

# МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ДОЛГОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЛОБАЛЬНОГО СПРОСА НА ЭНЕРГОРЕСУРСЫ

Галкина А.А.

Институт энергетических исследований РАН, Москва, Россия

galkina@eriras.ru

*Аннотация. Изменения глобального спроса на энергетические ресурсы, движимые быстрыми технологическими изменениями в энергетике и сложной социально-экономической динамикой, требуют адаптации методических подходов к его прогнозированию. Проанализированы проблемы формирования методик, предложена методика, апробированная в ИНЭИ РАН для прогнозирования спроса по секторам конечного потребления.*

*Ключевые слова: мировая энергетика, энергопотребление, спрос, долгосрочное прогнозирование, энергетическое моделирование.*

## Введение

Актуальность совершенствования методологических подходов к глобальному долгосрочному прогнозированию спроса на энергоресурсы возросла в ответ на последние тенденции в мировой энергетике, появляющиеся энергетические технологии, неопределенности в сфере перехода к низкоуглеродному развитию, а также благодаря возросшей вычислительной способности компьютеров, прогрессу в развитии вычислительных математических алгоритмов и фрагментарному росту доступности данных. Нейронные сети, гибридные модели благодаря своей адаптивности и работе с нелинейностью и неопределенностью стали дополнять традиционные эконометрические и системные аналитические подходы.

Происходящие и перспективные изменения объемов, структуры и неравномерности спроса на энергию, включая появление новых потребителей, таких как центры обработки данных, расширение электрификации в секторах конечного потребления, возможности оптимизации спроса, благодаря развитию цифровизации и искусственного интеллекта, на фоне неопределенностей темпов внедрения технологий, влияния мер энергетических политик, а также колоссальных изменений глобального спроса, связанных с экономическим ростом на развивающихся рынках, подчеркивают необходимость в развитии гибких и комплексных методов прогнозирования, способных справиться с глубокой неопределенностью и разнообразием сценариев.

Адекватность методологических подходов к глобальному долгосрочному прогнозированию спроса на энергоресурсы заключается в их способности обеспечивать значимые прогнозы, необходимые для эффективного энергетического планирования, принятия инвестиционных решений и разработки политики в условиях быстро меняющегося глобального энергетического ландшафта.

В этой работе рассмотрены некоторые основные проблемы, связанные с формированием адекватных методологических подходов к прогнозированию спроса и предложена соответствующая методика, разрабатываемая в ИНЭИ РАН для подготовки прогнозов развития мировой энергетики в части формирования прогнозного спроса.

## 1. Особенности развития глобального спроса на энергоресурсы, выявление методологических проблем его прогнозирования

Глобальный спрос на энергетические ресурсы как совокупность кривых спроса на энергетические ресурсы во всех секторах потребления и странах мира потенциально, при снятии экономических, ресурсных и технологических ограничений, многократно больше текущего потребления. Для практических целей с учетом вышеуказанных ограничений спрос обыкновенно анализируется и моделируется на том участке, где он может пересекаться с предложением. В этой работе речь идет о прогнозировании с учетом ограничений глобального спроса на энергоресурсы для использования в моделях мировой энергетики при прогнозировании мирового потребления, производства, торговли и цен на энергоресурсы.

Базовыми драйверами спроса на энергетические ресурсы являются потребности общества, которые измеряются различными демографическими и экономическими показателями и реализуются под воздействием НТП и энергетических политик государств и компаний. Условно можно выделить два способа влияния демографических факторов на спрос: напрямую – через показатели душевого энергопотребления, которые отражают сложившиеся по странам паттерны потребления, а также опосредованно – люди являются производительной силой в экономике, а также потребителями с

соответствующими доходами. К демографическим факторам относятся не только численность населения, но и различные качественные показатели, включая доли населения по возрастным группам, уровень урбанизации. Другой крупной группой факторов являются экономические: объем, динамика и отраслевая структура экономик, душевые доходы и их распределение.

Техническую возможность реализации спроса на энергоресурсы определяет НТП – одна из ключевых и самых сложных вводных при формировании прогнозов развития энергетики [1]. НТП, несмотря на то что он направлен на удешевление и энергетическую эффективность потребления ресурсов, изменение их стоимости относительно альтернативных ресурсов, прежде всего, создает спрос. Рост энергоэффективности и снижение стоимости технологий потребления энергии в конечном счете способствуют их масштабированию. Дополнительным значимым фактором спроса являются энергетические политики, направленные на (ре)аллокацию ресурсов по выбранным направлениям НТП, а также экономическое и неэкономическое (де)стимулирование спроса по секторам по топливам с целями, например, смягчения негативных экологических эффектов [2] или повышения доступности энергии [3].

Взаимосвязи между указанными факторами и спросом меняются во времени и различаются по странам и отраслям. Это выражается, например, в изменении коэффициентов корреляции между энергопотреблением по секторам и выпуском секторов. В частности, при рассмотрении мирового потребления в детализации по 34 крупнейшим странам и группам стран мира в промышленности в 16 случаях коэффициент корреляции энергопотребления с выпуском будет менее 0,75 или отрицательной, тогда как в домохозяйствах – в 5 случаях. Тогда как многие развитые страны прошли пики энергопотребления, относительно немногие – пока что – прошли пики электропотребления, которые, возможно, окажутся промежуточными пиками ввиду перспектив электрификации в секторах конечного потребления [4]. В некоторых развитых странах в течение прогнозного периода до 2050 гг. ожидается снижение душевого производства ВВП на фоне достаточно существенного сокращения численности населения. В то же время сохраняются очень значительные различия в уровнях душевого энергопотребления между странами: например, в домохозяйствах – втрое между развитыми и развивающимися странами, в 11 раз – между США и Индией [5]. Предметом исследования здесь являются поиски индивидуальных трендов для всех стран, их анализ и соизмерение с другими странами для оценок потенциального насыщения спроса с учетом различий в используемых технологиях и других качественных показателях в различные периоды.

Ретроспективные временные ряды, которые могут использоваться как факторы спроса на энергоресурсы для расчета мировых прогнозов относительно немногочисленны. Поскольку энергетическая статистика (МЭА, ООН) по всем странам доступна лишь ежегодно, влияние краткосрочных факторов, оценка изменения внутригодовой неравномерности спроса доступны лишь при проведении регионального анализа и на отдельных энергетических рынках. Использование годовых значений в энергетической статистике обозначает, что вводные временные ряды будут слишком короткими (не более 45 значений, соответствующие 1980-2024 гг.) для обучения нейросетей. В то же время эти ряды охватывают слишком большой временной интервал, в течение которого сменилось множество энергетических технологий и прошло несколько инвестиционных циклов даже в таких инерционных отраслях, как энергоемкая промышленность, что делает более давние ретроспективные значения трендов неравными более поздним. Значительная часть ретроспективных данных в отдельных странах может оказаться нерелевантной в виду, например, больших экономических потрясений, а случае с данными по секторам потребления – нередко также в связи со значительными методологическими изменениями при сборе статистики.

Таким образом, к методологическим проблемам долгосрочного прогнозирования глобального спроса на энергетические ресурсы можно отнести:

- короткие числовые ряды статистик по энергетическому потреблению стран по секторам по топливам, охватывающие большие временные интервалы;
- ограниченное количество значимых факторов спроса на энергетические ресурсы, ретроспективные значения которых можно собрать по всем странам мира;
- многочисленные региональные и отраслевые особенности, затрудняющие применение универсальных методологических подходов.

## **2. Практики применения различных методологических подходов к долгосрочному прогнозированию глобального спроса на энергоресурсы**

В долгосрочном прогнозировании спроса на энергоресурсы в настоящее время широко используются комплексные гибридные методы. Тогда как глобальные прогнозы ранее выполнялись преимущественно с использованием лишь макропараметров, а наиболее детализированными с точки зрения наполненности технико-экономическими данными по секторам потребления были модели прогнозирования спроса по микрорайонам и районам, сейчас эти два подхода комбинируются: более активно и сложно – в прогнозах МЭА (выполненных на базе модели глобальной энергетики и климата (GEC) [6]), в меньшей степени – в прогнозах IEEJ, EIA (на базе национальной системы энергетического моделирования (NEMS)), ОПЕС, BP, Equinor. Сложные и детальные модели спроса на энергоресурсы используют развитые европейские страны-импортеры для решения проблем энергетического планирования, например, для оценок широкого внедрения ВИЭ в энергосистему, анализа отказа от двигателей внутреннего сгорания и т.д. Европейские исследовательские центры (JRC, Fraunhofer-ISI, TU Delft) используют детальные пространственные и временные вводные данные, в том числе климатические, и нередко используют модели с открытым кодом [7, 8]. Возможности расчета глобального спроса на подобных низкоуровневых моделях существуют, однако ввиду длительности расчетов, сложности разработки сценарных предпосылок и оперирования ими, использование таких детальных моделей для формирования мировых прогнозов спроса пока не распространено.

## **3. Предлагаемый методологический подход к долгосрочному прогнозированию глобального спроса на энергоресурсы**

В ИНЭИ РАН для долгосрочного прогнозирования мировой энергетики используется постоянно развивающийся модельный комплекс, который детально описывает цепочки поставок всех энергетических ресурсов, в котором составляются топливно-энергетические балансы по более чем 100 странам и группам стран и оптимизируются мировые рынки энергетических ресурсов в соответствии с разработанными сценарными условиями макропараметров, НТП и государственных энергетических политик. Расчеты ведутся с использованием собственных баз данных, включающих данные о более 2000 месторождений ископаемых топлив, более 700 объектов переработки, свыше 5000 маршрутов транспортировки, о заключенных контрактах на поставки, об экономических параметрах технологий потребления [9].

В этой работе рассматривается часть модельного комплекса ИНЭИ РАН по прогнозированию развития мировых энергетических рынков, в которой производится расчет прогнозного спроса на энергетические ресурсы (Рис. 1).

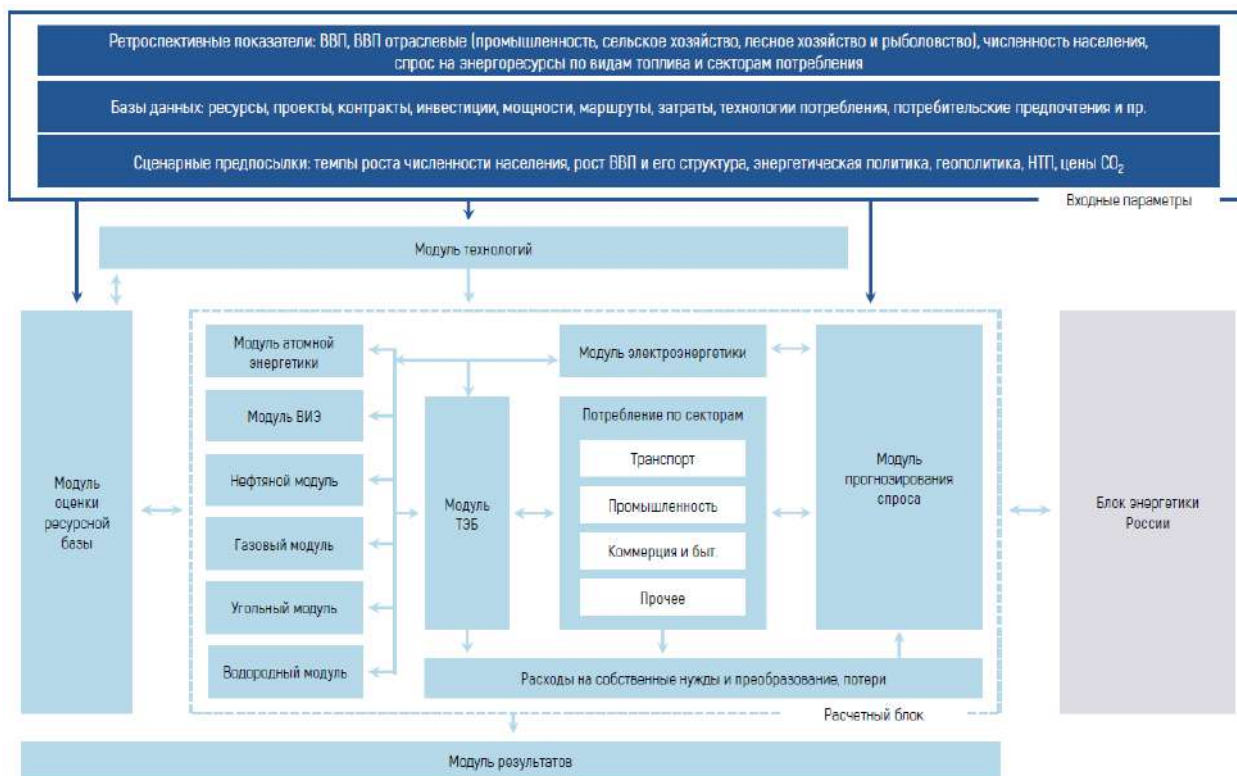


Рис. 1. Схема модельного комплекса ИНЭИ РАН по прогнозированию развития мировых энергетических рынков

Современный мировой тренд на использование комплексных гибридных подходов к прогнозированию спроса реализован и в ИНЭИ РАН. В модуле прогнозирования спроса по видам топлива, включая новые: водород, аммиак и метанол, по секторам конечного потребления совмещаются различные методики прогнозирования, выбранные в соответствии с наличием данных, желаемым временным и пространственным охватом, а также сообразно целям прогноза.

Для базовых расчётов по секторам используются эконометрические методы, включая построение авторегрессионных трендов со скользящим средним (ARIMA), построение зависимостей от душевого энергопотребления и энергоёмкости сектора, а также трендов, совмещающих эти подходы. Кроме того, в качестве одного из вариантов реализованы грей-модели, которые в отдельных случаях лучше описывают динамику сектора. Грей-модели относятся к нелинейным нестатичным моделям, которые могут быть реализованы даже в случае небольшой длины вводного временного ряда. При построении трендов учитывается, как много прогнозов может быть построено с использованием каждого метода при сдвиге (сокращении) вводного временного ряда. По результатам построения веера прогнозных значений различными способами оцениваются полученные прогнозные диапазоны, сравниваются со стандартным отклонением от тренда, и лучшие решения отбираются для прогноза по сектору (Рис. 2).

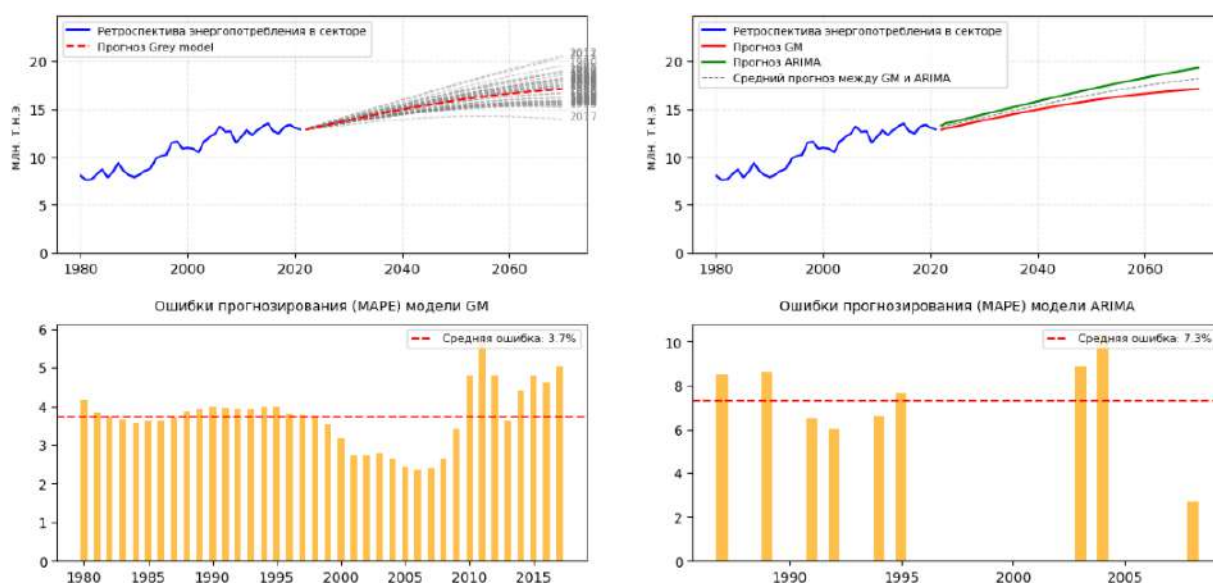


Рис. 2. Расчет спроса на энергию на примере промышленности Аргентины в модельном комплексе ИИЭИ РАН

Для дорожного транспорта спрос на используемые энергетические ресурсы по секторам прогнозируется с выделением используемого типа транспортного средства и его новых продаж, принимая во внимание: стоимости владения за период эксплуатации первым владельцем (покупка, обслуживание транспортного средства, обслуживание, включая затраты на топливо и энергию, налоги), потребительские предпочтения, рассчитываемые как индексы на основе набора качественных показателей, включая доступность инфраструктуры, а также регуляторные стимулы и ограничения. Спрос на новые транспортные средства рассчитывается на основе продления тренда численности автопарка, а также его выбытия. При расчете тренда используются эконометрический анализ показателей численности автопарка на душу населения и автоемкости ВВП. Прогноз потребления строится на основе полученной структуры автопарка и прогноза среднего расхода энергии [10].

Для прогноза спроса на энергию в авиационном транспорте используются эконометрические методы анализа трендов энергоемкости и душевого потребления для внутренних перелетов и международных авиалиний. При расчете сверхдолгосрочных прогнозных периодов в составе используемых топлив предполагаются альтернативы нефтепродуктам, которые могут использоваться в случае наличия сценарных директивных решений или в связи с повышением их конкурентоспособности по стоимости владения за средний срок эксплуатации первым владельцем в соответствии с предпосылками о НТП и государственной поддержке.

Для водного транспорта рассчитывается мировой прогнозный спрос на основе прогноза ВВП и численности населения, после чего он рассчитывается по узлам с учетом доли узлов в зависимости от ВВП узла. Для прогноза структуры потребления энергоресурсов по видам выделяется действующий водный транспорт, учитывается его выбытие и рассчитываются новые продажи, учитывающие стоимости владения различными типами судов.

Для коммунально-бытового сектора, промышленности, сельского хозяйства, железнодорожного транспорта и прочих секторов конечного потребления производится эконометрический анализ общего энергопотребления сектора на основе построения трендов душевого энергопотребления, энергоемкостей сектора от ВВП, или ВВП сектора. Спрос на энергоресурсы по видам рассчитывается на основе ретроспективных трендов долей топлив, которые корректируются в соответствии со сценарными предпосылками о государственном регулировании и НТП, изменяющих условия межтопливной конкуренции.

Для неэнергетического сырьевого использования энергоресурсов также используются эконометрические методы анализа, строятся тренды емкостей ВВП, душевого энергопотребления, учитываются меры и возможности повторного использования пластика (рециркуляции) и отказу от них (депластификация).

Тогда как используемые при прогнозировании спроса макропараметры доступны по всем странам, технико-экономические и качественные данные, необходимые для расчета спроса по секторам, могут быть недостаточными – в этом случае используется метод обоснованной кластеризации. Также в

прогнозе с использованием данных о крупных проектах, учитываются планы по их запуску и соответственно корректируются базовые прогнозы спроса.

Полученные прогнозные значения спроса передаются в другие модули, где производится решения оптимизационных задач для расчета потребления, производства, цен и маршрутов поставок энергоресурсов.

#### 4. Заключение

НТП создает новые возможности, а усложнение устройства экономики и энергетики требует все более комплексных и адаптивных подходов к прогнозированию глобального спроса на энергию. Тогда как нейронные сети и анализ больших данных стал распространенным в отдельных районах или на уровне стран, использование многих современных методов для расчета прогнозов по всем странам мира ввиду специфики вводных данных все еще затруднено. Однако и в области мировых энергетических прогнозов наблюдаются значительные изменения: прогнозы от макроиндикаторов совмещаются с технологическими прогнозами, выполненные с использованием технико-экономических данных, описательные – с нормативными. Методика прогнозирования глобального спроса ИНЭИ РАН также постоянно совершенствуется и основана на комплексных методах, сочетающих анализ линейных и нелинейных рядов, системный, сценарный, технико-экономический анализ, методы кластерного анализа и другие и позволяет отражать происходящие трансформации мировой энергетики. Перспективными направлениями исследований в этой области могут быть дальнейшее углубление учета связей между секторами, использование традиционно агрегированных с подробными и очень подробными пространственными и временными вводными данными, включая природные и другие межотраслевые показатели.

#### Литература

1. Филиппов С.П., Веселов Ф.В. Особенности и средства формирования прогнозов научно-технологического развития энергетики в современных условиях. Труды шестнадцатой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2023» // под. ред. академика С.Н. Васильева, д.т.н. А.Д. Цвиркуна ИПУ РАН – Москва, 2023. – С. 36–47.
2. Алмастьян Н.А., Ратнер С.В. Какие паттерны потребительского поведения способствуют становлению циркулярной экономики? Результаты эмпирического исследования // Экономический вестник ИПУ РАН. – 2020. – Т. 1, № 1. – С. 83–93.
3. Ravigné E., Gherzi F., & Nadaud F. Is a fair energy transition possible? Evidence from the French low-carbon strategy // Ecological Economics. – 2022. – № 196.
4. Хоршев А.А., Соляник А.И. Адаптация оптимизационных моделей планирования развития энергосистем для исследования влияния факторов электрификации в теплоснабжении и транспорте на сценарии низкоуглеродного развития электроэнергетики. Труды пятнадцатой международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2022» // под. ред. академика С.Н. Васильева, д.т.н. А.Д. Цвиркуна ИПУ РАН – Москва, 2022. – С. 733–740.
5. IEA World Energy Balances. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser> (дата обращения 06.06.2025).
6. IEA Global Energy and Climate Model. <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model> (дата обращения 06.06.2025).
7. Pfenninger S. et al. Opening the black box of energy modelling: strategies and lessons learned // Energy Strategy Reviews. – 2017. – № 7.
8. Khanh N.B. et al. A review of open-source energy system modeling tools // International Journal of Advances in Applied Sciences – 2025. – № 14(2):469.
9. Прогноз развития энергетики мира и России 2024 / под ред. А.А. Макарова, В.А. Кулагина, Д.А.Грушевенко, А.А.Галкиной; ИНЭИ РАН – Москва, 2024. – 208 с. – ISBN 978-5-91438-038-7.
10. Перспективы развития мировой энергетики с учетом влияния технологического прогресса / под ред. В.А. Кулагина // М.: ИНЭИ РАН, 2020. – 320 с. – ISBN 978-5-91438-027-1.