



80 лет атомной промышленности России

# Исследование сценариев развития атомно-водородной энергетики в России

На примере локальных  
энергосистем, ЕЭС и ТЭК страны

# Выполненные работы по атомно-водородной тематике

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ ИМ. Л.А. МЕЛЕНТЬЕВА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИСЭМ СО РАН)**

УДК 621.311:[620.91+621.039+662.769.2]

УТВЕРЖДАЮ  
Заместитель директора ИСЭМ СО РАН,  
д-р техн. наук  
  
С.М. Сендеров  
М.П. ИСЭМ СО РАН  
01 ноября 2022 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:  
РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ И ИССЛЕДОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ  
ИМПЛЕМЕНТАЦИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ И АТОМНО-ВОДОРОДНОЙ  
ЭНЕРГЕТИКИ В ЛОКАЛЬНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ  
С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ  
(Этап 4)

Руководитель НИР

Директор ИСЭМ СО РАН,  
академик РАН

  
01.11.2022  
подпись, дата  
В.А. Стенников

Ответственный исполнитель  
НИР

Заместитель директора  
ИСЭМ СО РАН, д-р техн.  
наук

  
01.11.2022  
подпись, дата  
С.В. Подковальников

Иркутск 2022 г.

## Работа выполнялась

- в 2021-2022 гг.
- в 4 этапа
- по договору с ОИВТ РАН (ИВТАН)

## Участвовали

- ИСЭМ СО РАН:  
отд. 30, 40, 60, 70
- ИФТПС СО РАН:  
отд. 60

## Выпущено

- 4 отчёта
- общий объём 353 стр.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ ИМ. Л.А. МЕЛЕНТЬЕВА  
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИСЭМ СО РАН)**

УДК 620.91+621.039+662.769.2

УТВЕРЖДАЮ

  
Заместитель директора ИСЭМ СО РАН,  
Академик РАН В.А. Стенников  
М.П. ИСЭМ СО РАН  
22 июля 2024 г.

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

РАЗРАБОТКА ВОЗМОЖНЫХ ВАРИАНТОВ РАЗВИТИЯ АТОМНО-  
ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИИ С УЧЁТОМ КОНЦЕПЦИИ  
РАЗВИТИЯ ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ В РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ, УТВЕРЖДЕННОЙ РАСПОРЯЖЕНИЕМ ПРАВИТЕЛЬСТВА  
РФ ОТ 05.08.2021 № 2162-Р, И С УЧЕТОМ ТЕНДЕНЦИЙ РАЗВИТИЯ ДО  
2100 ГОДА  
(ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЙ, ЭТАП 3)

Руководитель НИР:

Заместитель директора  
ИСЭМ СО РАН, д-р техн.  
наук

  
22.07.2024  
подпись, дата  
С.В. Подковальников

Ответственный исполнитель  
НИР  
Ст. науч. сотр., канд. техн.  
наук

  
22.07.2024  
подпись, дата  
О.В. Марченко

Иркутск 2024

1

## Работа выполнялась

- в 2023-2024 гг.
- в 3 этапа
- по договору с ГНЦ  
РФ – Физико-  
энергетический  
институт им. А.И.  
Лейпунского

## Участвовали

- ИСЭМ СО РАН:  
отд. 40, 60, 70

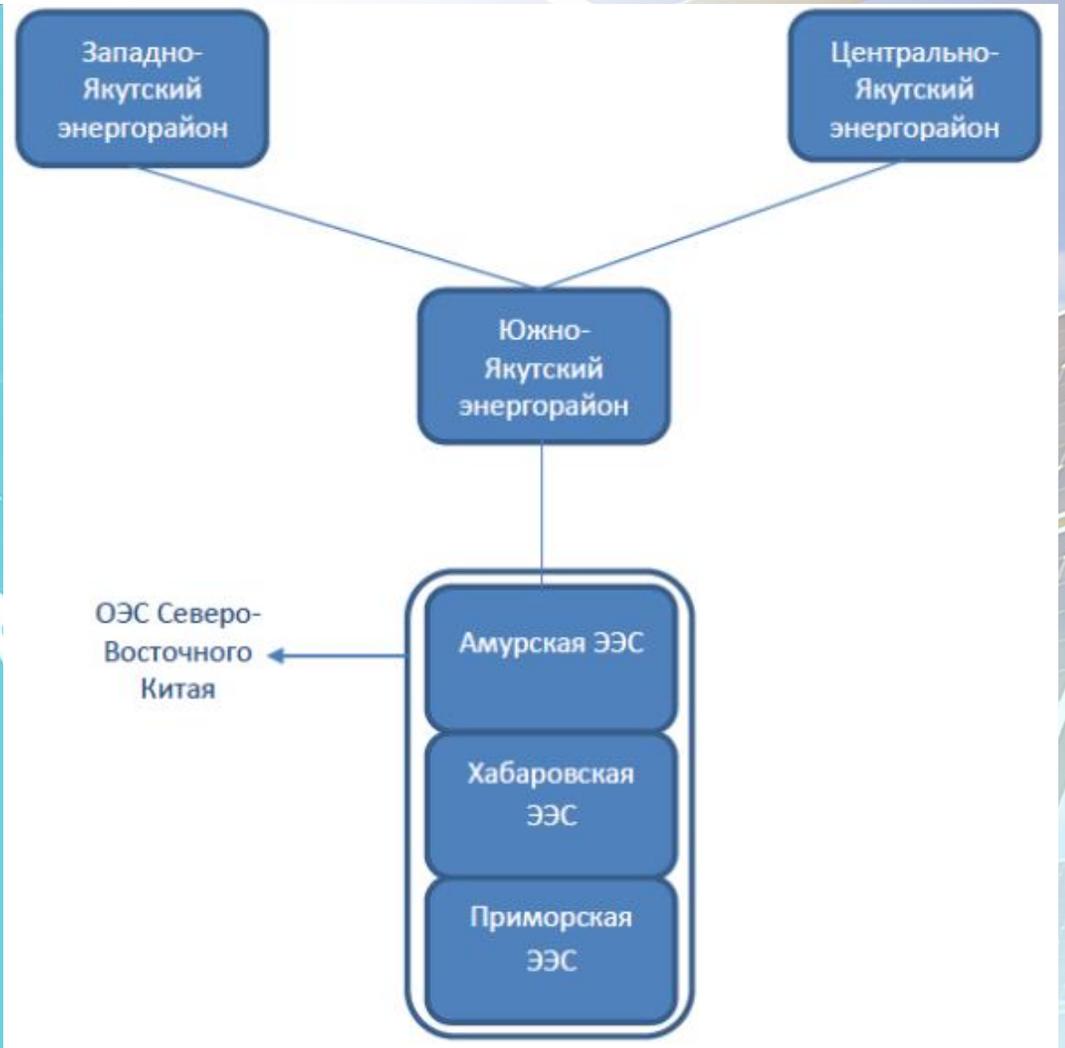
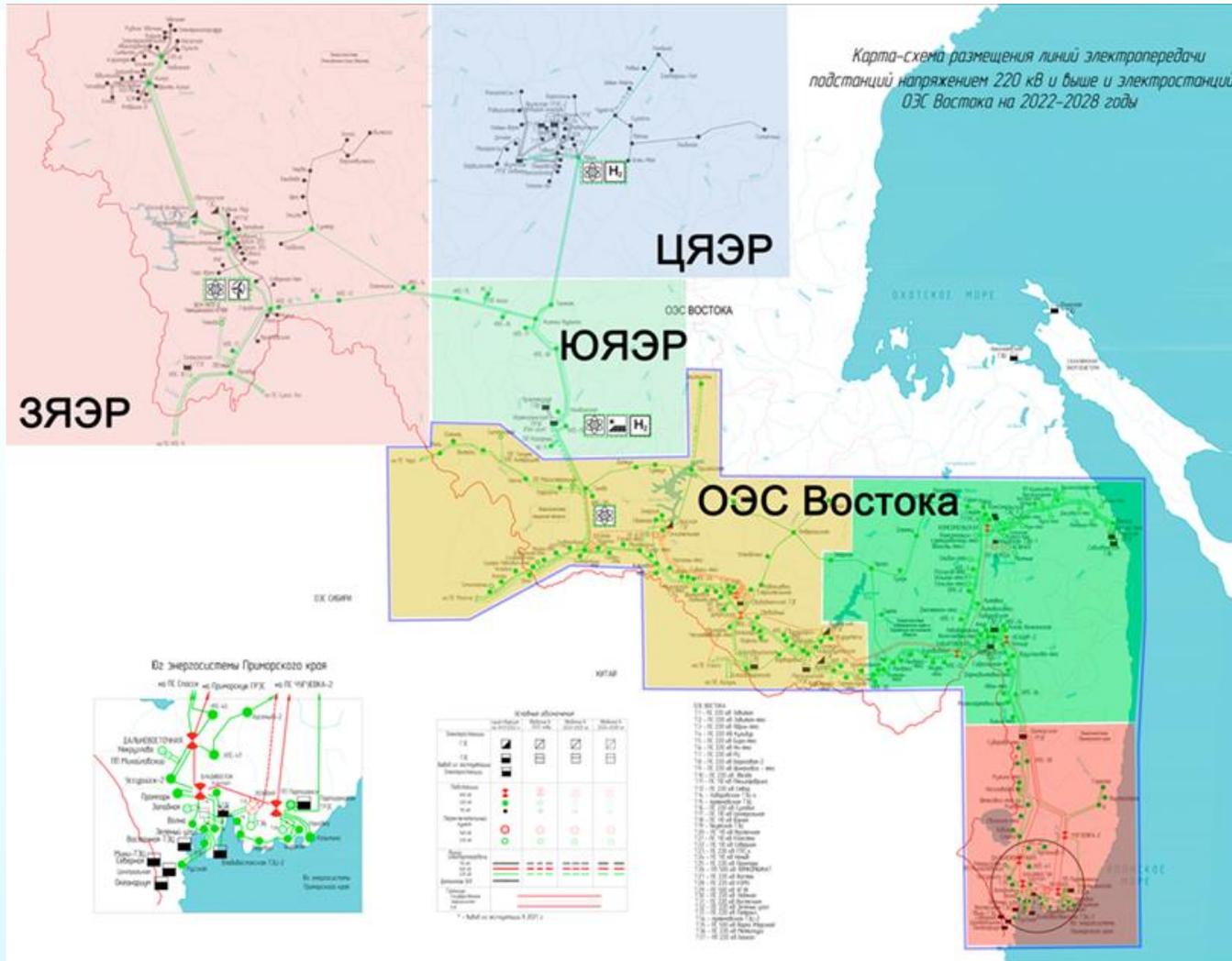
## Выпущено

- 3 отчёта
- общий объём 356 стр.

# I. Имплементация атомно-водородной и возобновляемой энергетики в локальные энергосистемы

Цель: выявление технико-экономической эффективности, энергобалансовой возможности и режимной осуществимости внедрения и работы установок атомно-водородной и возобновляемой энергетики в составе локальных энергосистем Якутии и работоспособности самих энергосистем с определением граничных стимулирующих условий вхождения в оптимальный энергобаланс указанных установок

# Схема Объединённой энергосистемы Востока



# Основные решаемые задачи

## Первая задача

- Исследование имплементации установок атомно-водородной и возобновляемой энергетики в существующие локальные энергетические системы Якутии
- Оптимизация
  - Режимов загрузки действующих электростанций
  - Пропускных способностей и режимов использования межрайонных электрических связей
  - Мощностей и режимов работы водородных электролизных установок

## Вторая задача

- Исследование имплементации установок атомно-водородной и возобновляемой энергетики в развивающиеся локальные энергетические системы Якутии на перспективу до 2035-2040 гг.
- Оптимизация
  - Объёмов, структуры и режимов загрузки генерирующих мощностей, включая атомные и возобновляемые источники
  - Пропускных способностей межрайонных электрических связей
  - Мощностей и режимов работы водородных электролизных установок

# Основные влияющие факторы и сценарии

## Факторы

- Цена водорода
- Налог на выбросы диоксида углерода (CO<sub>2</sub>)
- Государственное субсидирование капвложений в атомно-водородные и возобновляемые установки
- Приточность воды к водохранилищам гидроэлектростанций
- Пропускная способность электрических связей между якутскими энергоузлами и остальной частью ОЭС Востока

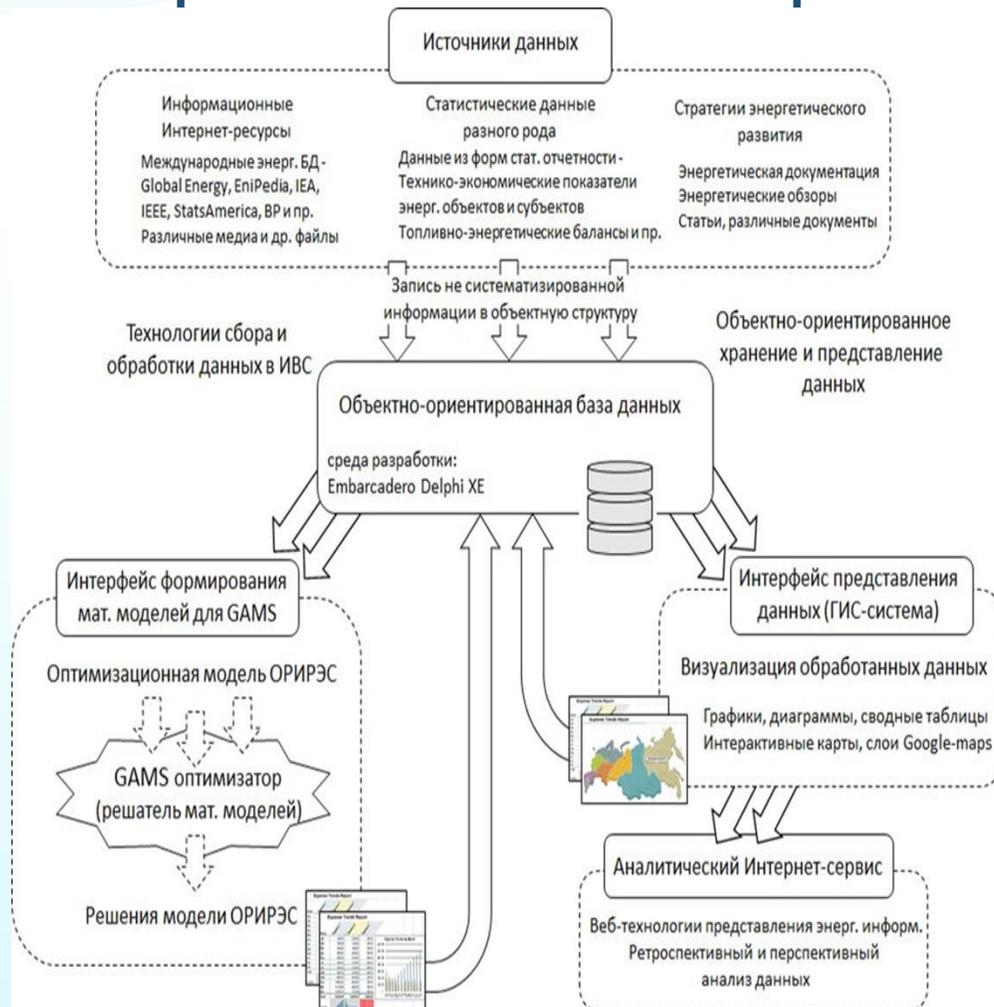
## Сценарии

- Первая группа (базовые сценарии)
  - С1 – среднемноголетняя выработка ГЭС
  - С2 – гарантированная выработка ГЭС
- Вторая группа
  - С3 – среднемноголетняя выработка ГЭС, налог на выбросы CO<sub>2</sub>
  - С4 – гарантированная выработка ГЭС, налог на выбросы CO<sub>2</sub>
- Третья группа
  - С5 – среднемноголетняя выработка ГЭС, налог на выбросы CO<sub>2</sub>, субсидирование капвложения в атомно-водородные и возобновляемые установки
  - С6 – гарантированная выработка ГЭС, налог на выбросы CO<sub>2</sub>, субсидирование капвложения в атомно-водородные и возобновляемые установки
- Четвёртая группа
  - С7 – среднемноголетняя выработка ГЭС, налог на выбросы CO<sub>2</sub>, субсидирование капвложения в атомно-водородные и возобновляемые установки, цена водорода
  - С8 – гарантированная выработка ГЭС, налог на выбросы CO<sub>2</sub>, субсидирование капвложения в атомно-водородные и возобновляемые установки, цена водорода
- Пятая группа
  - С9 – среднемноголетняя выработка ГЭС, налог на выбросы CO<sub>2</sub>, субсидирование капвложения в атомно-водородные и возобновляемые установки, цена водорода, ограничение на пропускную способность электрической связи между Южно-Якутским энергорайоном и Амурской ЭЭС ОЭС Востока
  - С10 – гарантированная выработка ГЭС, налог на выбросы CO<sub>2</sub>, субсидирование капвложения в атомно-водородные и возобновляемые установки, цена водорода, ограничение на пропускную способность электрической связи между Южно-Якутским энергорайоном и Амурской ЭЭС ОЭС Востока

# Ядро комплексных многовариантных энерго-балансовых и структурно-режимных исследований имплементации возобновляемой и атомно-водородной энергетики в локальные энергосистемы



# Исследования развития и режимов работы ЭЭС: Информационно-вычислительная система CANOE (Capacity and Network Optimization and Expansion)



## Состав основных решаемых групп задач

- Оптимизация вводов генерирующих мощностей по типам электростанций, включая возобновляемые энергоисточники и атомно-водородные энергокомплексы, и пропускных способностей электрических сетей
- Оптимизация загрузки генерирующего оборудования и межзловых перетоков по электрическим связям
- Оценка капитальных, эксплуатационных и полных затрат на развитие ЭЭС

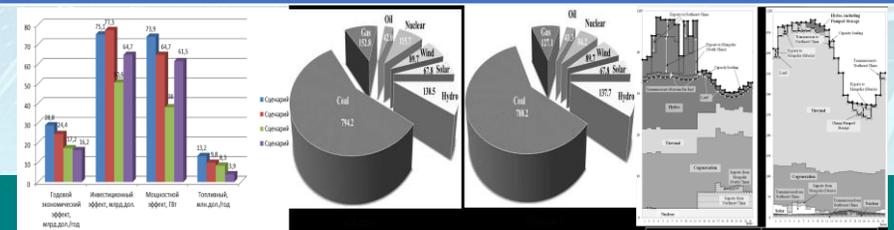
## Базовое математическое описание

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^{T_y} \tau_{it} c_{ij} x_{ijt} + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I k_{ij} (r_j + b_{ij}) X_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{i=2}^I k_{ij} (r_j + b_{ij}) X_{ij} \rightarrow \min$$

$$\sum_{i=1}^I X_{ij} - \sum_{j=1}^J x_{ijt} + \sum_{j=1}^J x_{jjt} \cdot (1 - \pi_{jj}) \geq P_{jt} + R_{jt}$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijt} - \sum_{j=1}^J x_{jjt} + \sum_{j=1}^J x_{jjt} \cdot (1 - \pi_{jj}) \geq P_{jt} + x_{j2t}$$

Результаты: эффекты, оптимальные объёмы и структуры мощностей, выработки, загрузки энергооборудования



# Оценка балансовой надёжности ЭС: ПВК НАДЁЖНОСТЬ

## Методика оценки балансовой надёжности

Подготовка исходных данных

Формирование множества расчетных состояний ЭЭС на основании метода Монте-Карло

Минимизация дефицита мощности расчетных состояний ЭЭС

Целевая функция:

$$\sum_{i=1}^I (\bar{y}_i^m - y_i) \rightarrow \min,$$

Ограничения:

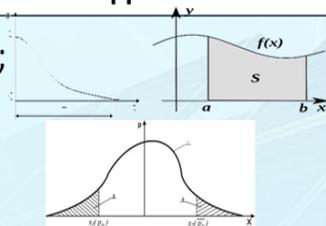
$$x_i - y_i + \sum_{j=1}^J (1 - a_{ji}) z_{ji} - \sum_{j=1}^J z_{ij} = 0,$$

$$0 \leq y_i \leq \bar{y}_i^m, \quad 0 \leq x_i \leq \bar{x}_i^m,$$

$$0 \leq z_{ij} \leq \bar{z}_{ij}^m, \quad 0 \leq z_{ji} \leq \bar{z}_{ji}^m,$$

## Определение показателей балансовой надёжности

- ✓ Вероятность бездефицитной работы;
- ✓ М.о. недоотпуска э/э;
- ✓ Двойственные оценки;
- ✓ Энергонадёжные х-ки и др.



## Основные решаемые задачи на основании оценки балансовой надёжности

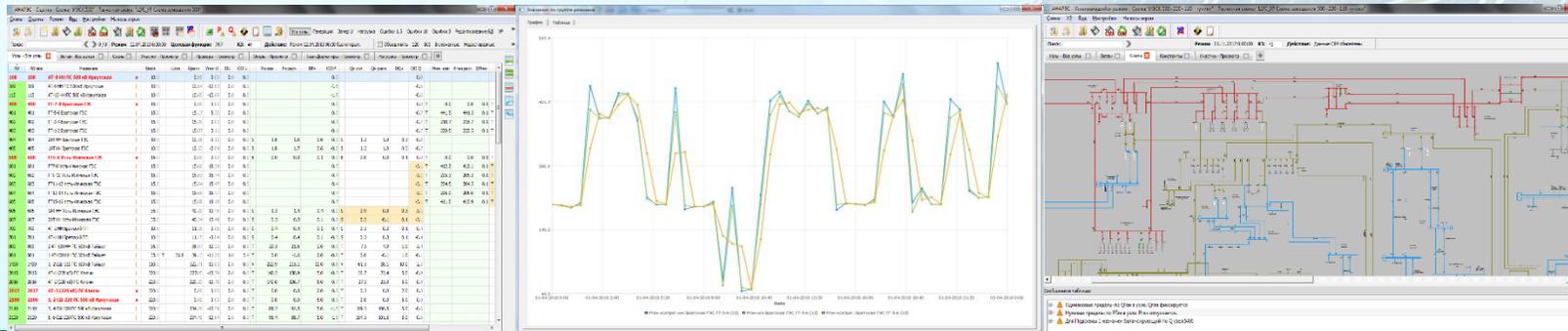
- Обоснование оптимального уровня резервирования генерирующих мощностей, а также их структуры по видам и места размещения в энергосистеме;
- Обоснование развития электрической сети для эффективного использования резервов генерирующих мощностей;
- Обоснование технико-экономической эффективности интеграции генерирующих объектов в энергосистемы, в том числе возобновляемых источников энергии;
- Моделирование и обоснование технико-экономической эффективности интеграции в ЭЭС новых технологий и механизмов, таких как системы накопления энергии, механизм управления спросом и др.

# Моделирование электрических режимов для исследования проблем функционирования энергетических систем и управления ими

## Исследования функционирования будущей локальной энергетической системы:

- Моделирование электрических режимов
  - Моделирование и оптимизация установившихся режимов.
  - Анализ устойчивости, моделирование электромеханической совместимости распределенной генерации, в частности на возобновляемых энергоресурсах, и атомно-водородных установок
  - Оптимизация конфигурации электрической сети и мест установки атомно-водородных установок и возобновляемой генерации
  - Цифровой двойник для моделирования поведения энергетической системой
- Программное обеспечение
  - Программно-вычислительный комплекс АНАРЭС (базовое программное обеспечение)
  - Дополнительные модели и программные блоки на платформе Matlab
  - Дополнительные модели и программные блоки на платформе Python
  - Прогнозные модели с использованием глубоких нейронных сетей

**АНАРЭС**



# Математическая модель развития и режимов работы ЭЭС с учетом атомно-водородной и возобновляемой энергетики - I

Целевая функция

$$\begin{aligned}
 & \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \tau_s^w C_{ij} x_{ijts} + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \tau_s^h C_{ij} y_{ijts} + \\
 & + \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \left[ k_{ij} (r + b_{ij}) X_{ij} + k_{H_2j} (r + b_{H_2j}) X_{H_2j} \right] + \sum_{\substack{j \in J \\ j' \geq 2 \\ j' > j}} \sum_{j' \in J} k_{jj'} (r + b_{jj'}) X_{jj'} - \\
 & - p_{H_2} K_{H_2} \left[ \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \tau_s^w x_{H_2jts} + \sum_{j \in J} \sum_{s \in S} \sum_{t \in T} \tau_s^h y_{H_2jts} \right] \rightarrow \min
 \end{aligned}$$

$X_{H_2j}$  – установленная электрическая мощность электролизной установки в узле  $j$ ;  $x_{H_2jts}$  – электрическая мощность электролизной установки в узле  $j$  в час  $t$  рабочих суток в сезона года  $S$ ;  $y_{H_2jts}$  – электрическая мощность электролизной установки в узле  $j$  в час  $t$  выходного дня в сезон  $S$ ;  $C_{ij}$  – топливные издержки станций типа  $i$  в узле  $j$ ;  $k_{ij}$  – удельные капиталовложения станций типа  $i$  в узле  $j$ ;  $b_{ij}$  – коэффициенты условно постоянных издержек станций типа  $i$  в узле  $j$ ;  $k_{H_2j}$  – удельные капиталовложения электролизной установки в узле  $j$ ;  $b_{H_2j}$  – коэффициенты условно постоянных издержек электролизной установки в узле  $j$ ;  $p_{H_2}$  – цена водорода;  $K_{H_2}$  – коэффициент, связывающий объем выработки водорода с электрической мощностью электролизных установок.

# Математическая модель развития и режимов работы ЭЭС с учетом атомно-водородной и возобновляемой энергетики - II

Уравнения балансов установленных мощностей

$$\sum_{i \in I \setminus I'} X_{ij} - \sum_{\substack{j \in J \\ j' \geq 2 \\ j' \neq j}} x_{jj'ts}^w + \sum_{\substack{j \in J \\ j' \geq 2 \\ j' \neq j}} x_{j'jts}^w \cdot (1 - \pi_{j'j}) \geq P_{jts}^w + R_{jts} + X_{H_2j}$$

$j \in J, t \in T^{\max}, s \in S^{\max}$

Уравнения часовых балансов рабочих мощностей в суточных графиках нагрузки

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i \in I} x_{ijts} - \sum_{\substack{j \in J \\ j' \geq 2 \\ j' \neq j}} x_{jj'ts}^w + \sum_{\substack{j \in J \\ j' \geq 2 \\ j' \neq j}} x_{j'jts}^w \cdot (1 - \pi_{j'j}) = P_{jts}^w + x_{ijts}^{zap} + x_{H_2jts} \\ \sum_{i \in I} y_{ijts} - \sum_{\substack{j \in J \\ j' \geq 2 \\ i' \neq i}} x_{jj'ts}^h + \sum_{\substack{j \in J \\ j' \geq 2 \\ i' \neq i}} x_{j'jts}^h \cdot (1 - \pi_{j'j}) = P_{jts}^h + y_{ijts}^{zap} + y_{H_2jts} \end{array} \right.$$

$j \in J, t \in T^{\max}, s \in S^{\max}$

Ограничения на развитие электролизных установок:

$$0 \leq X_{H_2j} \leq N_{MH_2j}, j \in J$$

Ограничения на режим использования электролизных установок:

$$a_{m_{H_2js}} \cdot X_{H_2j} \leq x_{H_2jts} \leq a_{H_2js} \cdot X_{H_2j}, a_{m_{H_2js}} \cdot X_{H_2j} \leq y_{H_2jts} \leq a_{H_2js} \cdot X_{H_2j},$$

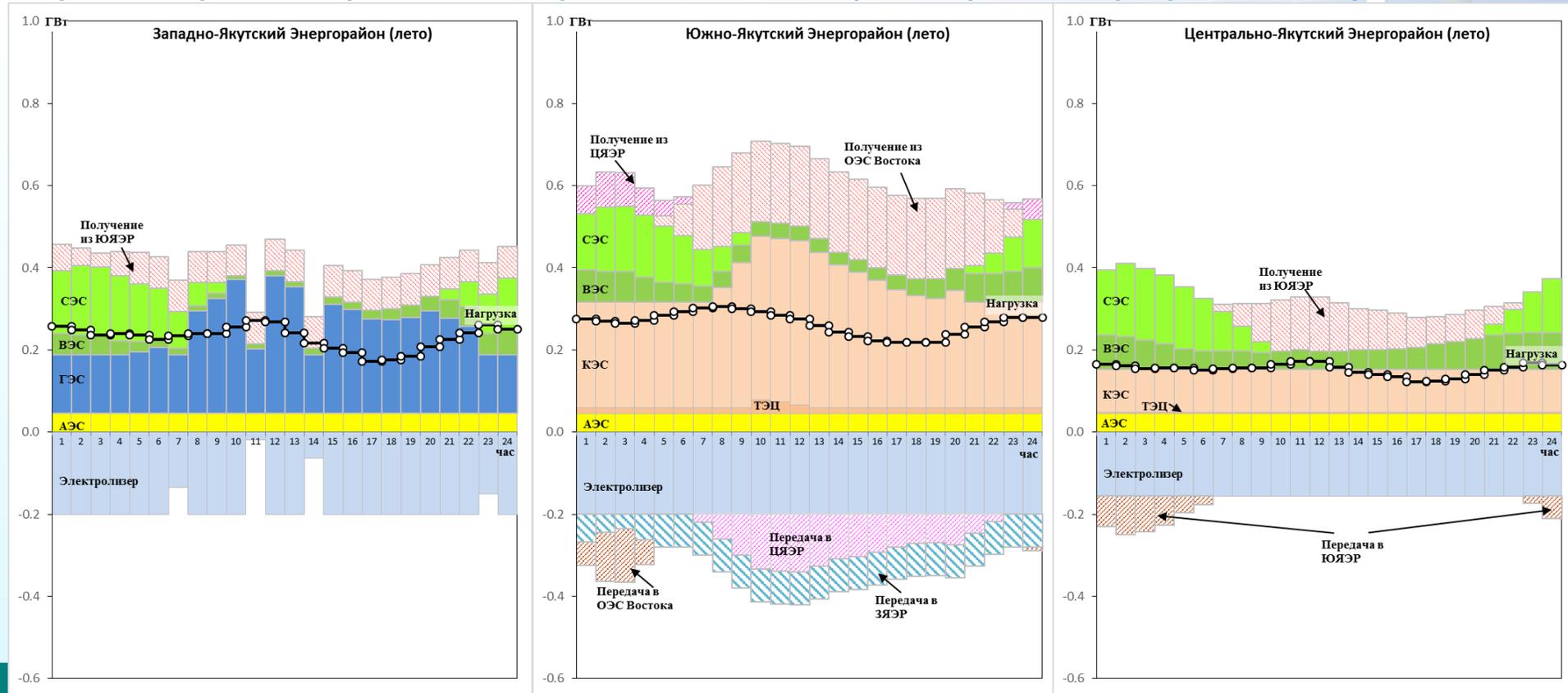
$j \in J, t \in T^{\max}, s \in S^{\max}$

# Результаты решения Первой задачи

1. Имплементация рассматриваемых установок технически возможна
2. Предельные мощности ВИЭ которые можно внедрить в энергорайоны Якутии в текущем их состоянии оценочно составляют до 70 МВт ВЭС и 70 МВт СЭС в ЗЯЭР, ЦЯЭР и ЮЯЭР, при мощности АЭС и Н2-установок по 50 МВт и выработке водорода - 23 тыс.т/год

3. Оптимизация пропускных способностей межрайонных «внутриякутских» электрических связей (относительно текущего состояния) выявила возможность для увеличения установленной мощности ВЭС и СЭС до 100 МВт.
4. Дополнительная оптимизация мощности водородных электролизных установок, что приводит к росту их мощности в 3-4 раза, создаёт возможности для роста установленных мощностей на ВЭС и СЭС до 300 МВт и объёма выработки водорода достигает 85 тыс.т/год

## Суточные режимы работы электростанций и электролизеров в энергорайонах Якутии, лето

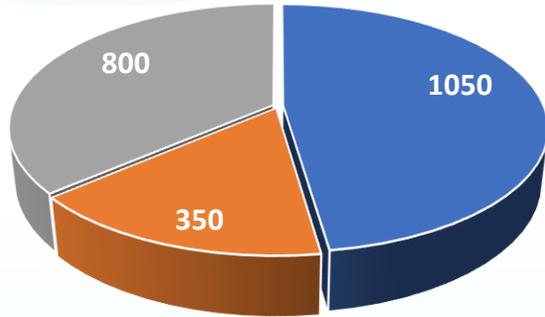


# Результаты решения Второй задачи

Структура генерирующих мощностей, МВт

Структура выработки электроэнергии, ГВт·ч/год

Сценарий 1

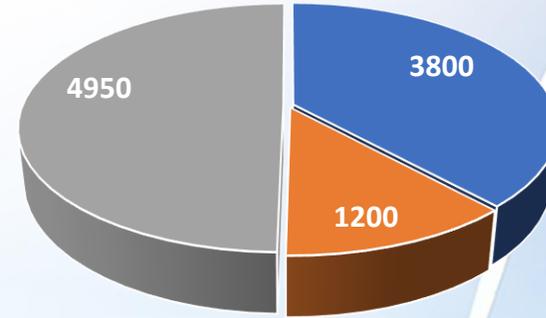


■ ГЭС ■ ТЭС газ ■ ТЭС уголь

Н<sub>2</sub>-установки

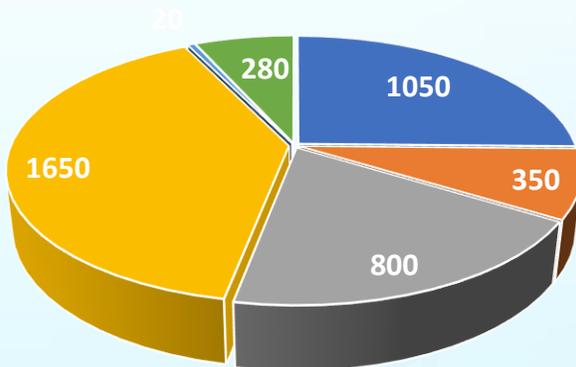
0 ГВт; 0 ГВт·ч/год

Сценарий 1



■ ГЭС ■ ТЭС газ ■ ТЭС уголь

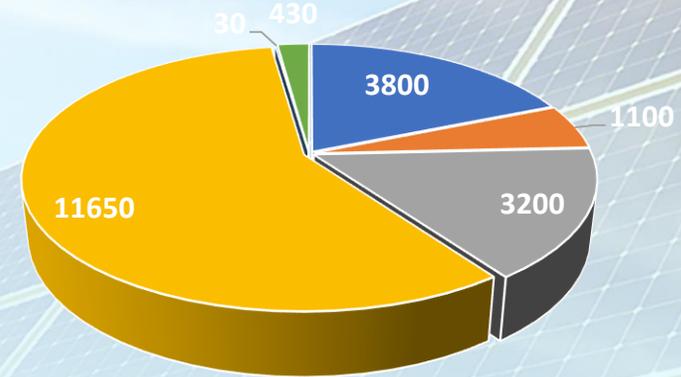
Сценарий 7+



■ ГЭС ■ ТЭС газ ■ ТЭС уголь ■ АЭС ■ СЭС ■ ВЭС

Сценарий 7+

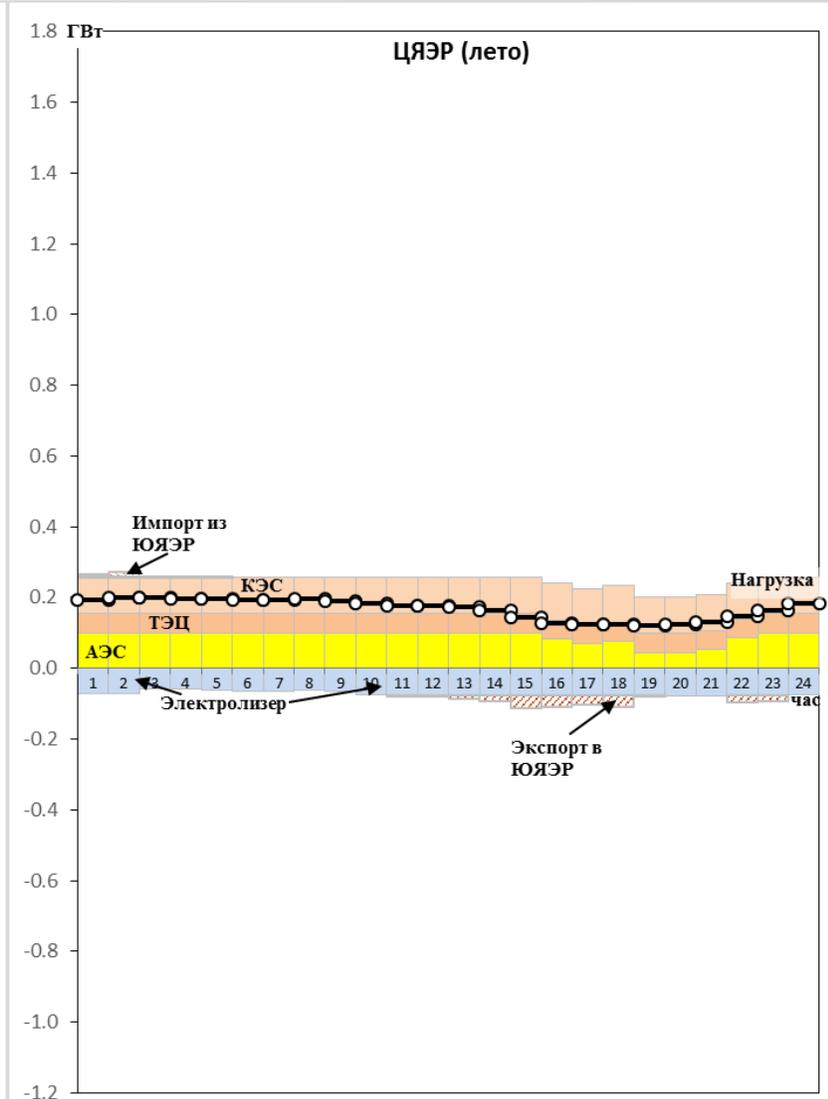
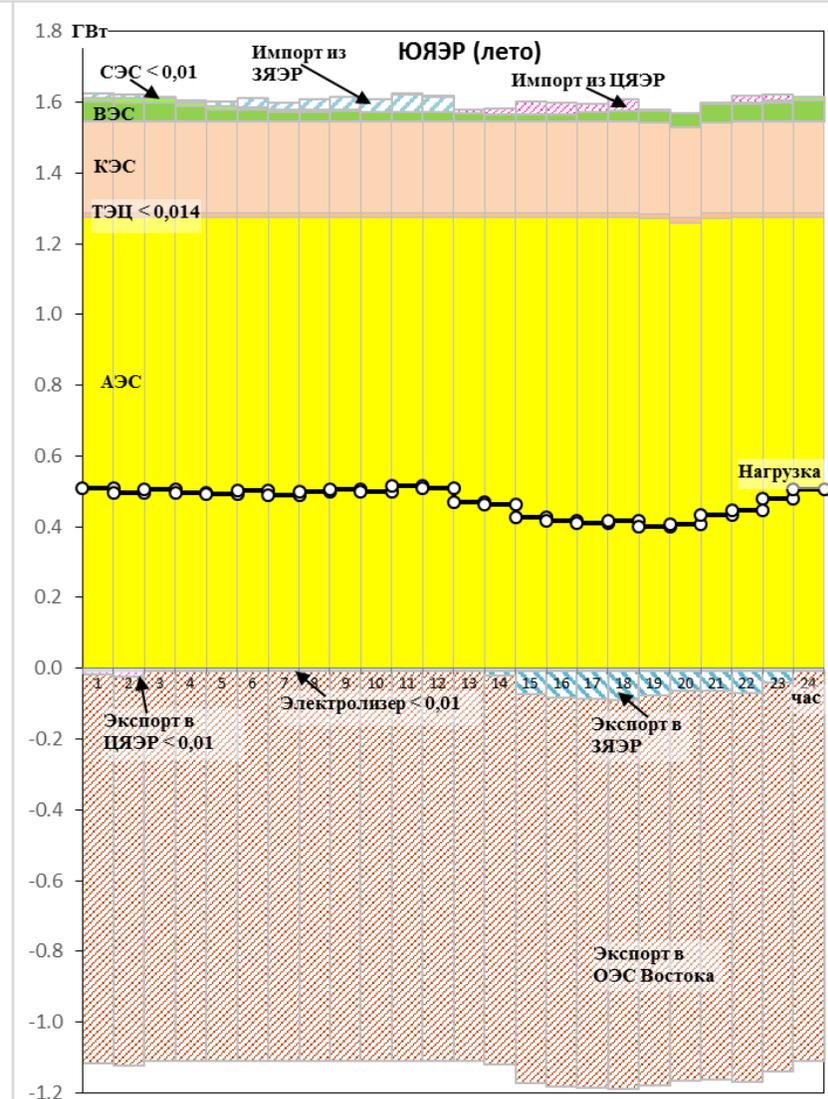
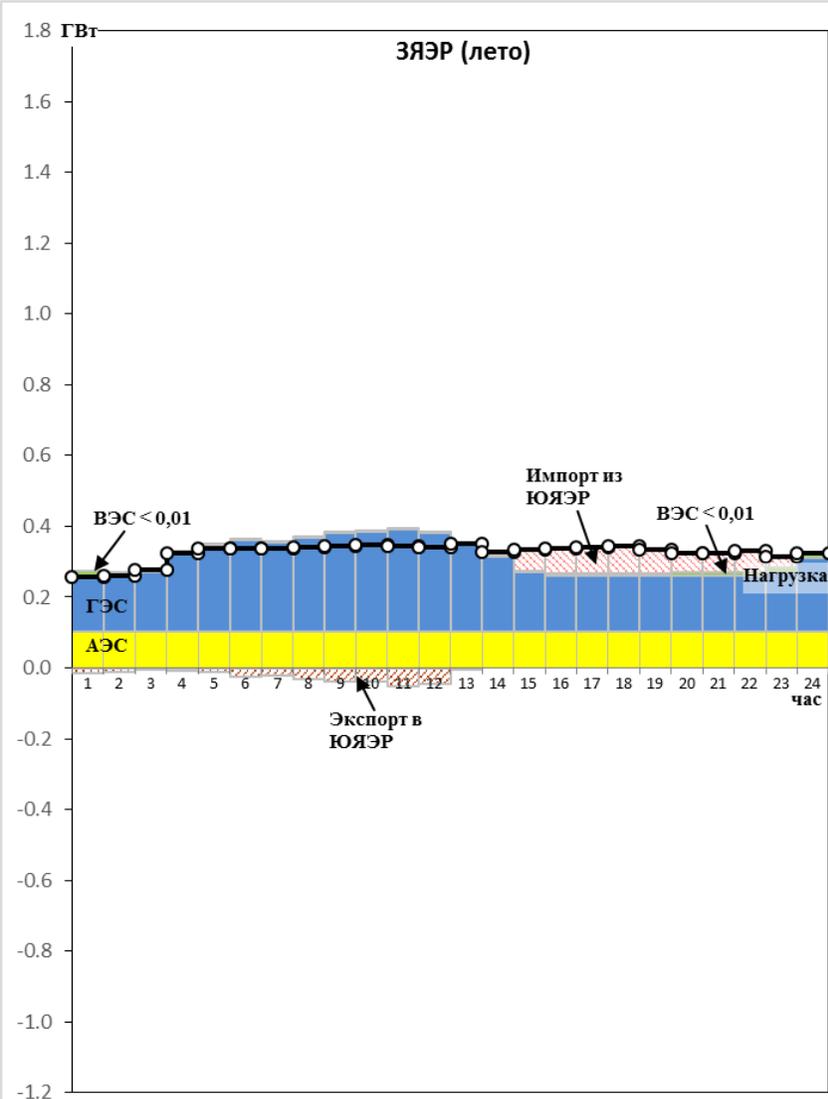
90 МВт; 470 ГВт·ч/год;  
9,5 тыс. т Н<sub>2</sub>/год



■ ГЭС ■ ТЭС газ ■ ТЭС уголь ■ АЭС ■ СЭС ■ ВЭС

# Результаты решения Второй задачи

Сценарий 7+



# Выводы. I

- В отсутствие механизмов стимулирования (в базовом сценарии) новые атомно-водородные и возобновляемые источники энергии не входят в оптимальный перспективный электроэнергетический баланс локальных энергосистем Западной, Центральной и Южной Якутии.
- При максимальном задействовании механизмов стимулирования (при налоге на выбросы CO<sub>2</sub> на уровне 90 дол/т, субсидировании капвложений в ВЭС в объёме 50%, а капвложений в остальные новые безуглеродные источники на уровне 30% и при росте цены водорода до 3,5 долл./кг) при среднемноголетней выработке ГЭС вводятся все рассматриваемые новые безуглеродные атомно-водородные и солнечно-ветровые источники энергии. При этом поддерживается высокая интенсивность обмена электроэнергией между Якутскими энергоузлами и с остальной частью ОЭС Востока.
- Водородные установки (при необходимых мерах стимулирования их вводов) вводятся в ЮЯЭР и ЦЯЭР. Данные установки работают в переменном режиме, снижая свою производительность в часы максимальных нагрузок потребителей электроэнергии в энергосистемах и, наоборот, увеличивая её в период провала электрической нагрузки. H<sub>2</sub>-установки выступают в качестве системного объекта, повышающего гибкость энергосистемы, улучшая режимы работы электростанций в ЭЭС, а также производя водород, дополнительно повышая тем самым свою эффективность.

## Выводы. II

- Рассчитанные суточные режимы работы локальных якутских энергосистем, а также режимы обмена электроэнергией между этими системами и с остальной частью ОЭС Востока показывают работоспособность локальных якутских энергосистем в условиях их развития при вводе новых атомно-водородных и возобновляемых установок
- Сформированные варианты развития энергосистемы Якутии в том числе с учетом имплементации атомно-водородных установок и ВИЭ в локальные энергосистемы Якутии удовлетворяет требованиям обеспечения балансовой надёжности, а также имеют значительный запас резервирования для дальнейшего развития промышленного кластера
- Расчеты и анализ электрических режимов энергосистемы Республики Саха (Якутия) для всех вышерассмотренных сценариев развития показывают, что с режимной точки зрения все эти сценарии реализуемы, и могут быть обеспечены требования по статической и динамической устойчивости, а также требования по ведению режимов в нормальных (не аварийных) условиях.

# II. Разработка вариантов развития атомно-водородной энергетики в России

Цель: формирование сценариев развития атомно-водородной энергетики России с учётом Концепции развития водородной энергетики в РФ и тенденций развития до 2100 года и выполнение их системного анализа с выбором наиболее эффективных

# Содержание исследований



# Система математических моделей для исследования сценариев развития атомно-водородной энергетики и выбора наиболее эффективных



# Модель Мировой энергетической системы (МЭС)

Особенности модели МЭС:

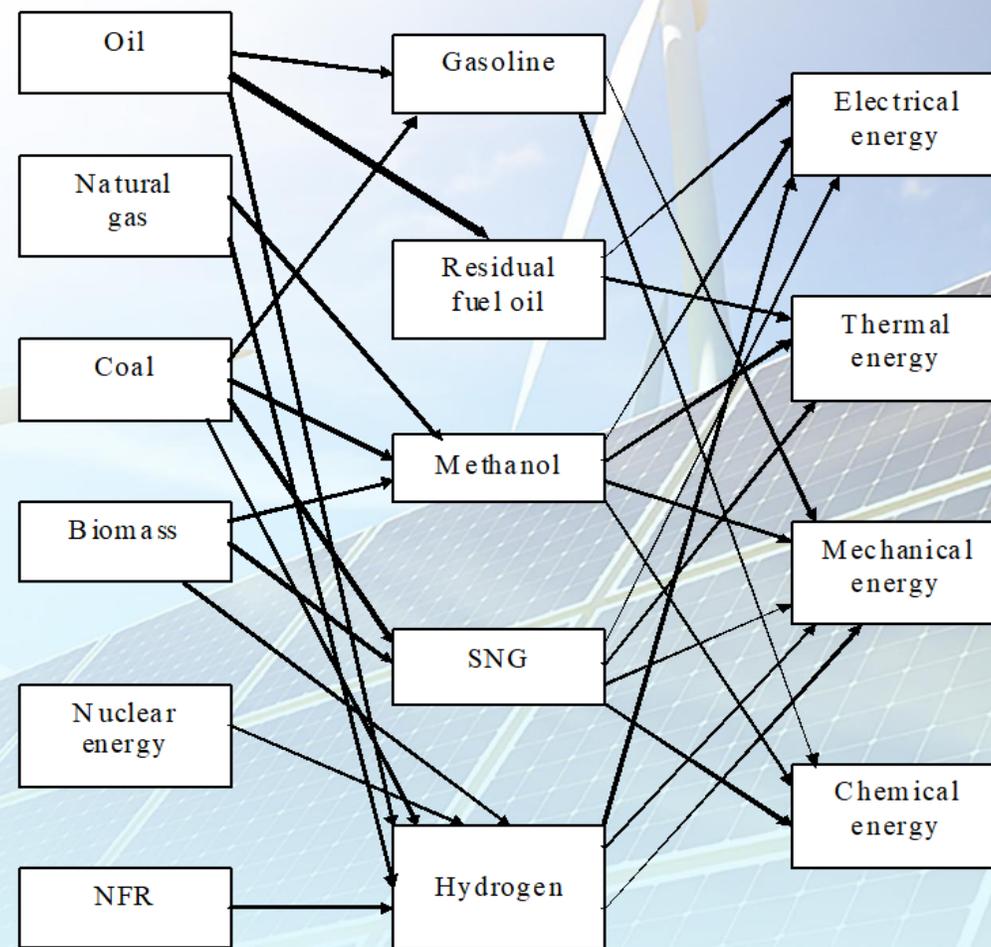
- линейная
- оптимизационная (минимум суммарных дисконтированных затрат на развитие и функционирование мировой энергетики)
- Многоузловая (13 макрорегионов)
- квазидинамическая
- шаг – 25 лет
- период прогнозирования – до 2100 г
- энергопотребление – 4 вида конечной энергии (электрическая, тепловая, механическая, химическая)

$$\text{Целевая функция: } Z = \sum_i^I \sum_j^J c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min$$

Виды энергии в модели GEM

Первичная энергия	Вторичные энергоносители	Конечная энергия
Нефть	Моторное топливо	Электрическая
Природный газ	Ж. котельное топливо	Тепловая
Уголь	Метанол	Механическая
Уран	Синтетический газ	Химическая
Гидроэнергия	Водород	
Биомасса		
Геотермальная энергия		
Ветер		
Солнце		

Технологии производства вторичных энергоносителей и их преобразования в конечную энергию



# Модель оптимизации территориально-производственной структуры топливно-энергетического комплекса страны

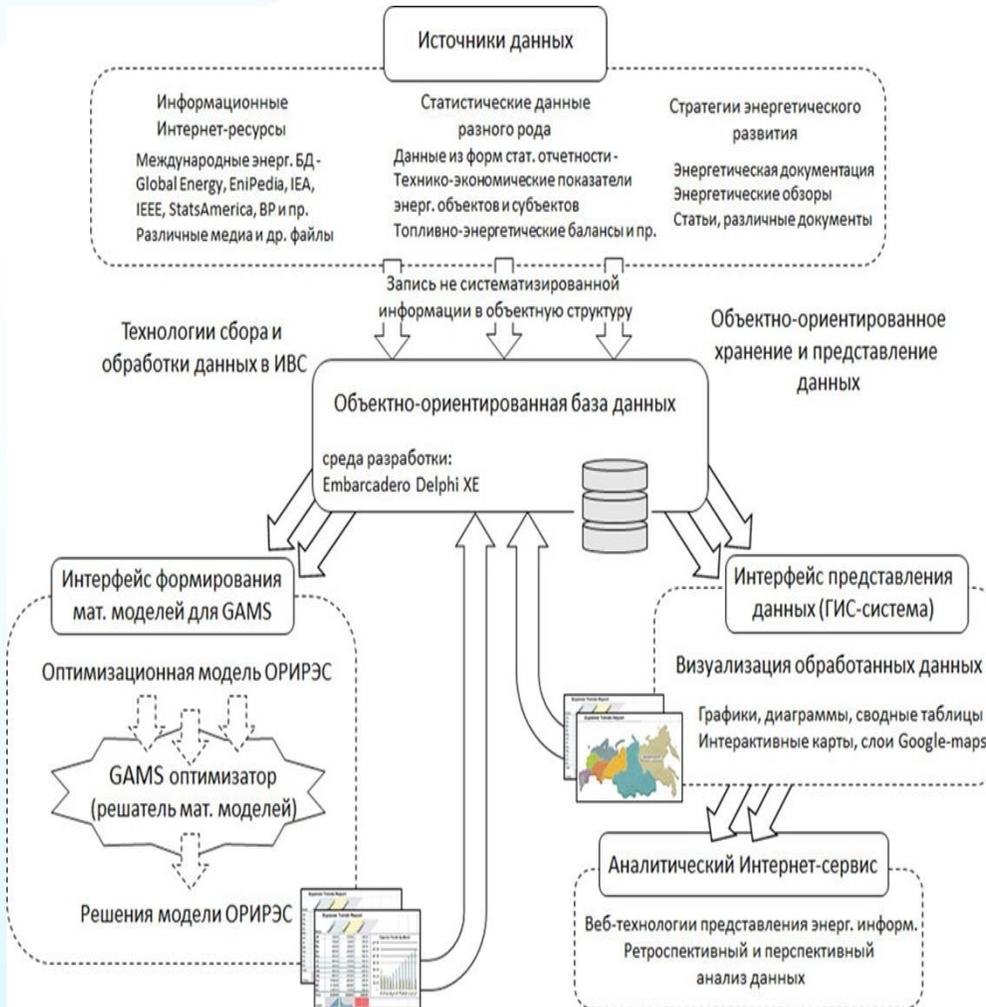


**Целевая функция – минимум дисконтированных затрат при ограничениях на выбросы CO<sub>2</sub>**

**Модель динамическая оптимизационная многоузловая.**  
**В модели три узла – СФО, ДФО, европейская часть России.**  
**Горизонт планирования – 2050 год с шагом по 5-10 лет**

**В модели ТЭК сформирован блок водородоснабжения с тремя технологиями производства**

# Информационно-вычислительная система для оптимизации развития и режимов работы ЭЭС



## Состав основных решаемых групп задач

- Оптимизация вводов генерирующих мощностей по типам электростанций, включая возобновляемые энергоисточники и атомно-водородные энергокомплексы, и пропускных способностей электрических сетей
- Оптимизация загрузки генерирующего оборудования и межзловых перетоков по электрическим связям
- Оценка капитальных, эксплуатационных и полных затрат на развитие ЭЭС

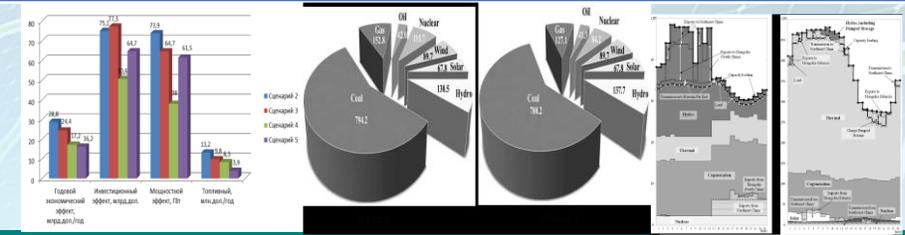
## Базовое математическое описание

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{y=1}^Y \sum_{t=1}^{T_y} \tau_{i,j,t} c_{ij} x_{ij,t} + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I k_{ij} (r_j + b_{ij}) X_{ij} + \sum_{j=1}^J \sum_{j'=2}^J k_{jj'} (r_j + b_{jj'}) X_{jj'} \rightarrow \min$$

$$\sum_{i=1}^I X_{ij} - \sum_{j'=1}^j x_{ij't}, + \sum_{j'=1}^j x_{j'jt}, \cdot (1 - \pi_{jj'}) \geq P_{jt} + R_{jt}$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ij't}, - \sum_{j'=1}^j x_{ij't}, + \sum_{j'=1}^j x_{j'jt}, \cdot (1 - \pi_{jj'}) \geq P_{jt} + x_{j2t}^{sup}$$

## Результаты: эффекты, оптимальные объёмы и структуры мощностей, выработки, загрузки энергооборудования



# Автономный Атомно-Водородный комплекс (ААВК)

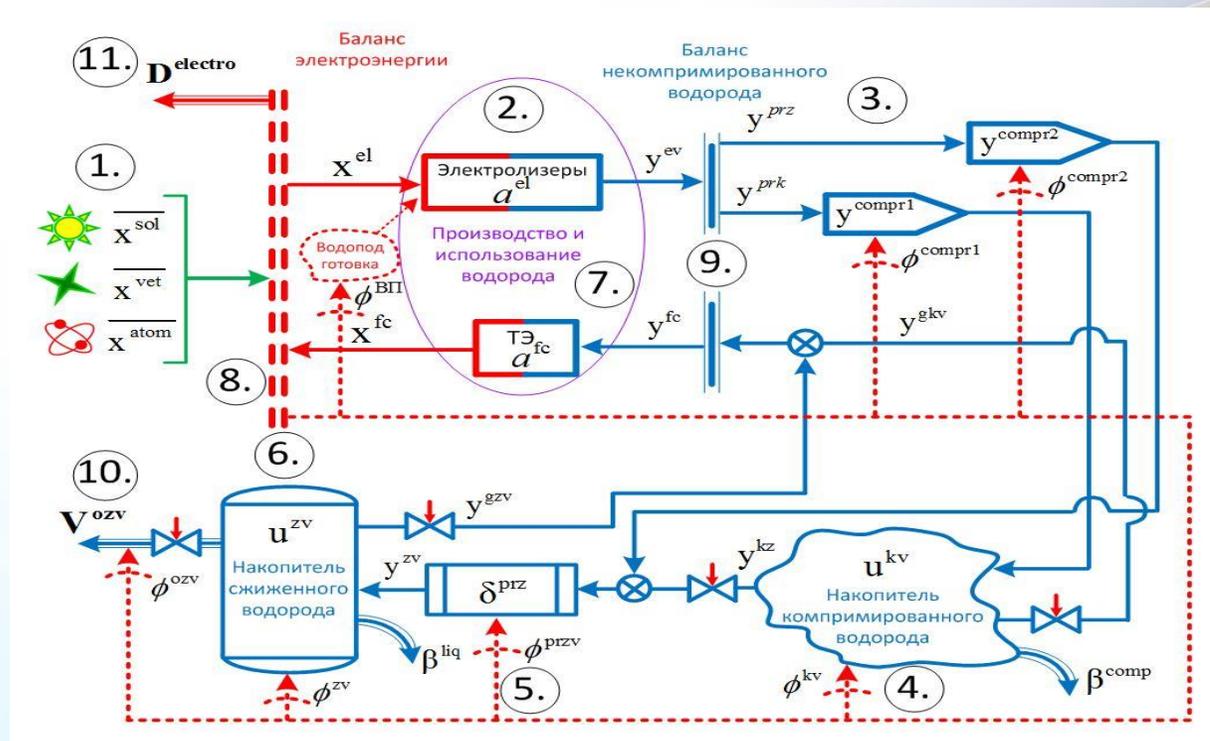
## Особенность модели

Описывается функционирование изолированной атомно-водородной системы энергоснабжения (8760 часов)

## Три типа источников безуглеродной генерации:

- Атомная
- ВИЭ (ветровые и/или фотоэлектрические установки)
- Водородные топливные элементы

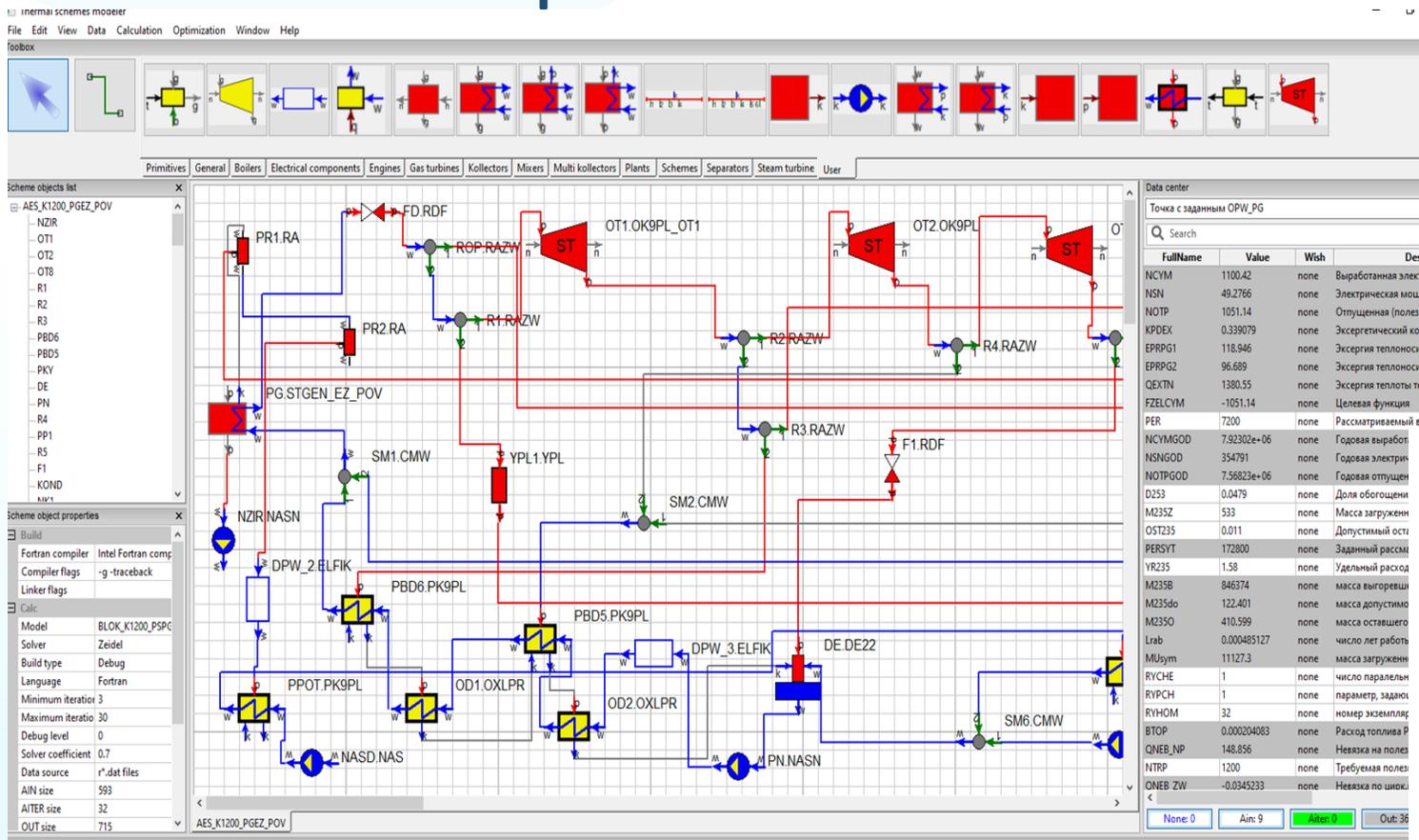
Для каждого часа года задаются минимальная и максимальная доступная мощность генерации.



- ✓ Производство электролизного водорода
- ✓ Компрессирование  $H_2$
- ✓ Сжижение  $H_2$
- ✓ Накопители компрессированного и сжиженного водорода

Заданы максимальные мощности установок.

# Математическая модель теплосиловой части ядерного энергоблока ВВЭР-1200 с ПТУ К-1200-6,8/50



$$\min_{x_k, B_k, x_i, B_i} \left[ (K_{cym} L + B_{zod} C^{mon} + K_{cym} (\alpha_{y.m} + \alpha_{am}) / \mathcal{E}_{zod} \right], \quad (1)$$

при условиях

$$S_k = f(x_k, B_k, \gamma_k), \quad G_k(x_k, B_k, \gamma_k) \geq 0, \quad x_k^{\min} \leq x_k \leq x_k^{\max}, \quad (2)$$

$$N_k = f(B_k, x_k, \gamma_k), \quad N^{\min} \leq N_k \leq N^{\max}, \quad (3)$$

$$G_i(x_i, B_i, \gamma_i, S_k) \geq 0, \quad x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (4)$$

$$K_{o6} = \theta(S_k, d_{y\partial}), \quad K_{cym} = K_{o6} + K_{cmp}, \quad (5)$$

$$N_i = f(B_i, x_k, x_i, \gamma_i), \quad (6)$$

$$\mathcal{E}_{zod} = \sum_{i=1}^n (N_i - N_i^{CH}) \cdot T_i, \quad B_{zod} = \sum_{i=1}^n B_i T_i, \quad (7)$$

Долгосрочный прогноз  
развития атомно-водородной  
энергетики

Исследование структуры ТЭК  
России с учётом атомно-  
водородной энергетики

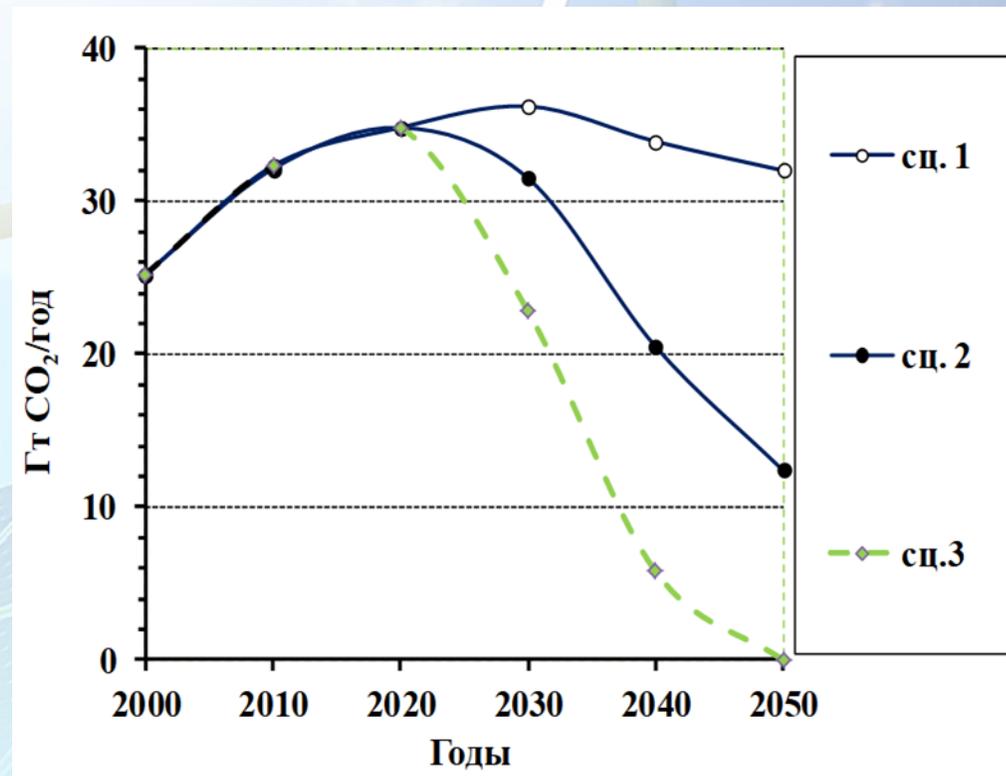
Анализ развития и режимов  
работы ЕЭС России с учётом  
атомно-водородной  
энергетики

# Сценарии развития мировой энергетики и динамики выбросов диоксида углерода

Характеристики сценариев развития мировой энергетики в период до 2050 г.

Сценарий 1 – Инерционный, Сценарий 2 - Экологический

Параметры	Сценарии	
	Инерционный	Экологический
Темпы роста численности населения	Средние	Средние
Темпы экономического роста	Умеренные	Средние
Темпы снижения энергоёмкости	Умеренные	Средние
Доступность технологий	Умеренные ограничения на развитие ЯЭ	Удешевление ЯЭ и ВИЭ
Ограничения на выбросы CO <sub>2</sub>	Мягкие	Жесткие



# Выработка электроэнергии в России, ТВт·ч/год

Энергоресурс	2020	2030		2050	
	Сценарии	Инерционный	Экологический	Инерционный	Экологический
Орг. топливо	652	830	680	780	410
Ядерная энергия	216	290	320	420	490
ВИЭ	219	280	300	410	520
Водород	0	0	0	40	120
Всего	1087	1400	1300	1650	1540

- К середине века атомная энергетика начнёт развиваться и в Азиатской части
- Минимальное значение мощности АЭС для России составляет 50 ГВт (Инерционный сценарий), максимальное – 70 ГВт (Экологический сценарий)
- Для производства электроэнергии наряду с органическим, ядерным топливом и ВИЭ в 2050 г. будет использоваться водород

# Использование ядерной энергии для производства водорода в России и мире, млн т H<sub>2</sub> /год (2050 год)

Производство водорода	ЕЧР	АЧР	Россия	Мир
<b>Инерционный сценарий</b>				
Всего	16,7	17,2	33,9	302,2
Ядерная энергия	10,3	1,4	11,7	82,1
Доля ядерной энергии, %	61,6	8,1	34,5	27,2
<b>Экологический сценарий</b>				
Всего	45,0	33,5	78,5	1046,5
Ядерная энергия	32,8	4,3	37,1	509,5
Доля ядерной энергии, %	72,9	12,9	44,8	48,7

- Доля ядерной энергии в производстве водорода в России в Инерционном сценарии выше, чем для мира в целом
- В Экологическом сценарии и в России, и в мире, она растёт

# Производство и экспорт водорода в России и мире, млн т H<sub>2</sub>/ год (2050 год)

Регион	Производство, млн. т/год	Экспорт, млн. т/год
<b>Инерционный сценарий</b>		
ЕЧР	16,7	10,2
АЧР	17,2	10,5
Россия, всего	33,9	20,7
Мир, всего	302,2	78,0
<b>Экологический сценарий</b>		
ЕЧР	45,0	20,0
АЧР	33,5	18,5
Россия, всего	78,5	38,5
Мир, всего	1046,5	90,0

Примечание: ЕЧР – Европейская часть России, АЧР – Азиатская часть России

- Водород может производиться как с помощью конверсии органических топлив, так и путём электролиза (с использованием ядерной энергии и ВИЭ)

Долгосрочный прогноз  
развития атомно-водородной  
энергетики

Исследование структуры ТЭК  
России с учётом атомно-  
водородной энергетики

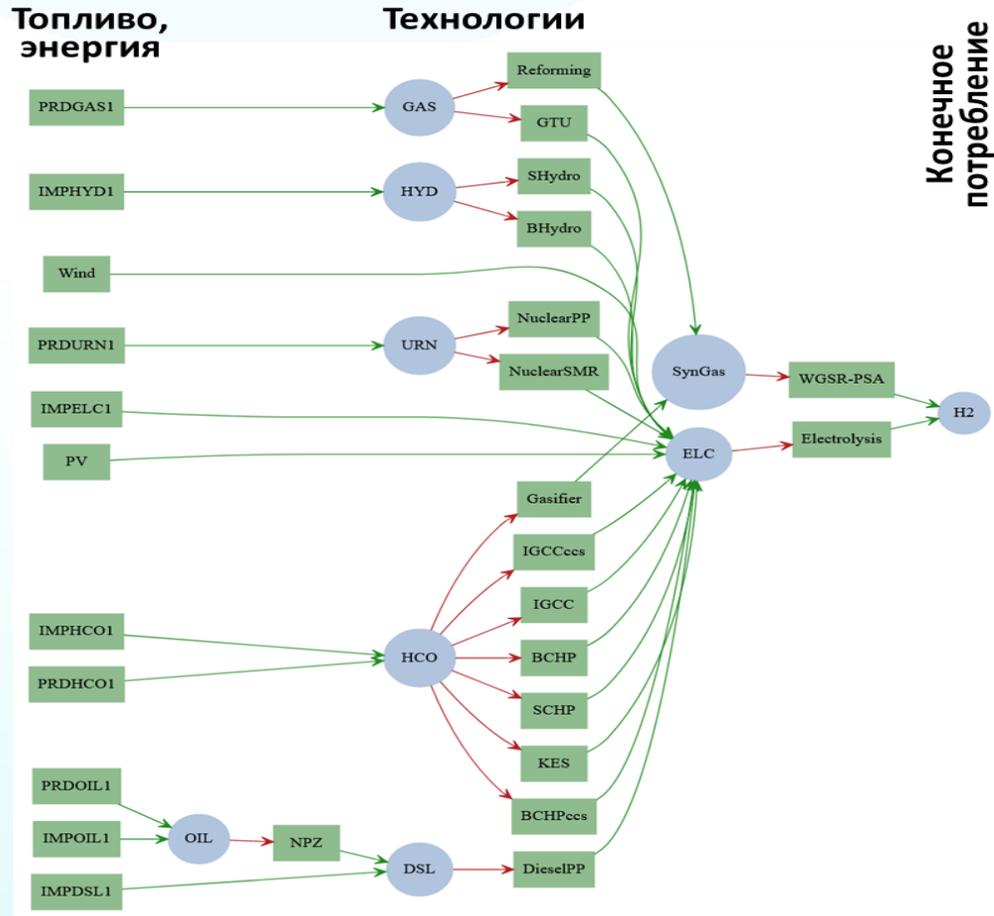
Анализ развития и режимов  
работы ЕЭС России с учётом  
атомно-водородной  
энергетики

# Эмиссия парниковых газов, млн т/год

Территории	2025		2030		2050	
	Инерционный	Экологический	Инерционный	Экологический	Инерционный	Экологический
ДФО	74	74	66	62	61	50
СФО	151	151	135	126	125	103
ЕЧР	529	529	476	444	439	363
ИТОГО	754	754	677	632	625	516

Примечание: ЕЧР – Европейская часть России, ДФО – Дальневосточный федеральный округ, СФО – Сибирский федеральный округ

# Технологическая структура производства водорода в модели ТЭК



Варианты преобразования топлива и энергии для производства водорода

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ:

1. Добыча и производство первичных топливно-энергетических ресурсов по регионам
2. Динамика ввода/вывода электростанций, других объектов ТЭК для покрытия спроса на энергоносители
3. Баланс топлива и энергии
4. Структура производства топлива и энергии
5. Набор и масштабы внедрения новых технологий
6. Выбросы парниковых газов
7. Требуемые инвестиции

Технологии производства водорода:

- Электролиз
- Риформинг газа
- Риформинг газа с улавливанием CO<sub>2</sub>
- Газификация угля
- Газификация угля с улавливанием CO<sub>2</sub>

# Инерционный сценарий

- В ЕЧР в период до 2050 года вводятся преимущественно ПГУ, газовые КЭС с технологией улавливания диоксида углерода (CCS). В большом объеме вводятся ВЭС. Установленная мощность СЭС поддерживается на низком уровне. Развитие АЭС обусловлено потребностью в производстве желтого водорода
- В СФО осуществляется ввод ПГУ, КЭС на газе с технологией CCS Для производства желтого водорода вводятся АЭС. Растущий спрос на зеленый водород покрывается на ГЭС, установленная мощность которых возрастает более чем на 10 ГВт. Мощность СЭС остается на низком уровне, ВЭС не вводятся
- В ДФО наиболее динамично вводятся КЭС на газе с технологией CCS, АЭС, ГЭС и ВЭС. Ввод этих электростанций обусловлен как ростом электропотребления, так и необходимостью производства серого, желтого и зеленого водорода. Возрастает мощность теплоисточников, в т.ч. за счет котельных на прочем топливе и теплоутилизационных установк
- Для производства водорода используется электролиз и риформинг природного газа с технологией CCS во всех рассматриваемых регионах

# Экологический сценарий

- В ЕЧР в большом объеме вводятся КЭС на газе с технологией CCS. Этот ввод обусловлен замещением АЭС, мощности которых в большой степени вовлечены в производство желтого водорода. Мощность ГЭС увеличивается практически в два раза. Существенное развитие получают ВЭС. Вся развиваемая генерация относится к низкоуглеродной. Для покрытия тепловых нагрузок дополнительно вводятся электродогревательные, теплоутилизационные установки, котельными на прочем топливе
- В СФО и ДФО аналогично Инерционному сценарию, но в большем объеме вводятся КЭС с технологией CCS на газе, АЭС, ГЭС
- Во всех регионах можно отметить ввод в значительном объеме низкоуглеродных технологий: КЭС с CCS, АЭС, ВЭС. В ЕЧР вводятся ПГУ, в СФО и ДФО – ГЭС.
- Производство серого водорода осуществляется преимущественно с использованием риформинга газа с улавливанием парниковых газов

Долгосрочный прогноз  
развития атомно-водородной  
энергетики

Исследование структуры ТЭК  
России с учётом атомно-  
водородной энергетики

Анализ развития и режимов  
работы ЕЭС России с учётом  
атомно-водородной  
энергетики

# Схема Единой энергосистемы России



## Объёмы и структура установленных мощностей, ГВт, Инерционный сценарий, цена H<sub>2</sub> – 6 долл./кг, 2050 г.

ОЭС	ГЭС	ГАЭС	КЭС газ	ТЭЦ газ	АЭС	ВЭС	СЭС	Всего	H <sub>2</sub>
Сибирь	50,64	-	3,04	16,83	4,01	-	0,40	74,92	-
Урал	2,28	-	28,25	20,05	8,70	18,41	0,47	78,15	-
Средняя Волга	7,18	2,50	3,48	14,23	8,97	9,19	3,93	49,48	1,43
Центр	1,94	6,77	5,66	23,46	25,56	10,25	9,03	82,67	-
Юг	8,74	1,07	9,95	8,14	6,28	18,62	8,38	61,20	7,99
Восток	15,85	-	3,17	2,95	1,85	5,32	-	29,14	-
Северо-Запад	3,72	6,75	-	11,33	14,63	9,17	15,69	61,28	10,25
Всего	90,34	17,09	53,56	96,98	70,00	70,96	37,91	436,84	19,67

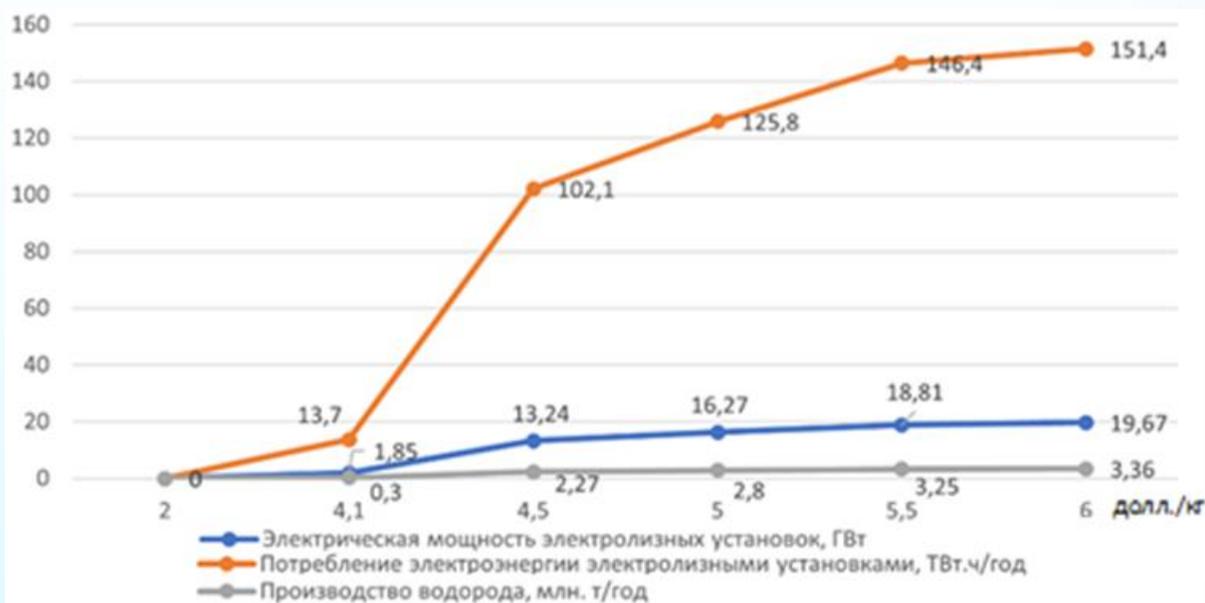
## Объёмы и структура выработки электроэнергии и её расход на производство водорода, ТВт·час, Инерционный сценарий, цена H<sub>2</sub> – 6 долл./кг, 2050 г.

ОЭС	ГЭС	ГАЭС	КЭС газ	ТЭЦ газ	АЭС	ВЭС	СЭС	Всего	H <sub>2</sub>
Сибирь	221,493	-	12,007	75,058	28,431	-	0,547	337,535	-
Урал	6,440	-	116,844	96,323	61,551	51,771	0,603	333,532	-
Средняя Волга	21,247	1,332	15,039	63,995	63,427	28,871	6,371	200,281	-11,230
Центр	3,605	2,578	23,235	108,000	180,970	27,797	12,999	359,185	-
Юг	29,135	0,929	44,128	43,060	44,334	49,988	13,079	224,654	-59,613
Восток	64,902	-	11,309	13,083	13,122	12,150	-	114,566	-
Северо-Запад	15,973	9,917	-	54,687	103,498	26,818	33,413	244,306	-80,566
Всего	362,795	14,756	222,562	454,206	495,333	197,397	67,012	1814,060	-151,41

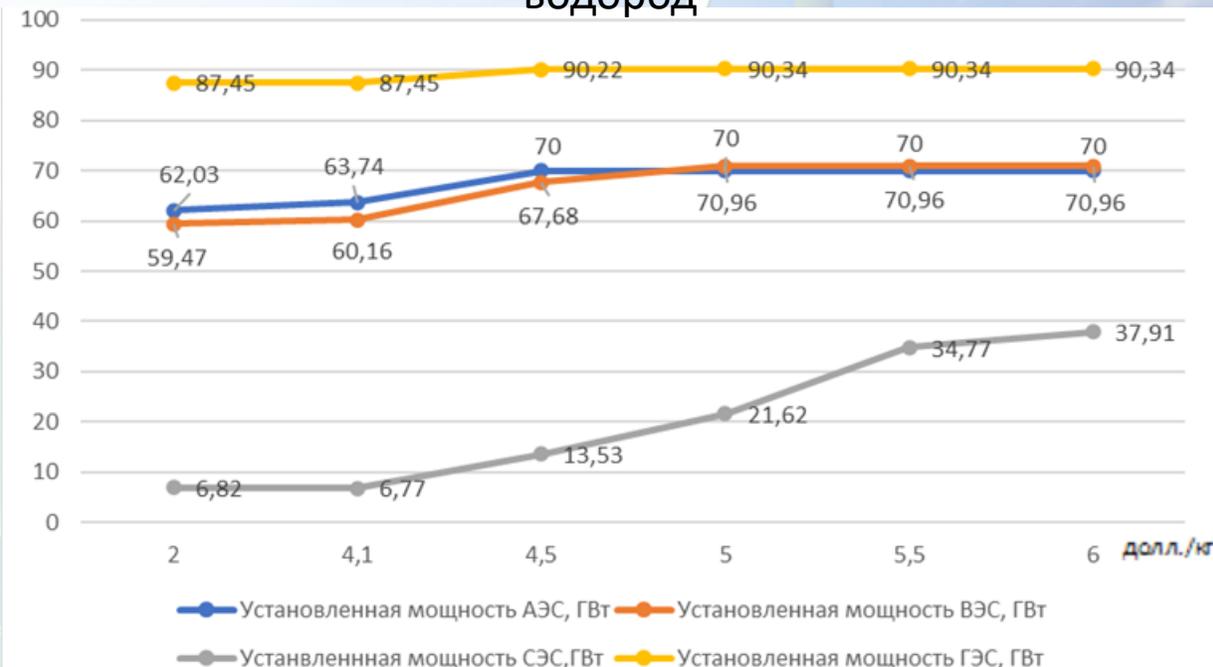
Производство водорода составило 3,4 млн т/год

# Зависимость основных параметров ЕЭС России от цены водорода

Зависимости электрической мощности, потребляемой электроэнергией и объёмов вырабатываемого водорода электролизными установками от уровня цен на водород

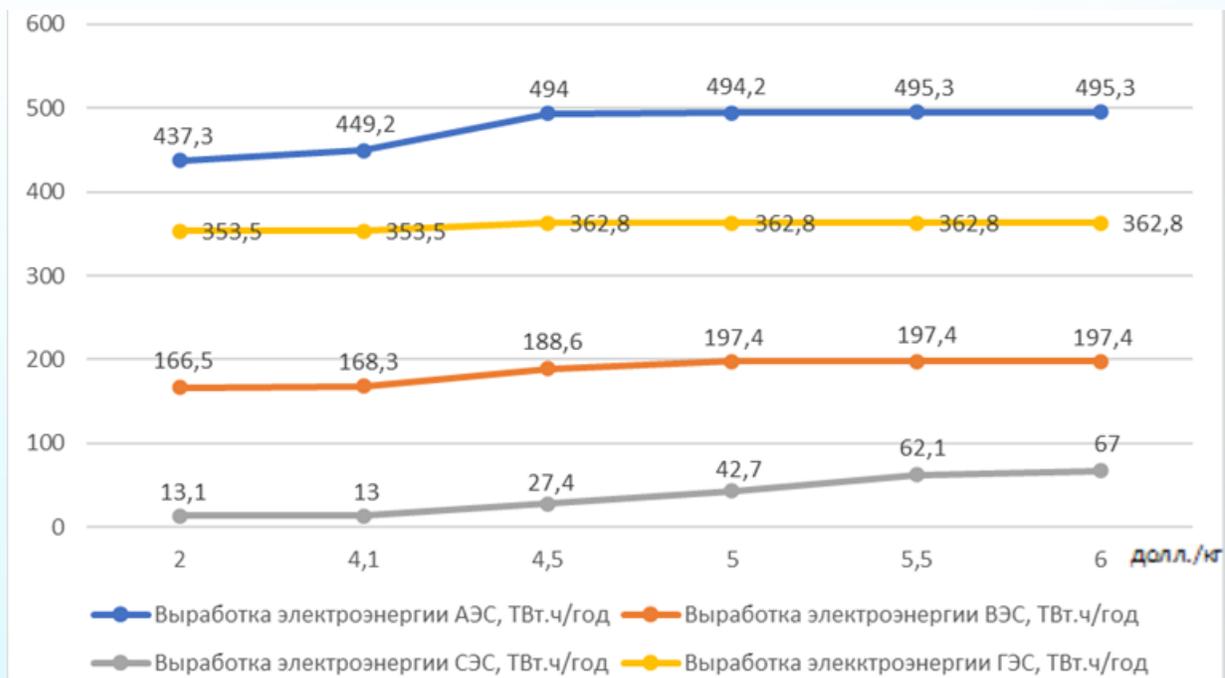


Зависимости установленной мощности основных типов безуглеродных электростанций от уровня цен на водород



# Зависимость основных параметров ЕЭС России от цены водорода

Зависимости выработки электроэнергии основными типами безуглеродных электростанций от уровня цен на водород

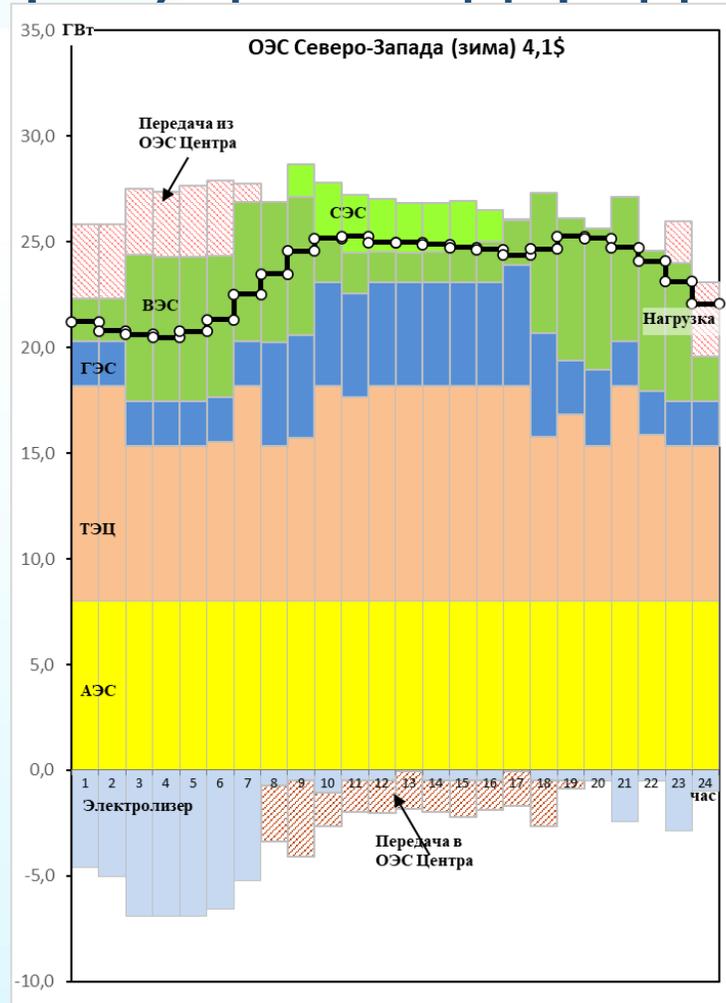


Зависимости пропускных способностей межсистемных электрических связей и перетоков по ним от уровня цен на водород

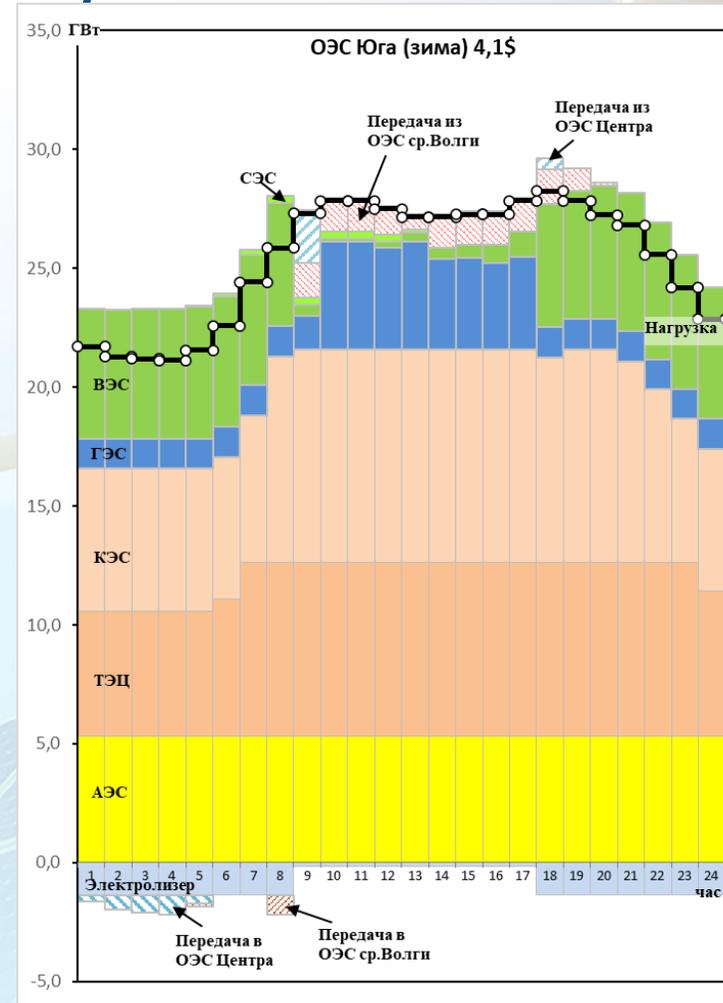


# Часовые и суточные режимы работы электростанций и электролизных установок в зимний сезон, Инерционный сценарий, цена водорода – 4,1 долл./кг

ОЭС Северо-Запада, зима



ОЭС Юга, зима



# Эффективные сценарии развития атомно-водородной энергетики

- Полученные в результате расчетов масштабы развития АЭС в России составляют 50-70 ГВт к 2050 г., что демонстрирует экономическую эффективность атомной энергетики, в т.ч. для решения проблемы ограничения выбросов парниковых газов
- Производство водорода в России к середине века, согласно выполненным оценкам, может составить 34-78,5 млн т/год, а экспорт – 21-39 млн т/год
- К 2050 году основную долю в генерации электрической энергии будут иметь газовые ТЭС, АЭС (ЕЧР, ДФО), ГЭС (СФО) независимо от сценария; в производстве тепловой энергии на перспективу до 2050 года доминируют газовые ТЭЦ и установки для утилизации вторичных энергоресурсов
- Внедрение электролизных установок в ЕЭС России существенным образом отразится на объёмах, структуре, режимах работы генерирующих мощностей и требует существенного роста пропускных способностей основной электрической сети и увеличения её пропускных способностей
- Эффективное развитие российской энергетики с учётом атомно-водородного сектора требует к 2050 году капитальных затрат (с учетом дисконтирования) в объёме 538 и 705 млрд долл.



Благодарю за внимание!