итогам 2026 года инвестиции в урановую геологоразведку увеличатся.

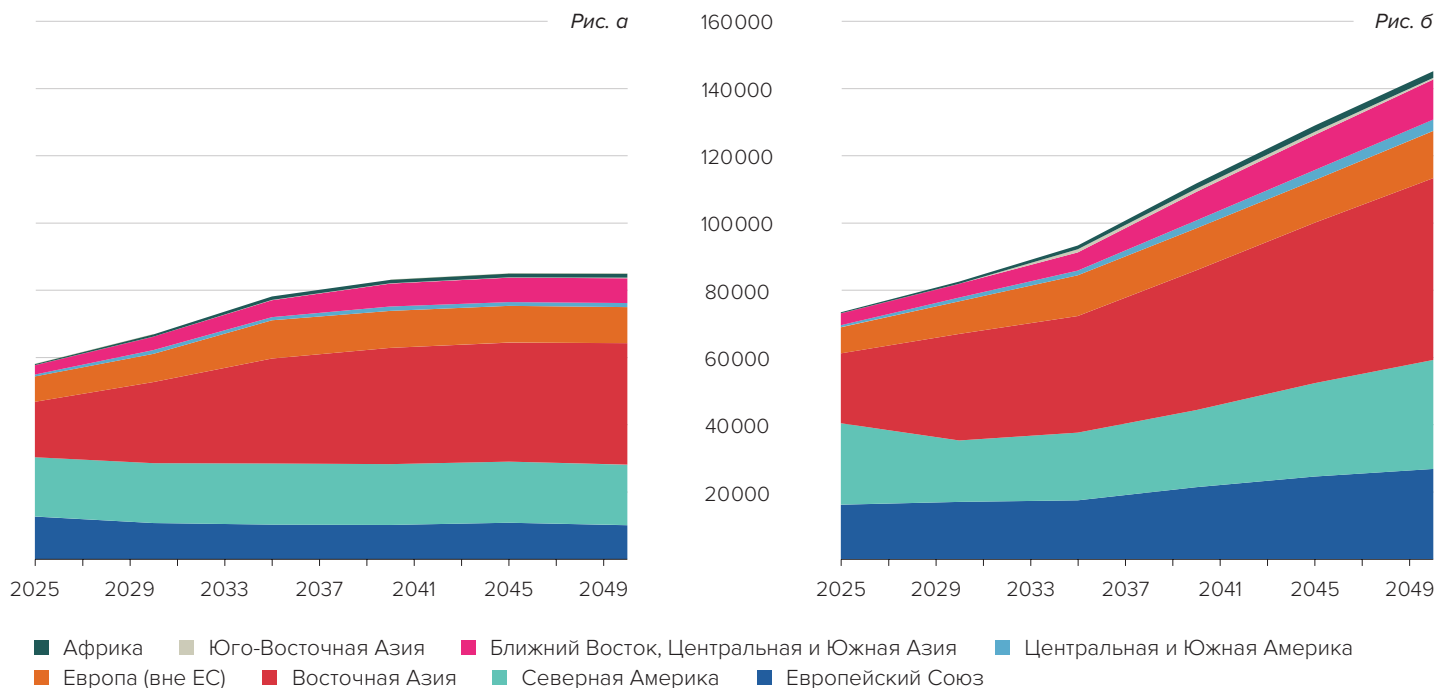
Больше ресурсов, выше себестоимость

В «Красной книге» урановые ресурсы оцениваются по двум категориям, в зависимости от степени разведанности: разумно оцененные (reasonably assured, RAR) и предполагаемые (inferred). Они приводятся как ресурсы в недрах и извлекаемые (recoverable) с учетом потерь при добыче и переработке. Ресурсы также категоризируются по предполагаемой себестоимости добычи. Категорий себестоимости четыре, каждая следующая категория включает предыдущую, как в матричке.

За два года выявленные ресурсы с себестоимостью добычи до \$260 за кг урана (или \$100 за фунт U_3O_8) выросли на 2,1%. Эта категория с наивысшей себестоимостью, она включает в себя все предыдущие. Ресурсы в категории до \$130 за кг урана (\$50 за фунт U_3O_8) снизились за два года на 1%. В категории до \$80 за кг урана (\$30,77 за фунт U_3O_8) они выросли на 3,5%, а в категории ниже \$40 за кг урана (\$15,38 за фунт U_3O_8) — на 2,1%.

«Тренд на переоценку ресурсов в категории с более высокой себестоимостью, обозначенный в предыдущем издании, продолжился. По данным на 1 января 2025 года, только четыре страны сообщили о наличии ресурсов в категории ниже \$40 за кг урана, и 75% от их общего объема относятся к Казахстану», — отмечается в «Красной книге». Четыре страны — это Бразилия, Китай, Казахстан и Испания. Данные минимум двух стран, Бразилии и Испании, вызывают сомнения. Так, в Испании ресурсы в размере

Прогнозируемая годовая потребность реакторов в уране до 2050 года (низкий (а) и высокий (б) сценарии), тонн урана в год



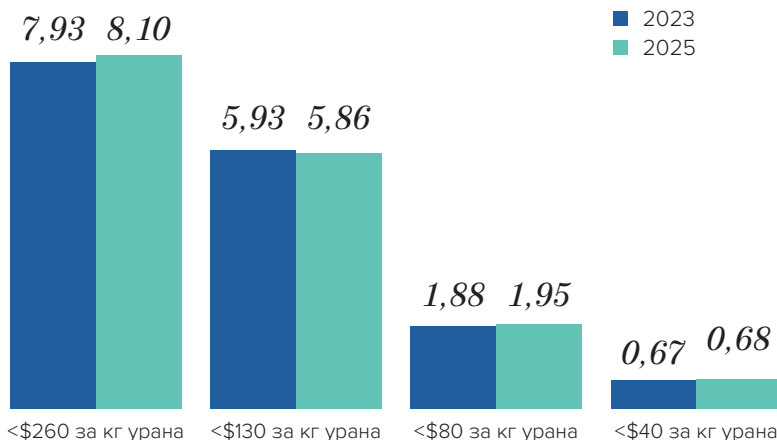
9,8 тыс. тонн были учтены в «Красной книге — 2018» по итогам геологоразведочных работ, в следующем выпуске они были переоценены до 8,1 тыс. тонн и с тех пор не менялись. Очевидно, что прошедшие шесть лет, включившие пандемию, постпандемийное лихорадочное восстановление экономики, политическую турбулентность, нарушения поставок и топливные кризисы, не могли не сказаться на себестоимости. Однако в Испании уран не добывают, это невозможно, так как испанские регуляторы ввели запрет на добычу урана, поэтому реальные цифры (к тому же очень небольшие), по-видимому, никому не хочется ни уточнять, ни согласовывать.

В Бразилии минимум 10 лет назад учитывалось 138,1 тыс. тонн RAR в категории до \$40 за кг урана. Однако масштабная проверка документации и переоценка при подготовке «Красной книги — 2024» привели к сокращению ресурсов во всех категориях себестоимости. В частности, в категории до \$40 за кг урана RAR в Бразилии снизились до 53 тыс. тонн. Однако и эти данные, вероятно, потребуются пересмотреть. По данным свежего издания «Красной книги», в период 2020–2024 годов в стране не были выявлены новые ресурсы. Сама Бразилия RAR в категории до \$40 за кг, несмотря на их экономическую привлекательность, не добывает. На единственном в стране действующем руднике Caetite — Lagoa Real себестоимость производства урана, по данным «Красной книги», составляет более \$130 за кг урана. Да и производство на Caetite — Lagoa Real сложно назвать налаженным. Так, между 2021 и 2024 годом, как отмечается в «Красной книге — 2026», объем добычи находился в диапазоне от 29 до 91 тонны в год, предварительная оценка

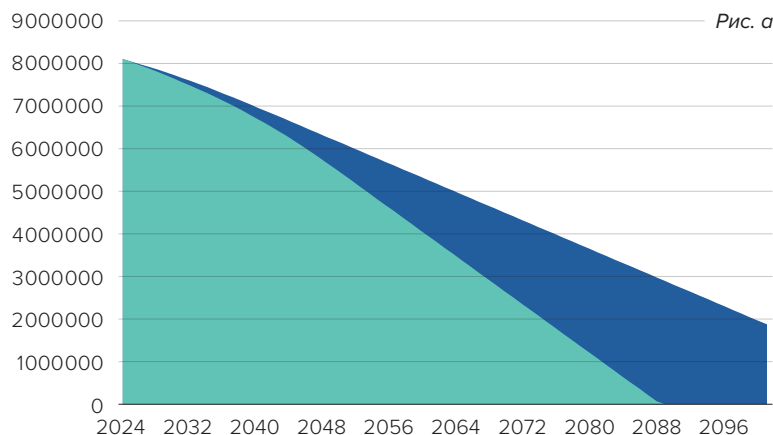
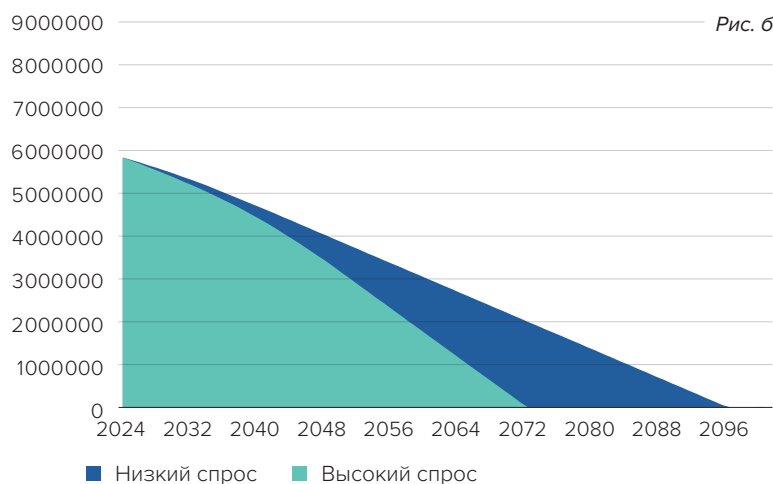
на 2025 год — 64 тонны. Это ниже уровня округления в «Красной книге» (около 100 тонн).

Возможно, ресурсы в категории ниже \$40 за кг урана (\$15,38 за фунт U_3O_8) на практике закончились. Поясним: наверняка есть участки, себестоимость отработки которых укладывается в этот параметр. Однако одновременно приходится отрабатывать и участки с более высокой себестоимостью. И главное — увеличивается себестоимость не только добычи, но и переработки. Ключевая причина — рост цен на серную кислоту, важнейший реагент для извлечения урана из руды и продуктивных растворов скважинного подземного выщелачивания. В России,

Мировые извлекаемые ресурсы, млн тонн урана



Прогнозируемое использование ресурсов при сценариях низкого и высокого спроса (при условии сохранения производственных мощностей в период с 2050 по 2100 год), представленное в виде общего объема выявленных извлекаемых ресурсов, доступных при затратах ниже (а) \$260/кг U и (б) \$130/кг U, тонн урана



по данным аналитической компании BusinesStat, цены на нее в 2025 году выросли на 82% по сравнению с 2024-м. В Китае за тот же период цены выросли на 113%. По данным аналитического портала Logistics Viewpoints, в первом квартале 2026 года мировые цены на серную кислоту выросли на 20–30% по сравнению с концом 2025 года. С учетом продолжающихся атак на нефтеперерабатывающие предприятия Ближнего Востока и России (они производят серу — сырье для производства серной кислоты) можно предположить, что проблемы с объемами производства и поставками на сернокислотном рынке продолжатся, а значит, цены как минимум не упадут, а с большей вероятностью продолжат расти.

По данным отчетности за первое полугодие 2026 года, себестоимость выпуска урана у Cameco составила 25,83 канадского доллара за фунт (около \$18 за фунт), а общие производственные затраты — 36,84 канадского доллара за фунт (\$25,8 за фунт). У «Казатомпрома» за тот же период себестоимость составила \$24,48 за фунт, а совокупные денежные

затраты — \$38,45. Конечно, это лишь два примера. Однако это примеры крупнейших уранодобывающих компаний в мире, и они показывают, что даже средняя себестоимость превышает \$40 за кг (\$15,38 за фунт). У небольших компаний себестоимость еще выше. Так, производственные затраты австралийской Paladin Energy на расконсервированном руднике Langer Heinrich в Намибии в «июньском» квартале 2026 года, по данным отчета, составили \$51,6 за фунт.

Себестоимость растет. Так, по данным отчетности за первое полугодие 2026 года, затраты на выпуск фунта урана в «Казатомпроме» выросли по сравнению с аналогичным периодом 2025 года на 37% с \$17,86, а совокупные денежные затраты — на 25% с \$30,81. У Cameco в эти же периоды рост себестоимости выпуска составил 7% с 24,05 канадского доллара (\$16,8). Общие производственные затраты — на 5% с 34,95 канадского доллара (\$24,47). Важно, что во втором квартале 2026 года рост обоих показателей по сравнению с аналогичным периодом 2025 года ускорился до 16% и 9% соответственно.

Эти факты и тенденции свидетельствуют об удорожании производства урана даже на самых низкокзатратных предприятиях. Не исключено, что переоценка ресурсов с учетом инфляции в уранодобывающих странах приведет к необходимости пересмотра категорий учета ресурсов в «Красной книге» — например, отказу от категории ниже \$40 за кг урана и введению новой категории с более высоким уровнем затрат.

Уран в достаточном количестве

В 2023 и 2024 годах уран производили 18 стран. Хотя уровень производства из рудников по-прежнему отстает от объемов потребления, выпуск в последние три года растет (см. «Мировое производство урана»), а разница между показателями спроса и предложения сокращается. Так, если в 2022 году доля первичного урана в общем объеме потребления составляла порядка 85%, то в 2024 году — 96%. Крупнейшим производителем остается Казахстан, на долю которого пришлось 38% от мирового объема производства урана. На долю шести крупнейших производителей (кроме Казахстана, это Канада, Намибия, Узбекистан, Австралия и Россия) приходится 93% мирового производства урана.

Несмотря на то, что с начала 1990-х первичное производство урана ниже уровня спроса, рынок дефицита не ощущает, разница компенсируется из различных вторичных источников. Так, объем урана в запасах приблизительно оценивается в 468 840 тонн. Из них объем «гражданских» запасов (у энергокомпаний, трейдеров и производителей) в США, по данным Управления по энергетической информации Минэнерго США, в 2025 году составил 64,4 тыс. тонн урана. В Евросоюзе запасы урана, по данным на конец 2024 года, составили почти 40 тыс. тонн. Европейским атомным энергоблокам этого хватит более чем на три года работы. Также среди вторичных источников урана — банки низкообогащенного топлива в России и Казахстане, обедненный уран вкуче с плутонием

из облученного топлива, из которых производят МОКС-топливо для тепловых и быстрых реакторов (его используют 24 реактора, или 5% мирового парка атомных энергоблоков, в России, Франции и Нидерландах), невыгоревший обогащенный уран из облученного топлива, а также обедненный уран, который можно дообогащать. По прогнозам World Nuclear Association, до 2040 года доля вторичных источников в общем объеме поставок урана будет составлять около 4% (5–6 тыс. тонн урана в год). «Ожидается, что объемы поставок урана из вторичных источников будут снижаться по мере истощения запасов, удовлетворение потребностей реакторов все в большей степени будет зависеть от первичной добычи», — говорится в отчете.

На фоне постпандемийного восстановления мировой экономики во второй половине 2021 года и череды военных, политических и торговых конфликтов, начавшихся в 2022 году, цены на уран выросли, а позиции атомной энергетики укрепились. После улучшения рыночной ситуации некоторые рудники, ранее законсервированные, вернулись в эксплуатацию. Так, после четырех лет простоя в ноябре 2022 года в Канаде был перезапущен McArthur River. В Намибии на руднике Langer Heinrich, на котором производство было остановлено в 2018 году, первые после перезапуска бочки с концентратом были упакованы в марте 2024 года. Производство было перезапущено и на руднике Hopeview в Австралии. Во второй половине 2025 года возобновилось производство на руднике Kayelekera в Малави. Возобновляют производство и на нескольких предприятиях в США.

По данным «Красной книги», выявленные извлекаемые ресурсы урана обеспечат потребности атомных энергоблоков до 2050 года как при высоком, так и при низком сценариях развития атомной генерации. Высокий сценарий, предложенный авторами «Красной книги», предполагает, что совокупная мощность атомных энергоблоков к 2050 году достигнет 916 ГВт. Низкий — 565 ГВт. В настоящее время она составляет 398 ГВт. Реализация сценария высокого спроса потребует производства около 2,7 млн тонн природного урана к 2050 году. Это примерно 80% от общего объема урана, добытого во всем мире с момента рождения атомной энергетики. По оценкам экспертов «Красной книги», если после 2050 года совокупная мощность атомных энергоблоков не изменится до конца XXI века (что согласуется с ожидаемым сроком службы новых реакторов), при высоком сценарии выявленные ресурсы с себестоимостью до \$130 за кг урана будут исчерпаны к 2072 году, при низком — в 2096-м. Ресурсы с себестоимостью до \$260 за кг урана при высоком сценарии закончатся в 2088 году, при низком их объем упадет более чем вчетверо от нынешнего (менее 2 млн тонн урана).

Эти оценки предполагают, что добыт, переработан и отправлен покупателям будет каждый килограмм выявленных ресурсов урана. Однако история свидетельствует о том, что значительная часть выявленных ресурсов так и не была добыта, а добыча разведанных запасов в среднем требовала на одно-два десятилетия

больше времени, чем планировалось, говорят авторы «Красной книги». Поэтому урана надо больше.

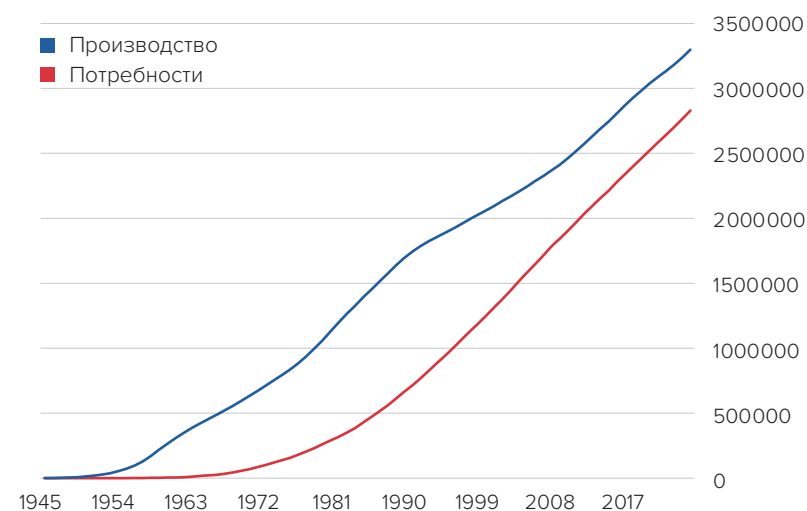
Больше инвестиций

«Расширение или даже поддержание мощностей после 2050 года потребует привлечения объемов урана, сопоставимых с большей частью всей известной на сегодняшний день ресурсной базы. Это подчеркивает настоятельную необходимость дальнейших геолого-разведочных работ, освоения ресурсов и пересмотра концепции открытого топливного цикла как стандартного подхода для растущего мирового парка ядерных реакторов», — уверены авторы «Красной книги».

Однако для того, чтобы на геологоразведку, строительство рудников и их запуск были деньги, нужна воодушевляющая инвесторов обстановка. «Урановые ресурсы будут вовлечены в отработку, когда рыночная конъюнктура обеспечит уверенность в том, что проект принесет прибыль инвесторам и операторам. И напротив: неблагоприятные рыночные условия не только сдержат рост предложения, но и замедлят инвестиции в геологоразведку, что в долгосрочной перспективе может сказаться на выявлении дополнительных ресурсов», — говорится в «Красной книге».

Это значит, что цены на уран должны быть выше, чем сейчас. Как минимум, они должны быть выше себестоимости ресурсов, то есть до \$130 за кг к середине XXI века и до \$260 за кг к его концу. Можно даже грубо прикинуть насколько, сравнив себестоимость и цены у крупнейших производителей, сложившиеся по итогам первого полугодия 2026 года. Так, у «Казатомпрома» они различаются почти на 77%. У Cameco разница почти в 2,63 раза. Задав диапазон в 1,5–3 раза, получаем диапазон цен в \$195–390 за кг урана (\$75–150 за фунт U_3O_8) для ресурсов с себестоимостью до \$130 за кг и \$390–780 за кг урана (\$150–300 за фунт U_3O_8) для ресурсов с себестоимостью до \$260 за кг.

Мировое совокупное производство и потребности в уране в 1945–2024 гг., тонн урана





Текст: Антонина Бариева,
директор практики «Промышленность
и технологии» Strategy Partners

Иллюстрации: газета «Страна Росатом» / GPT Image

От цифровых услуг к ранним решениям

Как ИИ меняет государственное управление



Цифровизация научила государство быстрее собирать данные и оказывать услуги. Но быстрый доступ к информации еще не означает принятия быстрого и своевременного решения. ИИ может сократить путь от сигнала о проблеме до действия: раньше заметить риск, сопоставить больше факторов и взять на себя часть рутинной работы. При этом речь идет не о внедрении автономного управления с использованием ИИ, а о новом распределении работы между технологией и человеком.

За последние годы российские органы власти перевели услуги в электронный формат, создали государственные реестры и упростили обмен данными между ведомствами. Данных стало больше, получить их можно быстрее. Но наличие информации само по себе еще не гарантирует своевременного решения: сигнал о проблеме может находиться в одной системе, полномочия — в другом ведомстве, а порядок реагирования может быть и не закреплён вовсе.

Искусственный интеллект способен сократить этот разрыв. Его ценность для государства не ограничивается скоростью обработки данных. Он помогает учитывать больше факторов, сопоставлять данные из разных источников, выявлять неочевидные связи, раньше и зачастую своевременно замечать отклонения и готовить более обоснованную основу для выбора меры реагирования. Качество управления повышается не потому, что алгоритм принимает решение вместо человека, а потому, что руководитель раньше получает более полную картину о сложившейся ситуации и может быстрее спланировать меры и перейти к действию.

Масштаб внедрения ИИ-решений в России уже заметен. Так, к февралю 2026 года 55 российских регионов разместили на портале «Цифровой регион» около 350 ИИ-решений и более 430 сценариев их применения, тогда как в октябре 2025 года на портале было 150 практик из 26 регионов, как указано на сайте правительства России [1]. То есть ИИ выходит за рамки отдельных экспериментов и постепенно становится рабочим инструментом регионов.

Но рост количества решений еще не означает нового качества управления. Главный вопрос теперь не в том, сколько ИИ-проектов запущено, а в том, помогают ли они государству раньше замечать проблему, принимать более обоснованные решения и быстрее переходить к действию? И что необходимо, чтобы отдельные успешные кейсы сложились в устойчивую систему?

Три изменения в управленческом цикле

Разница между цифровизацией и применением ИИ проявляется не в количестве систем, а в том, как

меняется путь от информации к решению. Наиболее заметны три изменения: государство получает возможность раньше выявлять риск, лучше обосновывать принимаемые решения и передавать ИИ часть рутинной работы.

Раннее выявление сигналов о рисках

Обычная информационная система фиксирует уже известное событие: поступило обращение, нарушен срок, изменился показатель. ИИ может сопоставить множество слабых сигналов и заметить риск до того, как он превратится в проблему. Практическая ценность такого прогноза — не в самой вероятности, а в дополнительном времени для принятия обоснованного управленческого действия.

Например, в российской системе управления национальными проектами ИИ уже анализирует все мероприятия и показатели, выявляет связи между ними и прогнозирует риски невыполнения. По данным правительства, точность прогноза достигает 96%. Для выявления взаимосвязей система анализирует более 1 тыс. возможных вариантов в минуту, благодаря чему почти полмиллиона потенциальных связей можно проверить за один день — вручную такая работа заняла бы у 76 экспертов около четырех лет. Результаты анализа затем проверяют федеральные органы исполнительной власти: они подтверждают выводы системы, отклоняют их или направляют на дополнительную проверку. Об этом говорится на сайте Президентской академии [2].

Сам по себе прогноз еще не меняет ситуацию. Эффект или конечная ценность ИИ появляется только в том случае, если предупреждение приводит к корректировке плана, сроков или распределения ресурсов. Безусловно, точность модели — важный показатель, но главным результатом должно стать повышение качества управления, определяющееся тем, успело ли государство отреагировать до того, как риск реализовался.

Повышение обоснованности управленческих решений

Вторая возможность ИИ связана с увеличением количества и улучшением качества информации, на основе которой принимаются управленческие решения. Система с использованием ИИ может быстрее структурировать большие массивы данных, документов, обращений и экспертных позиций, выделять повторяющиеся темы и противоречия. Она не определяет, что важнее для общества, но помогает руководителю и экспертам увидеть больше аргументов и не упустить существенные сигналы.

Так, британский сервис Consult обработал более 50 тыс. ответов, поступивших в рамках работы Независимой комиссии по водному сектору. Система распределила материалы по темам примерно за два часа; вычисления обошлись в £240, а экспертная проверка заняла еще 22 часа. Результат совпал с данными одной или обеих экспертных групп почти в 83% случаев, тогда как данные двух групп специалистов совпали

между собой в 55%. Эксперты сохранили детальный ручной анализ значимых позиций, но освободились от первичной сортировки десятков тысяч ответов [3].

Главный эффект здесь — не автоматизация политического решения, а возможность быстрее и качественнее собирать и разбирать доказательную базу. ИИ не заменил экспертов и руководителей, а снял с них первичную обработку и оставил людям задачи, где необходимы оценка, контекст и ответственность.

АВТОМАТИЗАЦИЯ РУТИННЫХ ОПЕРАЦИЙ

Третье изменение происходит там, где задача уже понятна, правила заранее заданы, а результат можно проверить. ИИ может классифицировать документы, извлекать сведения, готовить проектные материалы и выполнять несколько последовательных операций. Сотруднику при этом передаются спорные случаи, исключения и итоговый результат для проверки.

Например, южнокорейская система e-RFP помогает государственным служащим готовить документацию для закупок и проверять ее соответствие требованиям. По данным ОЭСР, использование системы сократило время подготовки документов на 70%, а соответствие закупочным правилам достигло 99,9% [4]. Сильная сторона такого сценария — четкая граница задачи: алгоритм выполняет проверяемую административную работу, но не определяет цели закупки и не принимает значимое решение за заказчика.

В результате ИИ берет на себя то, что машина способна делать быстрее: искать сигналы, разбирать

большие массивы информации и выполнять типовые операции. За человеком остаются постановка цели, оценка последствий, определение допустимого риска и работа с нестандартными ситуациями. В отдельных процессах такое распределение ролей уже дает результат. Следующим же вопросом становится то, как можно организовать такое взаимодействие не в одном ведомстве, а в масштабе всей системы.

Три условия системного внедрения

Международный опыт показывает: отдельные удачные инструменты еще не создают новую модель управления. Для масштабирования государству нужны единая технологическая основа, понятная оценка результата и контроль, учитывающий цену возможной ошибки.

ОБЩАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНОВА

Япония развивает Government AI “Gennai” как общую государственную среду для работы служащих с ИИ. В 2026 финансовом году пилот рассчитан примерно на 180 тыс. сотрудников всех министерств и ведомств и должен продолжаться с мая 2026 года по март 2027 года. Японское Агентство цифрового развития прямо связывает внедрение не только с доступом к модели, но и с изменением рабочих процессов, обучением сотрудников, развитием организационной культуры и усилением контроля за использованием ИИ [5].

Преимущество такого подхода состоит в том, что каждому ведомству не нужно заново создавать необходимую инфраструктуру, правила безопасности и набор



разрешенных инструментов. Это снижает стоимость и ускоряет запуск новых решений. Но общая платформа сама по себе не меняет работу ведомств автоматически. После появления технологической основы главным фактором становится способность ведомства выбрать правильную задачу и встроить ИИ в конкретный процесс.

ИЗМЕРЕНИЕ РЕАЛЬНОГО ЭФФЕКТА

Второе условие — умение доказать, что решение действительно улучшает работу, а не просто удобно пользователям. По данным ОЭСР, ИИ применяется хотя бы в одной сфере государственного управления в 35 из 36 обследованных стран, но эффект отдельных кейсов измеряют только 10 [4]. Без такой оценки трудно понять, какие проекты стоит расширять, а какие остаются экспериментами без подтвержденной пользы.

В этом случае показателен британский опыт Microsoft 365 Copilot. В межведомственном эксперименте с участием 20 тыс. служащих пользователи оценили среднюю экономию времени в 26 минут в день. В отдельном исследовании Департамента труда и пенсий, где результаты пользователей сравнивали с группой сотрудников без Copilot, оценка составила 19 минут. Исследование также выявило положительное изменение воспринимаемого качества работы, хотя авторы отметили риск самоотбора более мотивированных пользователей [6], [7].

Разница между 26 и 19 минутами не опровергает пользу инструмента. Она показывает, насколько результат зависит от метода оценки. Для руководителя важна не самая эффективная цифра, а результат, который можно повторить, проверить и связать с работой ведомства: с сокращением сроков и трудозатрат, уменьшением числа ошибок, повышением качества и объемом дополнительной проверки.

КОНТРОЛЬ ПРОПОРЦИОНАЛЬНО РИСКУ

Третье условие — различать низкорисковые внутренние задачи и решения, влияющие на права граждан, выплаты, бюджет или доступ к услуге. В Канаде автоматизированные административные решения проходят обязательную оценку воздействия. Система получает один из четырех уровней — от минимального до очень высокого — с учетом последствий для прав, здоровья, экономических интересов, длительности и обратимости решения. От уровня зависят требования к проверке, участию человека и возможности оспорить результат [8].

Такой подход меняет сам принцип контроля. Строгость должна зависеть не от технической сложности решения, а от цены возможной ошибки. Простая модель, влияющая на выплату гражданину, может требовать более серьезной проверки, чем сложный инструмент для внутренней сортировки документов.

В совокупности эти практики формируют ясную рамку: общая среда снижает стоимость и сроки запуска, измерение показывает реальный эффект,

При применении искусственного интеллекта качество управления повышается не потому, что алгоритм принимает решение вместо человека, а потому, что руководитель раньше получает более полную картину о сложившейся ситуации и может быстрее спланировать меры и перейти к действию.

а рискориентированный контроль задает допустимые границы автоматизации. Из этой рамки уже можно вывести модель, наиболее реалистичную для России.

Российская модель: общая основа, региональные приоритеты

Российские регионы различаются по структуре экономики, бюджету, данным, кадровым ресурсам и зрелости информационных систем. Промышленному субъекту важны надежность оборудования и производственная безопасность, аграрному — состояние посевов и прогноз урожайности, крупному городу — транспорт, медицина и управление обращениями. Федеральный центр не может в полной мере учесть эту специфику при выборе прикладных задач. Но создавать в каждом регионе собственную защищенную инфраструктуру, базовые сервисы, правила безопасности и типовые интеграции — дорого и долго.

Поэтому для России наиболее жизнеспособна та модель, в которой технологическая основа и общие требования создаются централизованно, а регионы и ведомства самостоятельно выбирают приоритетные задачи и меняют процессы под их решение. Федеральный уровень может отвечать за создание защищенной инфраструктуры, базовых ИИ-сервисов, единых требований к данным и безопасности, типовых подключений к государственным системам, методик оценки и реестра проверенных решений. Платформа «ГосТех» уже формирует общую облачную среду для разработки и эксплуатации федеральных и региональных государственных систем; эту логику можно последовательно распространять и на ИИ-решения [9].

Регион или ведомство отвечает за прикладную часть: выбирает управленческую задачу, определяет правовое основание, готовит данные, меняет порядок работы, обучает сотрудников и оценивает результат. Единая платформа не отменяет региональную специализацию. Напротив, она позволяет направить ограниченные ресурсы не на повторную сборку технологии, а на отраслевую экспертизу и перестройку конкретного процесса. При этом для каждого проекта также нужен конкретный владелец

Пять приоритетов для руководителя

1. Начинать с управленческой задачи. Перспективный проект описывается не формулой «внедрить ИИ», а конкретным изменением: раньше выявлять риск, сократить срок согласования, уменьшить объем ручной проверки или повысить качество документа. Сначала руководитель определяет, что именно должно измениться в работе, и только после этого выбирает технологию. Чем точнее задан ожидаемый результат, тем проще подобрать технологию и оценить достигнутый эффект.
2. Фиксировать исходную точку. До запуска проекта важно понять, как процесс работает сейчас: сколько времени и ресурсов он требует, сколько возникает ошибок и жалоб, какой объем работы сотрудники выполняют вручную. Без базовой линии даже заметное улучшение останется впечатлением команды, а решение о масштабировании — предметом спора.
3. Использовать общую инфраструктуру, сохраняя ответственность за процесс. Типовые модели, вычислительные мощности, безопасность и интеграции разумно создавать централизованно. Но за выбор задачи, качество данных, изменение порядка работы и конечный результат должен отвечать конкретный руководитель в ведомстве или регионе.
4. Заранее определить роль человека. Нужно заранее решить, какие операции система выполняет самостоятельно, где сотрудник проверяет результат и в каких случаях берет решение на себя. Чем выше цена ошибки, тем важнее понимать, на чем основан вывод системы, иметь возможность пересмотреть решение и обжаловать его.
5. Масштабировать управленческое решение, а не только алгоритм. Передавать регионам необходимо не просто программный продукт, а готовую модель внедрения: технологию, требования к данным, способы интеграции, изменения процесса, показатели результата и правила контроля. При этом еще до запуска проекта масштабируется, дорабатывается или прекращается.

процесса — руководитель, который имеет полномочия менять регламент и отвечает за достигнутый эффект.

Масштабировать при этом нужно не отдельный алгоритм, а готовое комплексное решение для внедрения: модель, требования к данным, способы интеграции, изменения регламента, показатели результата, правила проверки и сценарии работы с исключениями. Один и тот же программный компонент может дать разный эффект в двух регионах, если он по-разному встроен в полномочия и ежедневную работу.

По мере роста числа проектов возникает и задача управления ими как единым портфелем. Москва реализовала более 130 проектов с использованием ИИ в разных сферах [10]. Само количество не доказывает результативность, но показывает, что инициативы уже необходимо сравнивать по единым правилам: масштабировать решения с подтвержденным эффектом, дорабатывать ограниченно работающие и завершать те проекты, которые не улучшают процесс вовсе. Поэтому еще до запуска пилота важно определить, при каком результате проект будет масштабирован, доработан или остановлен. А зрелость региона проявляется не в способности запустить как можно больше пилотных проектов, а в умении быстро переводить удачные решения в повседневную практику и освобождают ресурсы от реализации неэффективных инициатив.

Каким станет государственное управление

Среди 36 стран, изученных ОЭСР в 2025 году, 31 страна использует ИИ во внутренних процессах органов власти, 27 — при оказании государственных услуг и только 13 — при подготовке государственной политики. Такая разница объясняется тем, что управленческие решения требуют более строгих правил работы с данными, прозрачности и контроля [4]. В целом логика распространения ИИ не меняется, но растягивается во времени: государство осваивает ИИ сначала там, где результат легко проверить, и только потом там, где решение затрагивает права граждан и бюджет.

Среднесрочный горизонт: три — пять лет

В ближайшие годы ИИ-помощник станет привычной частью рабочего места госслужащего: он позволит проводить поиск по внутренним базам знаний, подготавливать проектные и нормативные документы, разбирать и классифицировать обращения. А на смену разрозненным ведомственным экспериментам придут общие защищенные среды. Проактивных услуг станет больше, а отдельные системы начнут сопоставлять данные нескольких ведомств и самостоятельно выполнять простые цепочки действий по заранее установленным правилам.

Одновременно изменится критерий успешного внедрения. В центре внимания окажется не доступ

к модели, а измеримый эффект: насколько сократился срок, повысилось качество, уменьшилось число ошибок и сколько времени сотрудники по-прежнему тратят на проверку результата. Роль служащего будет постепенно смещаться от первичной обработки информации к постановке задачи, оценке предложенного результата и работе с нестандартными ситуациями.

Долгосрочный горизонт

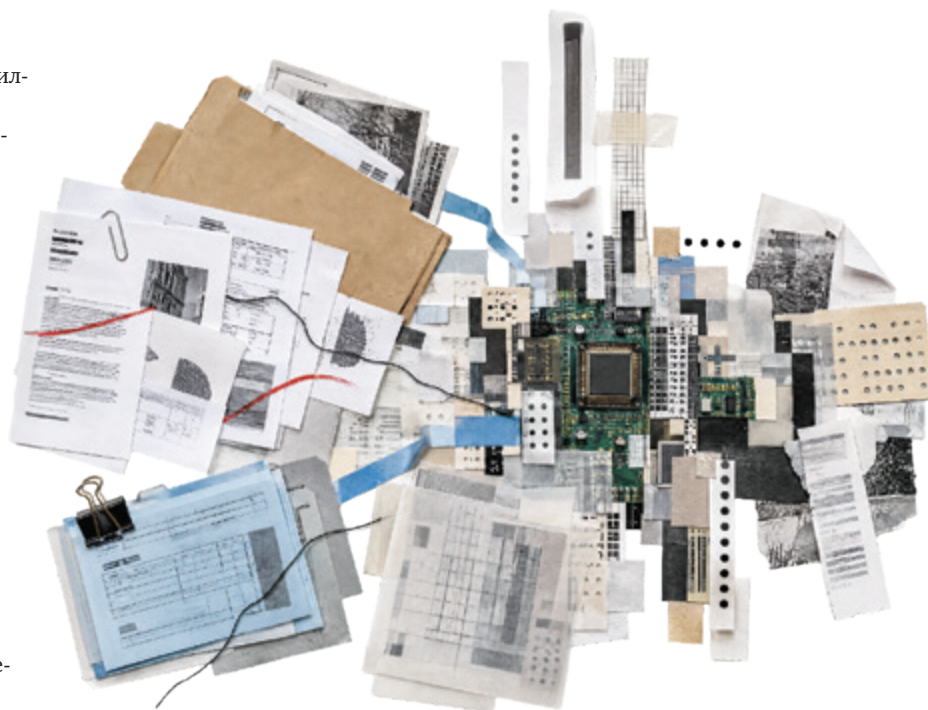
На более длинном горизонте государственное управление будет чаще начинаться не с обращения гражданина или уже произошедшей проблемы, а с автоматически зафиксированного события либо изменения сразу нескольких показателей. Система сможет раньше обнаружить отклонение, собрать сведения из нескольких источников и подготовить варианты действий. В результате часть межведомственных процессов станет запускаться не после заявления, а при появлении заранее определенного сигнала.

Это не означает переход к автономному государству. Цели, приоритеты, допустимый риск и решения, затрагивающие права граждан, останутся за человеком. Но управленец будет принимать решение в другой информационной среде: получать более ранний сигнал, видеть больше взаимосвязей и заранее оценивать возможные последствия типовых вариантов действий.

Для российских регионов главным различием станет не наличие собственной модели ИИ. Технологии будут постепенно стандартизироваться и становиться доступнее. Преимущество получают регионы, способные выбрать действительно значимую задачу, подготовить под нее данные, изменить порядок работы и быстро подтвердить или опровергнуть результат. Именно эта способность, а не число пилотов будет определять зрелость применения ИИ в государственном управлении.

От данных — к качеству решения

Цифровизация дала государству данные, цифровые каналы взаимодействия и вычислительную



инфраструктуру. ИИ добавляет новое качество: способность раньше замечать сложные сигналы, быстрее собирать доказательную основу и выполнять стандартные участки процесса. Но эта возможность становится управленческим результатом только тогда, когда технология соединена с полномочиями, измененным порядком работы, измерением эффекта и понятной ролью человека.

Для России наиболее реалистична модель, при которой федеральный уровень формирует общую технологическую среду и единые правила, а регионы и ведомства выбирают приоритетные задачи с учетом своей специфики и перестраивают под них конкретные процессы. Такой подход позволяет не создавать одну и ту же дорогую инфраструктуру в каждом регионе и одновременно сохранять возможность решать действительно важные для территории задачи.

Цифровое государство отвечает быстрее, а зрелое ИИ-государство раньше замечает риски, лучше обосновывает решения и действует эффективнее и точнее.

¹ Григоренко Д. Большинство регионов России уже внедрили технологии искусственного интеллекта // Правительство России: сайт. — 20.02.2026.

² Григоренко Д. Правительство внедрило искусственный интеллект в систему управления нацпроектами // Президентская академия: сайт. — 11.09.2025.

³ Ground-breaking use of AI saves taxpayers' money and delivers greater government efficiency // UK government. — 16.10.2025.

⁴ Adopting and governing AI in government // OECD: Digital Government Outlook 2026: From Foundations to Transformational Impact. — 15.06.2026.

⁵ Launch of Large-Scale Pilot Project of Government AI "GENNAI" targeting 180,000 Employees // Digital Agency. — Japan. — 06.03.2026 (Last Updated: 13.03.2026).

⁶ Microsoft 365 Copilot Experiment: Cross-Government Findings Report // UK government. — 02.06.2025.

⁷ An Evaluation of DWP's Microsoft 365 Copilot Trial // UK government. — 29.01.2026.

⁸ Algorithmic Impact Assessment tool // Government of Canada. — Last Update 28.05.2026.

⁹ Платформа «ГосТех» // Минцифры России: сайт. — Дата обращения: 03.08.2026.

¹⁰ По совету цифрового ассистента: как ИИ-технологии упростили доступ к городским услугам и сервисам // Правительство Москвы: сайт. — 13.03.2026.

Научный пульс трех городов

Хроники фестивалей «КСТАТИ» от сети ИЦАЭ



Фестиваль науки «КСТАТИ» — флагманский проект сети Информационных центров по атомной энергии, который предлагает взглянуть на одну большую научную тему с разных сторон и соединяет лекции, мастер-классы, научно-популярные шоу, интеллектуальные игры и творческие форматы. Сегодня расскажем о первых фестивалях 2026 года, уже прошедших в сети ИЦАЭ. Темы, форматы и представленные спикеры различались, но объединило все три фестиваля то, что ни один из них не обошел стороной вопросы медицины.

В ритме сердца: фестиваль науки «КСТАТИ» в Обнинске

В конце августа наукоград Обнинск на два дня превратился в средоточие медицинского просвещения. Фестиваль науки «КСТАТИ», состоявшийся 22–23 августа на базе Информационного центра по атомной энергии (ИЦАЭ), был целиком посвящен медицине — от атомов внутри нас до создания новых органов с нуля. Остановимся на самых необычных форматах, которые были представлены зрителям.

В первый день фестиваля особое внимание посетителей ИЦАЭ вызвало научно-музыкальное шоу «Science Sound: в ритме сердца», в котором работа сердца

стала основой для разговора и музыкального эксперимента. «Когда задумывалось это шоу, мы не представляли, что оно вызовет такой отклик у зрителей. Многие потом подходили и говорили, что не просто посмотрели выступление спикеров, а на самом деле прониклись, потому что музыка помогла эмоционально включиться в тему. Музыка передавала изменения сердечного ритма: спокойное звучание постепенно переходило в учащенный темп, а затем — в более хаотичную музыкальную структуру, помогая участникам почувствовать разницу между нормой и опасными нарушениями», — рассказал руководитель ИЦАЭ Обнинска Роман Макаров.

Вместе со зрителями Алексей Утин, кардиолог, сердечно-сосудистый хирург, кандидат медицинских наук, автор и ведущий проекта «Доктор Утин», разобрал, как работает сердце в норме и почему его ритм может меняться. Участники узнали, чем тахикардия отличается от брадикардии, что такое экстрасистола и почему само по себе ощущение сильного сердцебиения еще не говорит об опасности нарушения ритма.

Разговор продолжился темой мерцательной аритмии и ее возможных последствий. Эксперт объяснил, почему при этом нарушении особенно важно учитывать риск образования тромбов и почему восстановление ритма требует медицинского контроля. В завершение разобрали, что делать в экстренной ситуации, если человек потерял сознание и не дышит: как оценить опасность, вызвать скорую помощь, начать сердечно-легочную реанимацию и использовать автоматический наружный дефибриллятор.

Кульминацией второго дня и всего фестиваля стала Science Drama — музыкально-театральная постановка «Немного (не) идеален», созданная на стыке науки и искусства.

По сюжету группа ученых получает непростую задачу: за ограниченное время создать и представить комиссии «идеального человека». Но созданный прототип оказывается совершенно не готов к жизни среди людей. Теперь ученым предстоит в ускоренном режиме научить его тому, что невозможно свести к инструкции: общению, отношениям, работе, любви и простым человеческим правилам. Спектакль предложил зрителям по-новому взглянуть на вопрос о том, что делает человека человеком и можно ли вообще создать идеального человека по заданным параметрам. Режиссером-постановщиком и автором сценария выступил Никита Иванов.

«Мы живем в эпоху развития искусственного интеллекта, и было интересно углубиться в эту тему: можно ли вообще создать идеального человека. У каждого из нас есть свои изъяны, свои проблемные моменты, какие-то комплексы. Но получается, что благодаря как раз этой нашей неидеальности мы и являемся людьми», — рассказал Никита Иванов. — Если бы мы все были идеальными, мир был бы совершенно другим: мы бы не совершали тех ошибок,

Роман Макаров, руководитель ИЦАЭ Обнинска: «Лекции врачей собирали полные залы — люди приходили закрывать свои внутренние потребности, ведь консультацию хорошего специалиста сегодня «поймать» не просто. А сеть ИЦАЭ уже стала своего рода знаком качества: зрители знали, что услышат проверенную информацию от настоящих экспертов».

которые совершаем, не говорили тех слов, которые говорим, порой самых страшных, плохих, но тем не менее именно это делает нас настоящими, живыми людьми. Мы не идеальны, но мы можем исправлять свои ошибки».

Интересно, что в роли актеров выступили действующие ученые. В постановке приняли участие Дмитрий Чермошенцев (кандидат физико-математических наук, руководитель научной группы в «Росатом Квантовые технологии»), Максим Вялков (сотрудник Национального центра физики и математики, аспирант МГУ Саров, исследователь нейтрино, победитель в категории «Наука и технологии» рейтинга Forbes «30 до 30» 2025 года), Егор Плахотнюк (руководитель проекта «Биофабрикация» АО «НИИТФА»), Александр Петров (руководитель пресс-службы Проектного центра ИТЭР госкорпорации «Росатом»), Алина Бегимова (физик-ядерщик, стипендиатка программы стипендий МАГАТЭ им. Марии Склодовской-Кюри, амбассадор российского ядерного образования), Александр Иванов (ведущий передачи «Химия» на телеканале «Наука 2.0», автор проекта «Химия — просто» и одноименной книги, ведущий инженер Физико-технологического института Уральского федерального университета им. Б. Н. Ельцина).

Режиссер спектакля Никита Иванов поделился своим мнением о специфике проекта и взаимодействии с учеными: «Для меня это первый опыт работы с сотрудниками атомной отрасли. Волнение было, но хочу выразить огромную благодарность Информационному центру по атомной энергии Обнинска за максимальную помощь во всех возможных деталях организации и реализации постановки. Когда ты работаешь с актерами, им достаточно поставить актерскую задачу, объяснить основные цели, которых нужно достичь, и можно совершенно спокойно работать. Здесь же было волнение, репетиций было очень мало из-за занятости ученых. Но я не ожидал, что участники настолько влюбятся в свои роли и начнут получать огромное удовольствие от театрального процесса».

Никита Иванов признался, что репетиции проходили в шуточной форме и столько импровизации он никогда не встречал. Но результат превзошел его ожидания: «Зрители высоко оценили постановку, а это самое главное для нас, режиссеров».

«Зрители, действительно, активно поддерживали артистов, эмоционально реагировали на происходящее на сцене и не раз отвечали героям постановки аплодисментами, — поделился руководитель ИЦАЭ Обнинска Роман Макаров. — И Science Drama стала не просто завершением программы, а по-настоящему ярким финальным событием всего фестиваля, объединившим научную повестку «КСТАТИ» с театром, музыкой и живым взаимодействием с публикой».

Научная волна на фестивале в Ульяновске

Фестиваль науки объединил два волжских города — Димитровград и Ульяновск — 28–29 августа, превратив их в единый центр научного праздника с общей темой «Волна». ИЦАЭ Ульяновска постарался, чтобы это было не просто словом из учебника физики, а живым символом фестиваля: волна как энергия будущего, как ритм жизни и как основа искусства.

Одним из самых зрелищных стало ток-шоу «Разберем на атомы». Разговор о волнах собрал сразу троих ученых из разных областей знаний. Эксперт по научным разработкам научного института «Росатома» в Димитровграде Сергей Погляд рассказал о волновых явлениях с точки зрения физики, уделив особое внимание двойственной природе света. Лектор напомнил о знаменитом споре Альберта Эйнштейна и Нильса Бора о том, можно ли одновременно наблюдать волновые и корпускулярные свойства света.

Далее музыковед Татьяна Васёва объяснила, почему звуки одной высоты могут звучать совершенно

по-разному и какую роль в этом играют форма волны и обертоны. Отдельно эксперт обратилась к истории музыки. «В Древней Греции ее не отделяли от точных наук — музыка входила в число математических дисциплин наряду с арифметикой, геометрией и астрономией», — напомнила она зрителям.

Волну с медицинской точки зрения разобрал врач-невролог Валерий Губанов. Он рассказал о ритмических процессах в организме человека, в том числе об эффекте Доплера, который в медицине используют для доплерографии. Это исследование показывает, как быстро и в каком направлении течет кровь в сосудах, и помогает находить сужения, тромбы и оценивать проходимость сосудов. «Работает это так: датчик посылает в ткани ультразвук, волна отражается от движущихся эритроцитов, и если кровь течет к датчику, частота отраженной волны растет, если от него, то падает. По величине этого сдвига аппарат и вычисляет скорость кровотока», — пояснил эксперт.

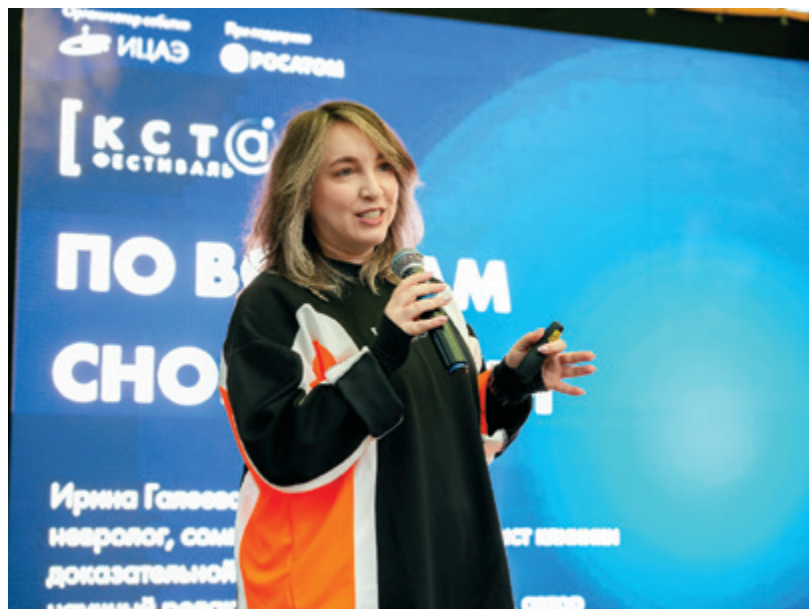
В Ульяновске тоже решили соединить медицину и музыку. Финальным аккордом фестиваля стало научно-музыкальное ток-шоу Science Sound с участием врача-невролога и сомнолога Ирины Галеевой. Она рассказала, зачем человеку нужен сон, почему мы видим сновидения и на каких стадиях сна они возникают.

Ирина Галеева развеяла миф о том, что всем нужно спать по 8 часов, так как норма сна очень индивидуальна: например, премьер-министр Великобритании Маргарет Тэтчер спала всего 4 часа в сутки, как и изобретатель Томас Эдисон.

Лекцию дополнила живая музыка: партии саксофона исполнил артист Ульяновской филармонии Алексей Кулик.

От рентгеновского снимка до квантового сканера: фестиваль науки в Саратове

Фестиваль науки «КСТАТИ: Волга» в Саратове, который прошел 5–6 сентября, объединил экологов, биологов, атомщиков и даже экспертов по комиксам. Два дня — два маршрута по самой большой реке страны с самыми разными темами: от глобальных угроз ее экосистеме до тайн морских гигантов и мифов о радиационной безопасности. Например, полезным зрителям нашли ток-шоу «Научные страшилки: Волга», где ученые разобрали самые популярные мифы об экологии реки, животных и качестве воды. А самым необычным мероприятием зрители чаще всего называли иммерсивное ток-шоу «Суд над супергероем: Аквамен», в ходе которого зрители и эксперты попытались проверить способности Артура Карри через призму физики, биологии и термодинамики. Эксперты разбирали каждый фантастический трюк героя, превращая комикс в увлекательный урок естественных наук. Это не первый фестиваль науки «КСТАТИ» в Саратове, но, как призналась руководитель ИЦАЭ Мария Букина, такого количества



форматов и экспертов саратовский информцентр еще не собирал.

Тему медицины, близкую каждому человеку, затронули и на этом фестивале. О важности «видеть больше, чем обычный человеческий глаз», рассказал Андрей Рытик, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской физики СГУ, программный директор центра «Точка кипения СГУ». На лекции «Просвечивая человека: от рентгеновского снимка до квантового сканера» слушатели узнали, как современные методы диагностики позволяют заглянуть внутрь человеческого тела без вреда для здоровья.

«Человек воспринимает лишь узкий спектр света, называемый видимым излучением. Но смотреть на мир через самый широкий спектр излучений человеку помогает техника, без которой сегодняшняя медицина немыслима. Современные приборы позволяют видеть структуру объектов вплоть до атомарного уровня, используя разные диапазоны излучения», — пояснил эксперт.

Рентген используется для диагностики костей, легких, новообразований, но вреден из-за ионизирующего излучения. Флюорография — это скрининговая диагностика легких и других органов грудной клетки с помощью рентгеновского излучения меньшего разрешения. Она, кстати, часто анализируется искусственным интеллектом.

Магнитно-резонансная томография (МРТ) безопасна, позволяет получать объемные изображения без вреда здоровью. Работу МРТ спикер объяснил так: «Нам нужно создать сильное магнитное поле — в 10 тыс. раз сильнее поля Земли! Атомы внутри нас начинают вращаться упорядоченно, а радиочастотный импульс заставляет их «качнуться». Затем они восстанавливают свое положение и испускают ответный сигнал, по которому мы понимаем, где какой атом находится».

«Будущее медицины — за персонализированным подходом и развитием низкопольных томографов, которые сделают диагностику доступной даже в отдаленных регионах. Искусственный интеллект помогает анализировать огромные массивы данных, выявлять онкологию и подбирать лечение индивидуально», — резюмировал Андрей Рытик.

Интересно, что значительный интерес лекция вызвала у будущих врачей, большую часть вопросов эксперту из зала задали именно студенты-медики.

Почему медицина оказалась такой важной темой?

По словам Марии Букиной, руководителя ИЦАЭ Саратова, организаторы фестивалей намеренно включали врачей в программу. «Медицина — это то, с чем сталкивается каждый человек ежедневно, сознательно или нет, — пояснила она. — Физика или



химия кажутся высокими материями, факты из астрономии или биологии, например, не всем интересны. Но вопрос «как я могу себе помочь?» или «какому специалисту доверить свое здоровье?» волнует каждого здесь и сейчас. И так получается, что медицина — это про всех и про каждого, про нас с вами».

«Лекции врачей собирали полные залы — люди приходили закрывать свои внутренние потребности, ведь консультацию хорошего специалиста сегодня «поймать» непросто, — продолжил тему руководитель обнинского ИЦАЭ Роман Макаров. — А сеть ИЦАЭ уже стала своего рода знаком качества: зрители знали, что услышат проверенную информацию от настоящих экспертов».

«Главная идея таких выступлений — научить сомневаться и искать научную основу у любого совета. К примеру, если блогер советует считать овечек перед сном, важно понимать, является ли это фактом доказательной медицины. Без понимания научных основ любые рекомендации теряют смысл», — подвела итог Ольга Мартыненко, руководитель ИЦАЭ Ульяновска.

Фестивали науки «КСТАТИ» в Обнинске, Ульяновске и Саратове завершились, но послевкусие останется с участниками и после окончания программы. Пусть не на очень долгое время, но наука для жителей этих городов стала частью повседневной жизни: обсуждали через мемы, исследовали на примере технологий будущего и соединяли с театром и музыкой. Фестивали показали, что научный разговор может быть одновременно серьезным, понятным и увлекательным.

Фото: АСЭ

Площадка строительства АЭС «Тяньвань» (Китай). В октябре 2026 года на энергоблоке №7 начался энергопуск



Атомная мозаика

4 ГВт·ч в год

мощность второй гигафабрики «Росатома» по производству литийионных накопителей энергии для электротранспорта и стационарных энергосистем, ввод в промышленную эксплуатацию которой состоялся 6 октября на территории Новой Москвы. Предприятие стало частью первого в стране роботизированного кластера по производству электробатарей. В церемонии открытия кластера приняли участие президент РФ Владимир Путин (в режиме видеоконференции), генеральный директор госкорпорации «Росатом» Алексей Лихачев, мэр Москвы Сергей Собянин, министр промышленности и торговли РФ Антон Алиханов и другие.

«В любой своей работе «Росатом» придерживается принципа создания полной производственной цепочки и замкнутого сырьевого цикла. В области систем накопления энергии мы формируем вертикальную интеграцию, от добычи литиевого сырья до переработки батарей. Так же системно мы подходим к развитию смежной отрасли — электромобильности. Помимо батарей для разных производителей электротранспорта, мы уже поставляем первые интегрированные электроприводы российского производства для автомобиля «Атом», одновременно развиваем электрозарядную инфраструктуру, в том числе с применением накопителей энергии», — отметил Алексей Лихачев.

11 месяцев

при плановом сроке 18 месяцев госкорпорация «Росатом» совместно с Министерством чрезвычайных ситуаций Киргизской Республики досрочно завершила работы по реабилитации горных отвалов в поселках Тоо-Моюн (Ошская область) и Кызыл-Жар (Джалал-Абадская область). Получены государственные акты о вводе объектов в эксплуатацию. Территории приведены в радиационно безопасное состояние.

«"Росатом" накопил большой опыт реализации самых сложных экологических проектов у нас в стране и уже применяет его за рубежом. Здесь важен последовательный подход: необходимо не только устранять существующие риски, но и обеспечивать долгосрочную безопасность территорий. Мы много лет сотрудничаем с Киргизской Республикой, и для нас важно, что результаты этого партнерства ощутимы для людей. Экологические проблемы не знают границ, поэтому решать их нужно сообща», — подчеркнул заместитель генерального директора госкорпорации «Росатом» по машиностроению и индустриальным решениям Андрей Никипелов.

>500 позиций

оборудования и материалов поставлено в рамках проекта повторного продления срока эксплуатации энергоблока №2 Армянской АЭС. Также обследован ряд зданий и сооружений общей площадью 15 890 м², разработаны и согласованы документы, подтверждающие безопасную эксплуатацию реакторной установки до 2031 года, модернизирована система безопасности — система обеспечения ответственных потребителей, реализуется программа контроля металла реакторной установки.

«"Росатомом" выполнен значительный объем работ по повышению безопасности и надежности станции, включая подтверждение безопасной эксплуатации реактора до 2031 года. На предстоящий год уже запланирован комплекс работ по усовершенствованию ключевых систем Армянской АЭС — в целях ее дальнейшей эффективной работы, вплоть до 2036 года», — сообщил генеральный директор АО «Росатом Сервис» Евгений Сальков.

