



ПРОРЫВ  
РОСАТОМ

# Энергосистемы 4 поколения: назначение и практическая значимость для энергетики

**А.А. Каширский**

Начальник аналитического отдела АО «Прорыв»

**РМЭФ-2025**

10.04.25

# Переход к IV поколению



ПРОРЫВ  
РОСАТОМ



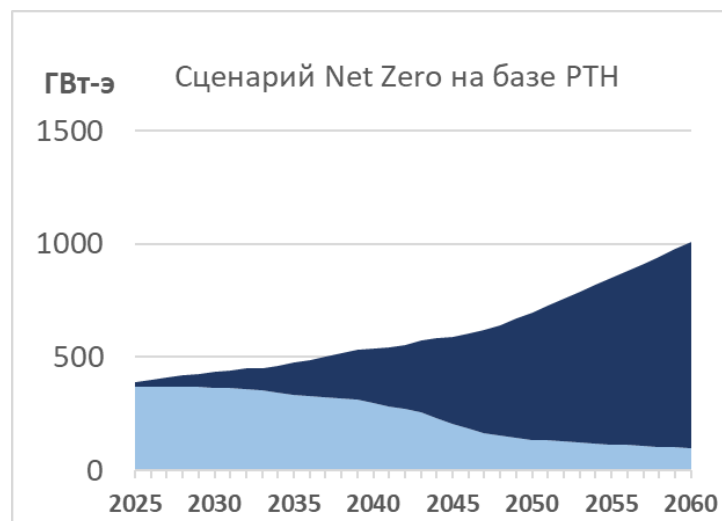
# Замкнутый ядерный топливный цикл двухкомпонентной ЯЭ



ПРОРЫВ  
РОСАТОМ

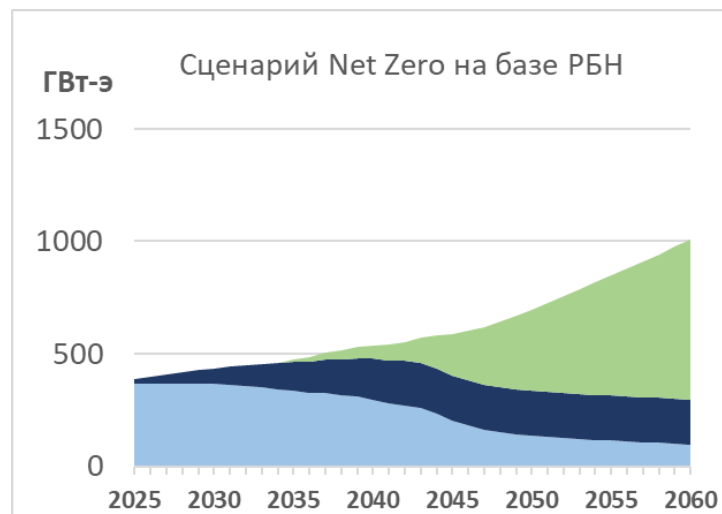


# Необходимость развития ЗЯТЦ в мире



- Новые РТН
- Действующие РТН

- Потребности в Упр на ЖЦ для блоков, введенных до 2060 г.: **8,3 млн т**
- Накопленное ОЯТ к 2060 г.: **732 000 т ТМ**

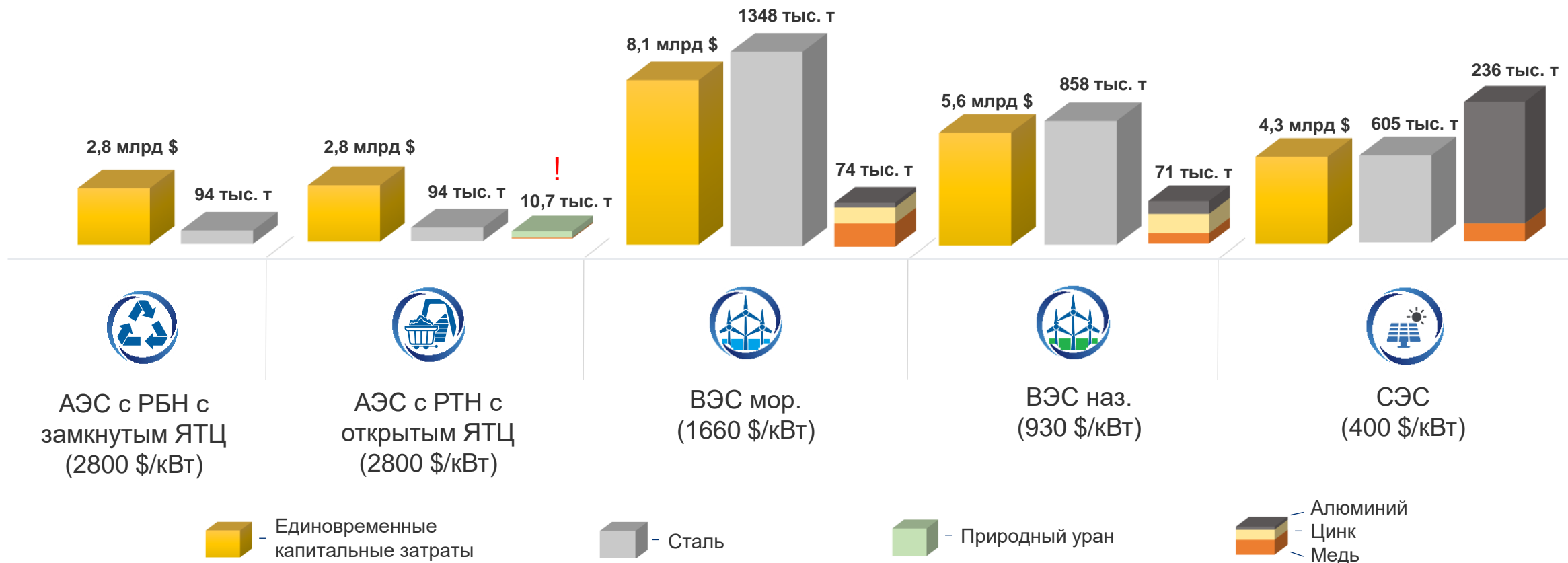


- Новые РТН
- Действующие РТН
- Новые РБН

- Потребности в Упр на ЖЦ для блоков, введенных до 2060 г.: **1,8 млн т**
- Накопленное ОЯТ к 2060 г.: **потенциал - 0 т ТМ** (зависит от подхода к замыканию ЯТЦ РБН)

# Системные преимущества ЯЭ нового поколения в рамках развития низкоуглеродной энергетики

Единовременные капитальные затраты и ресурсоемкость выбранных технологий генерации в эквиваленте 1 ГВт(э) АЭС за ЖЦ с учетом КИУМ и срока службы

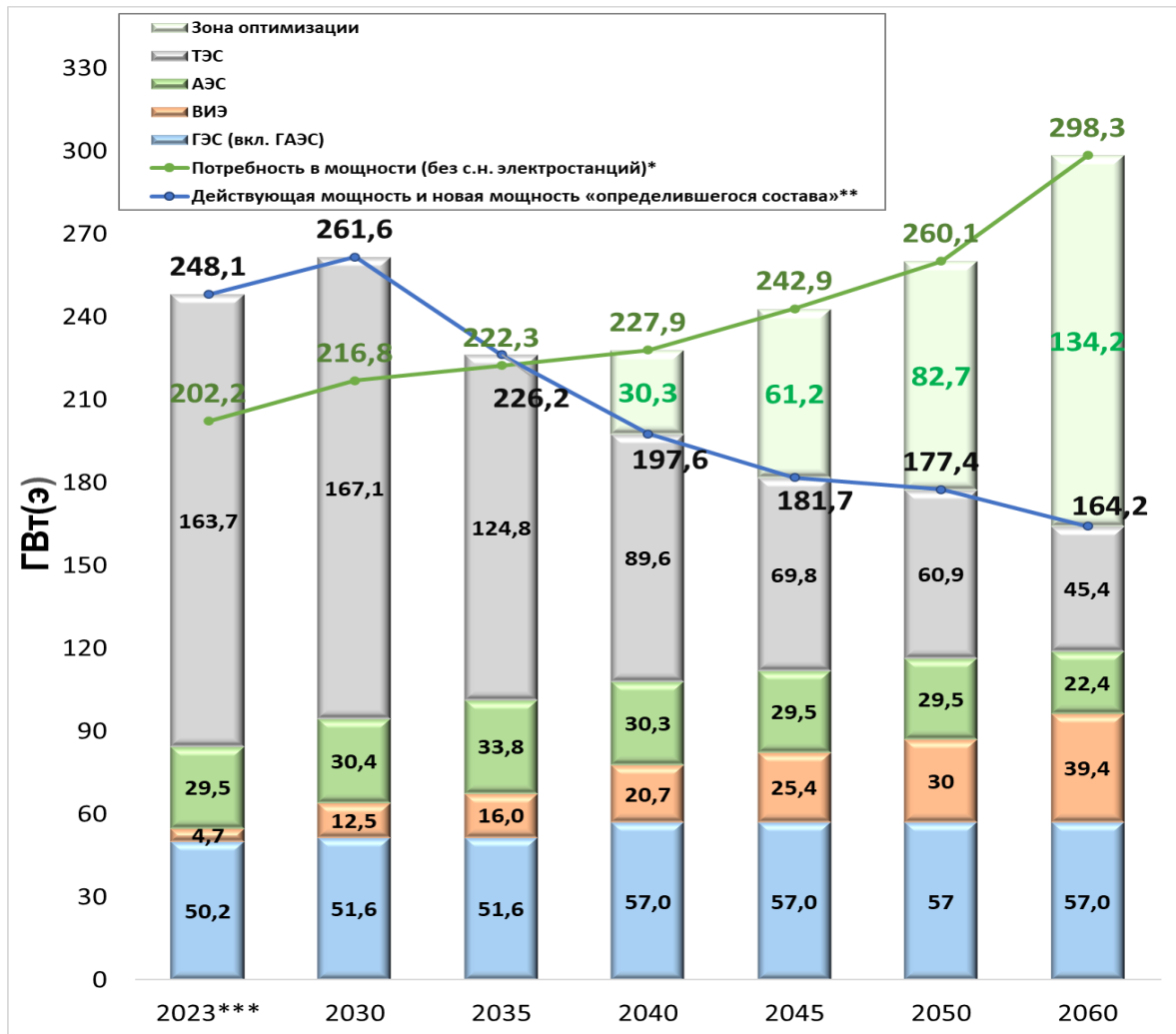


Удельные единовременные капзатраты приняты по данным World Energy Outlook 2024 для условий КНР на 2030 г.

Удельная материалоемкость генерирующих технологий принята по данным исследований Аналитического отдела АО «Прорыв» (IEA, IRENA, NRL и др.) 5



# Величина оптимизируемой в период до 2060 г. мощности электростанций ЕЭС России (ИНЭИ РАН, 2024 г.)



- Зона оптимизации определяется разностью между потребностью в генерирующей мощности и мощности «определившегося состава»
- До 2035 г. не требуются масштабные инвестиционные решения по новым мощностям, но с выбытием действующих блоков зона оптимизации появляется уже к 2040 году и значительно расширится: с 61,2 млн кВт в 2045 г. до 134,2 млн кВт в 2060 г., что составляет, соответственно, ~25% и ~45% от общей потребности в установленной мощности в ЕЭС России
- Помимо «традиционных» энерготехнологий в зоне оптимизации будут конкурировать технологии ВИЭ (ВЭС и СЭС с накопителями, повышающими гарантированность выдачи мощности), а также ТЭС, оборудованные системами улавливания диоксида углерода

\* без учета затрат на собственные нужды

\*\* мощность действующих электростанций, не достигающих предельного ресурса эксплуатации и не требующих принятия инвестиционных решений, а также уже реализуемых и принятых инвестиционных решений по развитию генерирующих мощностей на среднесрочную перспективу

\*\*\* по данным СО ЕЭС «Отчет о функционировании ЕЭС России в 2023 году»

# Опытно-демонстрационный энергокомплекс с пристанционным замкнутым ЯТЦ (г. Северск, АО «СХК»)



2024 г

Модуль фабрикации  
плотного топлива  
(МФР)

2028 г

АЭС с реактором  
БРЕСТ-ОД-300  
со свинцовым  
теплоносителем  
(БРЕСТ)

2030 г

Модуль переработки  
ОЯТ (МП)

# Реакторные технологии ЯЭС IV поколения



ПРОРЫВ  
РОСАТОМ



**БРЕСТ-ОД-300**

- Теплоноситель – свинец;
- Установленная мощность – 300 МВт(э);
- Практическая демонстрация работы технологий реакторов поколения IV и пристанционного замкнутого ЯТЦ.



**БН-1200М**

- Теплоноситель – натрий;
- Установленная мощность – 1250 МВт(э);
- Включает оптимизированные проектные решения для уменьшения площади размещения, строительных объемов и капзатрат;
- Коммерческий проект создания РБН IV поколения большой мощности с  $KB > 1$  на Белоярской АЭС.



**БР-1200**

- Теплоноситель – свинец;
- Установленная мощность – 1255 МВт(э);
- Технологическая поддержка режима нераспространения ЯО;
- Комплексное решение по воспроизводству топлива, дожиганию МА и соблюдению режима нераспространения в рамках создания ПЭК

# Замыкание ЯТЦ в рамках проектного направления «Прорыв»



ПРОРЫВ  
РОСАТОМ

Приоритет на безопасности  
без ущерба экономике

## Модуль фабрикаци/ рефабрикаци топлива

- Фабрикация U-Pu-MA топлива без использования U-235;
- Трансмутация минорных актинидов;
- Стартовое топливо и первые перегрузки на базе Pu из ОЯТ РТН;
- Возможность внедрения роботизированных производств;
- Запасов U-238 хватит на эксплуатацию РБН на тысячи лет.

U-238

U-Pu-MA  
топливо



## АЭС с РБН

- Исключение тяжелых реактивных и теплопроводных аварий;
- Конкурентоспособная генерация э/э;
- КВ ~ 1.

ОЯТ РБН

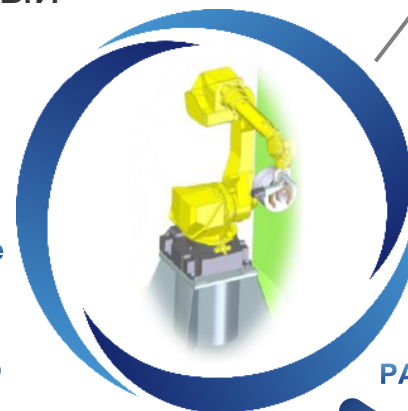
## Пристанционный ядерный топливный цикл

Регенерированные  
ядерные  
материалы

## Модуль переработки облученного ядерного топлива

- Прием «горячего» ОЯТ после короткого времени выдержки;
- Возможность внедрения роботизированных производств для снижения нагрузки на персонал;
- Поддержка режима нераспространения ЯО;
- Кардинальное снижение радиотоксичности РАО.

РАО



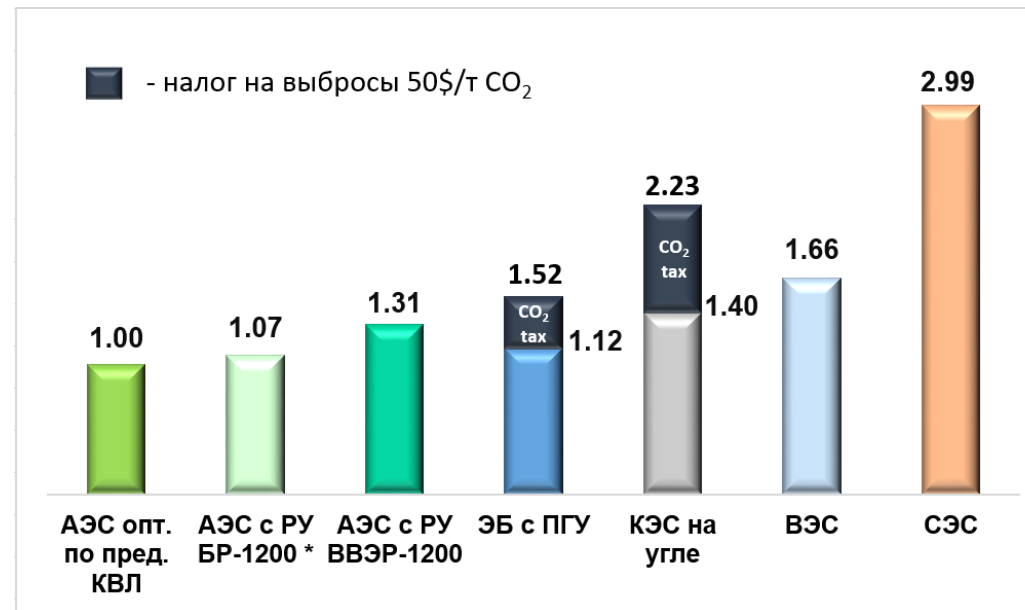
# Требования ПН «Прорыв» в части достижения экономической конкурентоспособности в России



## Экономика

- конкурентоспособная стоимость производимой электроэнергии на жизненном цикле по сравнению с другими крупными источниками энергии;

Levelized Cost of Electricity (LCOE), отн. ед.  
(реальная ставка дисконтирования 8%)



*Levelized Cost of Electricity – показатель приведенной стоимости электроэнергии, средняя расчётная стоимость производства электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла электростанции*

- ✓ **АЭС конкурентоспособны в сравнении с альтернативной генерацией** при достижении предельных КВЛ и ставках дисконтирования не более 8%, АЭС с РУ БР-1200 обладают существенным потенциалом повышения конкурентоспособности при серийном сооружении

\* по актуальным результатам разработки ТЭО ПЭК, будет уточнено по результатам разработки ОБИН

# Преимущество для всего ЯТЦ РФ



## Экономия природного урана

Увеличение РБН в энергобалансе снижает удельную потребность ЯЭС в природном уране на выработанную единицу энергии



## Решение проблемы ОЯТ

На базе РБН можно полностью утилизировать накопленные и накапливаемые запасы ОЯТ в России



## Самый эффективный рецикл продуктов переработки

Наиболее эффективно  $Pu$  используется в ЯТЦ РБН – без потери качества и количества делящихся материалов.

Регенерированный уран целесообразно использовать в РТН для еще большей экономии природного ресурса.

$Pu \rightarrow \text{РБН}$   
 $U_{рег} \rightarrow \text{РТН}$



## Снижение потенциальной биологической опасности РАО

Рецикл долгоживущих радионуклидов ( $Pu$ ,  $MA$ ) в ЯТЦ РБН.

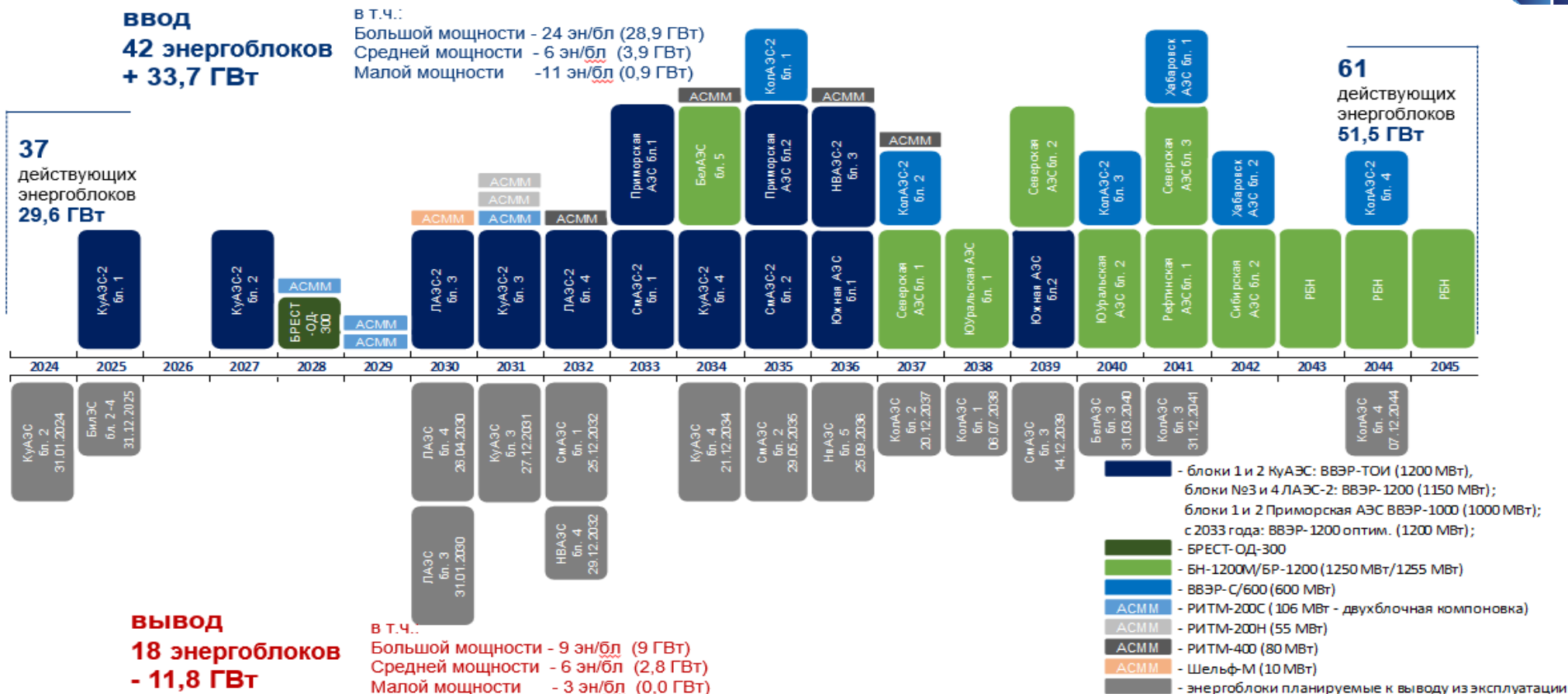
Потенциал для снижения требований, предъявляемых к пункту окончательной изоляции РАО.



# Сооружение АЭС в РФ до 2045 года



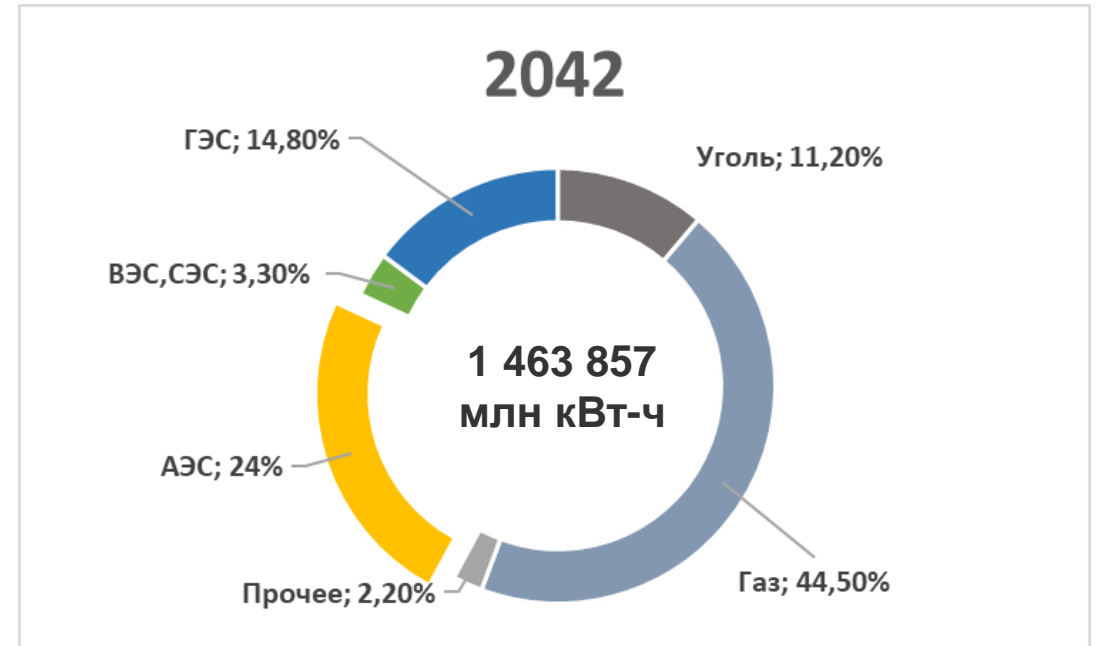
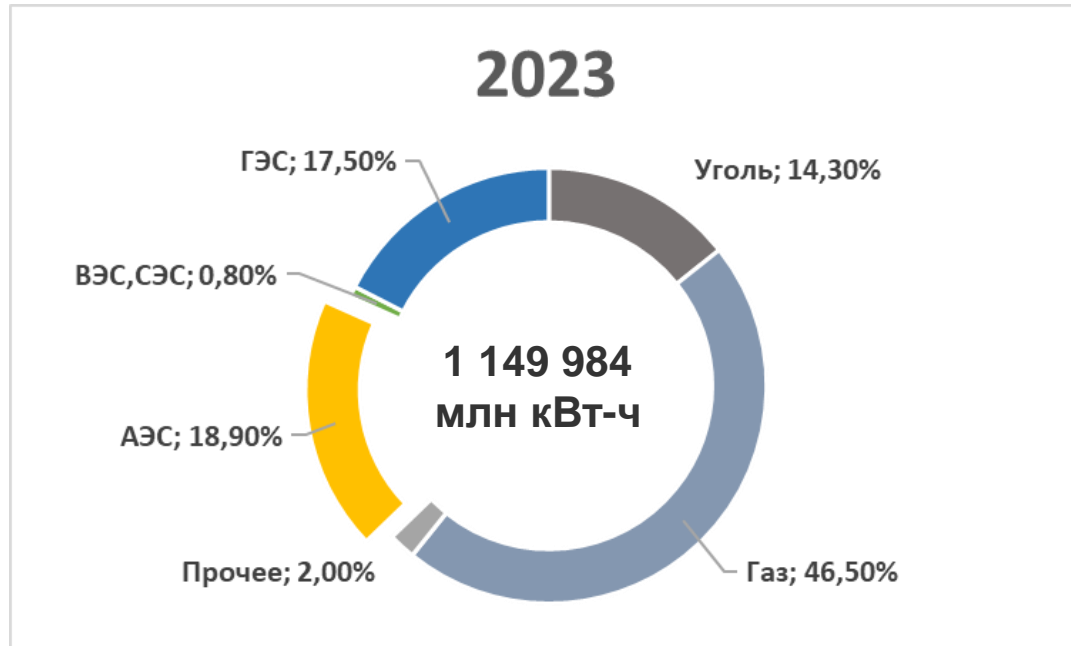
ПРОРЫВ  
РОСАТОМ



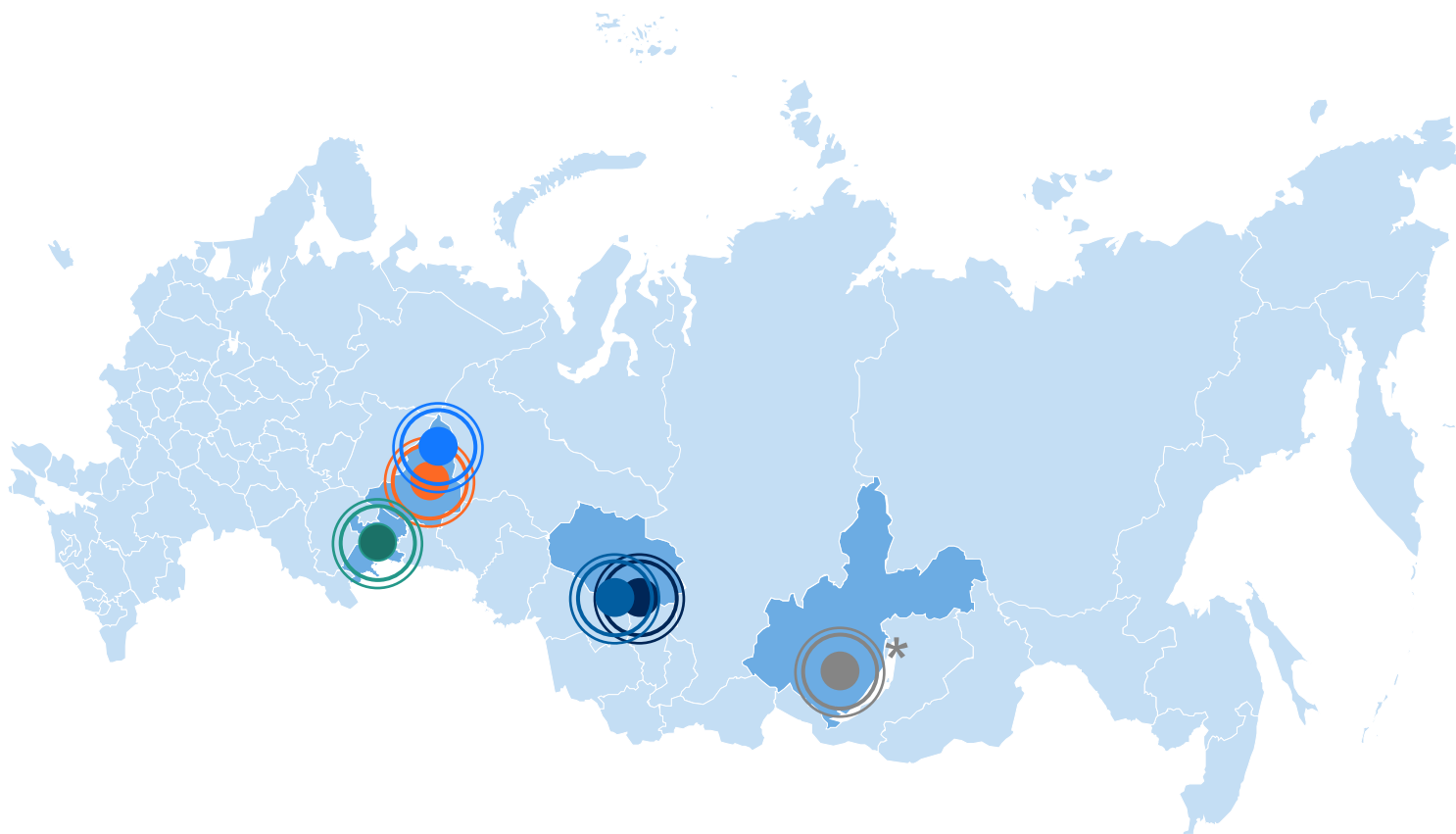
В соответствии с отраслевой Стратегией развития ядерной энергетики до 2050 и перспективой до 2100 года установлены следующие задачи:

- ✓ повышение эффективности атомной энергетики (повышение доли до 25% в энергобалансе страны);
- ✓ разработка и внедрение новой энергетической технологии в области атомной энергетики, предполагающей параллельную эксплуатацию реакторов на тепловых и быстрых нейтронах в целях обеспечения замкнутого ядерного топливного цикла.

# Вклад ЯЭ 2023-2042



# Размещение АЭС с РБН в рамках серийного тиражирования ПЭК в России до 2042 г.



Ключевые регионы – Урал и Сибирь

Девять энергоблоков с РБН до 2042 года

Данные приведены согласно доработанному проекту Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики до 2042 года по итогам общественного обсуждения

\* В рамках ОЭС Сибирь целесообразно рассмотреть реализацию четырехблочного исполнения АЭС ПЭК на площадке Северной АЭС

- Опытно-демонстрационный энергетический комплекс (ОДЭК) – 1 ЭБ 300 МВт(э)
- 5-ый энергоблок на Белоярской АЭС с БН-1200М – 1 ЭБ 1250 МВт(э)
- ПЭК в составе Северной АЭС с пристанционным ЯТЦ – 2 ЭБ по 1255 МВт(э)
- ПЭК в составе Южноуральской АЭС с пристанционным ЯТЦ – 2 ЭБ по 1255 МВт(э)
- ПЭК в составе Сибирской АЭС с пристанционным ЯТЦ – 2 ЭБ по 1255 МВт(э)\*
- ПЭК в составе Рефтинской АЭС с пристанционным ЯТЦ – 1 ЭБ 1255 МВт(э)

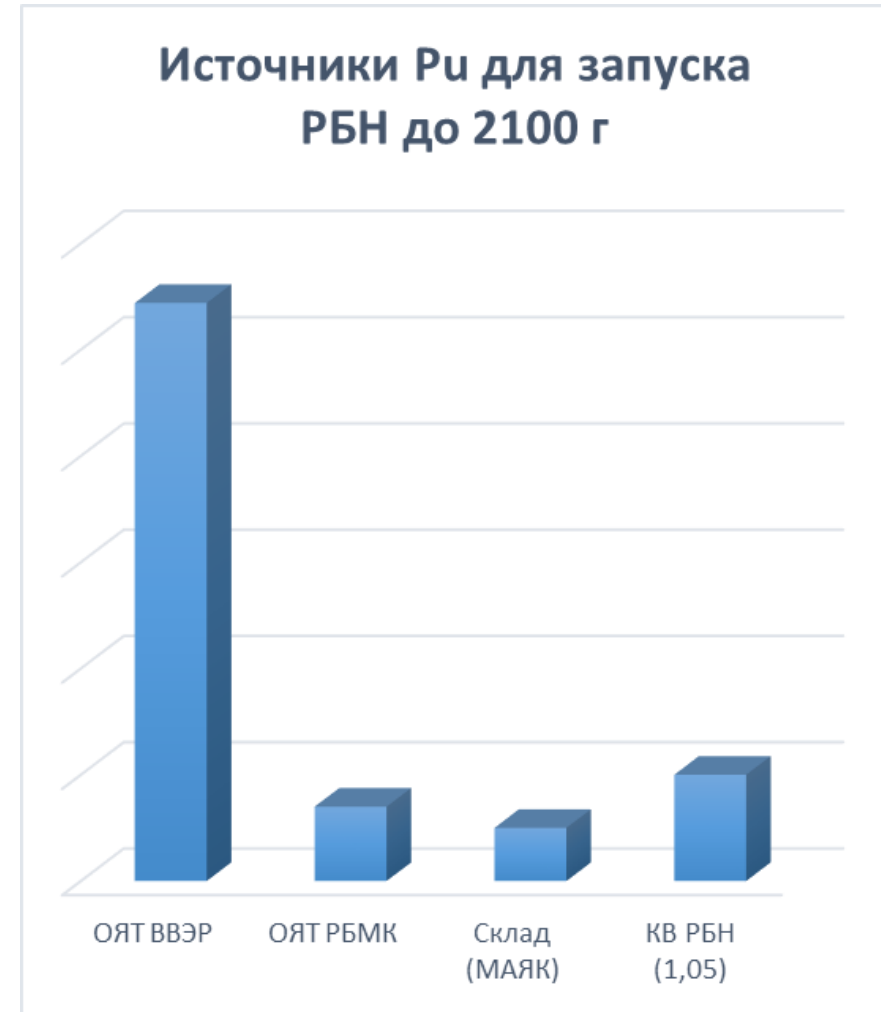
# Источники Р<sub>и</sub> для РБН



При достижении целевых параметров топливопотребления необходимость форсировать КВ РБН отсутствует (в условиях России).

Тем не менее, следует принимать во внимание следующие риски:

- Увеличение потребности во внешнем Р<sub>и</sub> на запуск РБН (скрап, потери, глубина выгорания, тип РУ, длительность ЯТЦ);
- Отложенное замыкание БН-800;
- Низкая концентрация Р<sub>и</sub> в ОЯТ;
- Низкое качество складского Р<sub>и</sub>.



# Экспортный сегмент



ПРОРЫВ  
РОСАТОМ

Госкорпорация «Росатом»  
занимает:

**1** место в мире по объему  
обогащения урана;

**1** место в мире по количеству  
сооружаемых энергоблоков за  
рубежом;

**1** место в мире по опыту  
эксплуатации реакторов на  
быстрых нейтронах;



Текущие ключевые рынки:



Обогащение



Строительство  
АЭС



Фабрикация  
топлива

Перспективные рынки:



Переработка ОЯТ



Обращение с РАО

## Искусственный интеллект

- Оптимизация эксплуатации ОИАЭ, новые методы предиктивной аналитики для повышения безопасности и экономичности;
- Кратное сокращение сроков и повышение качества проектирования АЭС.

## Роботизация

- Работа в условиях, представляющих опасность для человека (высокий уровень радиации, экстремальные температуры);
- Использование роботизации для сокращения сроков и стоимости строительства ОИАЭ.

## Новые материалы

- Создание жаропрочных, радиационно-стойких, устойчивых к агрессивному химическому воздействию конструкционных и смазочных материалов, покрытий, а также компонентов электронной техники, позволяющих уравнивать теплотехнические параметры обычной и ядерной энергетики

## Новые подходы к переработке ОЯТ и рецикла ЯМ

- Инновационные технологии переработки ОЯТ, принципиально отличающиеся от традиционных подходов в радиохимии;
- Аналитические методы он-лайн контроля для повышения эффективности переработки ОЯТ и уменьшения отходов (включая вторичные), направляемых на окончательную изоляцию

## Высокопроизводительное моделирование

- Качественный переход от длительных и дорогостоящих экспериментов к расчетному моделированию, обладающему достаточной предсказательной силой на широком спектре задач.

## Когенерация

- Устранение технологических, экономических и институциональных барьеров использования тепла, получаемого в инновационных реакторах:
  - в теплоснабжении;
  - в металлургии;
  - для производства водорода, метанола и аммиака;
  - для опреснения воды.

# Ключевые выводы

- Спрос на ЯЭ напрямую обуславливается ресурсными, экологическими и климатическими ограничениями текущей энергетической структуры;
- Спрос на РБН и ЗЯТЦ зависит от масштаба национальной ядерной программы и желания стран уйти от ресурсно-зависимой энергетики;
- Для России переход на РБН и ЗЯТЦ также открывает возможности для создания уникальных продуктов и услуг для мировой ЯЭ;
- Эффективность ЗЯТЦ РБН повышается с увеличением глубины выгорания топлива и сокращением длительности внешнего ЯТЦ;
- Совокупный системный эффект от повышения доли РБН в энергобалансе обуславливает их развитие опережающими темпами.

**Спасибо за  
внимание!**

**Каширский Андрей Александрович**

[AnAKashirsky@rosatom.ru](mailto:AnAKashirsky@rosatom.ru)