Российская академия наук
Уральское отделение Российской академии наук
Институт экономики
Уральского отделения Российской академии наук

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И ТРАНСПОРТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ:

ВЗАИМОСВЯЗАННОЕ РАЗВИТИЕ И РАЗМЕЩЕНИЕ



Екатеринбург, 2026

Российская академия наук
Уральское отделение Российской академии наук
Институт экономики Уральского отделения Российской академии наук

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И ТРАНСПОРТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ: ВЗАИМОСВЯЗАННОЕ РАЗВИТИЕ И РАЗМЕЩЕНИЕ

Екатеринбург
2026

УДК 332.14
ББК 65.04
Р 32

Монография подготовлена в соответствии с государственным заданием ФГБУН Института экономики УрО РАН на 2024–2026 гг.

Рецензенты:
д-р экон. наук, доцент, декан факультета Бизнеса и управления АНО ВО Гуманитарный университет С. А. Мицек,
д-р экон. наук, профессор, руководитель Центра исследований социоэкономической динамики ИЭ УрО РАН О. А. Козлова

Р 32 **Региональные производственные комплексы и транспортно-энергетические инфраструктуры: взаимосвязанное развитие и размещение** / М. Б. Петров, А. Ю. Домников, К. А. Завьялова, Е. Д. Игнатьева, И. К. Кожов, К. Б. Кожов, В. В. Литовский, А. В. Мартыненко, П. Е. Мезенцев, Л. А. Серков, А. Е. Серкова, К. С. Чумляков / Под редакцией д-ра тех. наук М. Б. Петрова. — Екатеринбург : Институт экономики УрО РАН, 2026. — 220 с.

ISBN 978-5-7691-2639-0

Монография посвящена аспектам ключевой проблемы национальной и региональной экономики – повышению эффективности взаимодействия отраслей реального сектора через развитие системной сопряженности транспортной и энергетической инфраструктуры с производственными комплексами территориальной специализации. На материалах Большого Урала, включая Уральскую Арктику, Объединенную энергосистему Урала и Западно-Сибирский нефтегазовый комплекс, раскрыто системно-экономическое содержание электроэнергетики и транспортной инфраструктуры макрорегиона.

Рассмотрены методологические и методические предпосылки к энергоэкономическому и технологическому прогнозированию электроэнергетики. Показан потенциал не только прямых, но и обратных связей взаимодействия по линии «промышленность – большие инфраструктурные системы». Предложены методические основы предпроектной оценки генерирующих мощностей с применением многовекторного вероятностного анализа и формализации сопряженности инвестиционных проектов. С использованием модели векторной авторегрессии TVP-VAR-SV количественно оценены влияние транспорта на экономический рост регионов и реакция обрабатывающего сектора на глобальные ценовые шоки.

Монография полезна научным работникам, специалистам по региональному управлению, аспирантам и магистрантам, а также может быть использована в деятельности органов государственной власти при разработке стратегий пространственного развития и в учебном процессе по экономическим направлениям подготовки.

УДК 332.14
ББК 65.04

ISBN 978-5-7691-2639-0

© УрО РАН, 2026
© ФГБУН «ИЭ УрО РАН», 2026
© Авторский коллектив, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ **5**

ГЛАВА 1. УСИЛЕНИЕ РОЛИ БОЛЬШИХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ И ТРАНСПОРТА В ЭКОНОМИЧЕСКОМ РАЗВИТИИ РОССИИ И ЕЕ МАКРОРЕГИОНАЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ **10**

1.1. Системы энергетики и транспорта как большие инфраструктурные системы 10

1.2. Роль инфраструктурных систем в формировании эффективной экономики суверенного развития 12

1.3. Электроэнергетические системы Урала и оценка их современного состояния 15

1.4. Западно-Сибирский нефтегазовый комплекс и его транспортная инфраструктура 23

ГЛАВА 2. ТЕРРИТОРИАЛЬНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ КОМПЛЕКСЫ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГОПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЦИКЛОВ НА ПРИМЕРЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ОТРАСЛИ УРАЛА В КОНТЕКСТЕ «ОТРАСЛИ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ – СИСТЕМЫ ИНФРАСТРУКТУРЫ» **47**

2.1. Теоретико-методологические подходы и их приложение к оценке влияния циклов добычи и переработки руд на развитие и размещение производительных сил региона 47

2.2. Минерально-сырьевая специфика современного освоения железорудного потенциала Урала и его влияние на приоритеты энергопроизводственных циклов производства черных металлов 52

2.3. Технико-технологические аспекты развития металлургического звена железорудных ЭПЦ 58

2.4. Пространственный анализ железорудной базы региона с учетом специфики ее руд и глубин их залегания для развития природоподобных технологий 61

ГЛАВА 3. РОЛЬ МЕЖРЕГИОНАЛЬНЫХ ПОТОКОВ В РАЗВИТИИ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ МАКРОРЕГИОНА **68**

3.1. Транспортная инфраструктура макрорегиона и ее роль в формировании транспортного каркаса России 68

3.2. Методология использования межрегиональных зависимостей для моделирования сценарных условий развития целевой территории 78

ГЛАВА 4. ЭВОЛЮЦИЯ ПРОГНОСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ 92

4.1. Вводные положения 92

4.2. Генезис методологических концепций прогнозирования в энергетике: от линейных экстраполяций к нелинейной динамике 94

4.3. Теоретический аппарат нелинейной динамики в приложении к электроэнергетическим системам: фазовое пространство, аттракторы, хаотическая динамика и синергетические эффекты 111

ГЛАВА 5. РАЗВИТИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ПРЕДПРОЕКТНОЙ ОЦЕНКИ НОВЫХ ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ ДЛЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ 123

5.1. Методологические аспекты отбора сопряженных промышленно-инфраструктурных инвестиционных проектов в электроэнергетике 123

5.2. Сравнительная эффективность типов электрогенерирующих источников с применением многомерного вероятностного анализа 147

ГЛАВА 6. ЭЛЕМЕНТЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ПАРАМЕТРОВ ЭКОНОМИКИ РЕГИОНА И ЕГО ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРНОЙ СИСТЕМЫ 167

6.1. Влияние транспорта на развитие промышленности и экономический рост в российских регионах 167

6.2. Региональная промышленность под влиянием сырьевых рынков: изменяющаяся во времени реакция объема выпуска обрабатывающего сектора Свердловской области на мировые ценовые шоки 176

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 200

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ 203

ВВЕДЕНИЕ

Взаимосвязанное развитие отраслей реального производства – объективная необходимость существования и технологического прогресса современного многоотраслевого хозяйства. Развитие связано с усложнением технологической структуры, расширением набора исходного сырья, материалов, полуфабрикатов, конечных продуктов, то есть с ростом числа переходов между технологическими системами при их распределении по территории страны и ее регионов, во многом определяемом размещением естественных производительных сил, расселением, концентрацией квалифицированного труда и центров развития.

В результате общественно-экономических перемен постсоветского периода получила существенное обострение и остается нерешенной по сей день проблема эффективности взаимодействия субъектов реального сектора. По различным экспертным оценкам, порядка половины производственных мощностей промышленности по производству средств производства остаются незагруженными. Если предположить, что это следствие морального и физического износа, то должны активно осуществляться инвестиции в научно-техническое развитие, техперевооружение, модернизацию, создание новых производств. Инвестиции за счет собственных средств, хоть и являются на сегодня основным источником развития действующих предприятий, но очень сдерживаются высокими рисками. Источник рисков в данном случае – неуверенность в сбыте, платежеспособном спросе предприятий, которые могут быть потребителями продукта, выпускаемого как результат инвестиционного проекта. Иными словами, неприемлемые риски проистекают из отсутствия механизмов, инфраструктуры построения надежных кооперационных сетей. Нет сплошного мониторинга производственных возможностей предприятий и, как следствие, нет достоверной и полной информации о возможностях контрактации по средствам производства.

Предлагаемая монография посвящена особому типу межотраслевой взаимообусловленности – сопряженности транспортной и энергетической систем с отраслями и производственными комплексами территориальной специализации. Актуальность этих вопросов связана со следующими факторами:

- транспортная и энергетическая инфраструктура все более выраженно входят в круг стратегических приоритетов развития России, действуют актуализированные государственные Стратегии,

приоритет НТР России по связности территорий РФ, национальные проекты;

- системная природа инфраструктур проявляется в единстве процессов на территориях различного типа и уровня, всеобщем характере продукта, потребности в опережающем развитии;
- публичный характер предложения услуг, обязательность удовлетворения все имеющейся потребности в перевозках и энергоснабжении, жесткой зависимости объемов работы от основных грузообразующих и энергоемких подсистем хозяйства;
- значимость не только прямых связей, обусловленных платежеспособным спросом потребителей транспортных и энергетических систем, но и обратных связей в виде перманентной потребности в ресурсах и продукции фондообразующих отраслей промышленности.

Рассматриваемая межотраслевая сопряженность систем транспорта и энергетики с производственными комплексами означает координацию и комплементарность схем развития систем с отраслевыми и территориальными программами и проектами развития, ранжирование значимости намеченных проектов по развитию систем исходя из ресурсных ограничений и взаимную согласованность сроков реализации проектов инфраструктуре и по обслуживаемым комплексам.

Исследования, представляемые этой книгой, направлены на повышение эффективности не только транспортной и энергетической систем, но и экономики страны и регионов. По масштабу воздействия и степени внутренней связности, уровню организации системные отрасли универсальной инфраструктуры – энергетика и транспорт – в аспекте данного издания представляются инфраструктурами надрегионального, макрорегионального уровня. Основной ареал научной и прикладной работы, лежащей в основе материалов книги, – территории Большого Урала, включая Уральскую Арктику, объединенную энергосистему Урала (ОЭС Урала) и Западно-Сибирский нефтегазовый комплекс (ЗСНГК).

Первая глава книги представляет общую концепцию и ставит на ее основе задачи взаимообусловленного развития, а также раскрывает системно-экономическое содержание электроэнергетики Урала и транспортно-технологической системы макрорегиона ЗСНГК. На этой системе особо значимы закономерности обусловленности транспортной системы крупной территории ее уникальной специализацией. В частности, ключевые элементы транспортной сети региона оказыва-

ются таковыми в масштабах и национальной, и международной систем транспорта, функционально обслуживая и технологические потоки, и межрегионально-межотраслевые, и экспортные.

Вторая глава в основном раскрывает одну из отраслей специализации уральской промышленности и отраслевые детерминанты связанности инфраструктуры и промышленного производства – взаимодействие в территориально-производственных комплексах и энергопроизводственных циклах, эволюционно развиваемых в макрорегионе Большого Урала. На основе такой методологии возможно опережающее инициирование проектов линейных элементов транспортной сети. Сопряжение исторического генезиса с современной эволюцией взаимодействия транспортной системы с грузоемкими отраслями и комплексами дает дополнительную обоснованность схемных решений по достраиванию недостающих элементов транспортной сети на промышленном Урале. Комплексный и межпредметный характер темы монографии во второй главе проявляется в более подробном обращении к генезису современного ландшафта одной из базовых отраслей тяжелой промышленности – черной металлургии, которая отличается наиболее высокой транспортоемкостью и энергоемкостью. Ресурсно-технологические предпосылки этого связаны как с эволюцией технологий, так и с диспропорцией запасов руд, их добычи и переработки с точки зрения размещения.

Третья глава обращена к вопросам транспортной инфраструктуры крупных территорий, в первую очередь, территорий межрегионального уровня. Реализация Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры РФ до 2024 г. существенно укрепила транспортный каркас страны. Его элементами выступают крупнейшие транспортные связи и звенья транспортной сети макрорегиона Большого Урала. Вопросы развития транспортной сети рассмотрены здесь преимущественно на автодорожной сети в контексте целей, поставленных Транспортной стратегией РФ на период до 2030 г. с перспективой до 2035 г., с точки зрения межрегиональных различий. Во втором параграфе третьей главы дается систематизация количественных методов анализа межрегионального взаимодействия, базирующихся на сочетании системно-экономических и пространственно-эконометрических инструментов. Изучение межрегиональных зависимостей лежит в основе оценки и прогнозирования потребности в транспортной сети, обеспечивающей межрегиональные транспортные потоки, детерминируемые экономическим взаимодействием регионов, в первую очередь, смежных.

В четвертой главе делается переход к более подробному и конкретному рассмотрению второй большой инфраструктуры, обладающей еще более выраженными свойствами большой системы, – электроэнергетике. Здесь довольно подробно представлена эволюция подхода к оценке перспектив отрасли как сточки зрения потребности в электроэнергии, так и ее обеспечения техникой генерирования электрической и тепловой энергии.

Пятая глава посвящена актуальным и во многом еще не решенным методическим вопросам развития электроэнергетики. С привлечением методов многокритериального анализа и выбора, анализа иерархий, формализации сопряженности проектов по созданию генерирующих мощностей и проектов освоения и выпуска нового энергетического оборудования сформирован вариант инструментализации методологии межпроектного и межпрограммного сопряжения в технологическом развитии энергетики. Обоснованы пути и показано применение в практических задачах расширения критерия сравнительной экономической эффективности при обосновании вариантов развития энергетических мощностей. Значимость сравнительных методов при экономическом обосновании существенно возрастает для реализации стратегии резкого наращивания энергетических возможностей российской экономики, когда необходимо отойти от стандартной парадигмы коммерческой и финансовой окупаемости, но обосновать долгосрочные решения с низкой прямой окупаемостью и с вниманием к сопряженным эффектам.

В шестой главе применена традиционная для экономического анализа методология многофакторной эконометрики, включая оригинальную модель векторной авторегрессии со стохастической волатильностью (TVP–VAR-SV), использованная в контексте темы монографии для отражения среди факторов формирования экономики региона колебаний мировых цен под влиянием важнейших геополитических событий. Традиционной многофакторной регрессией на панельной выборке описаны связи инфраструктурных и регионально-экономических индексов. Метод TVP–VAR-SV применен на региональных данных и для отражения экспортной специализации Свердловской области, где скромные экономические результаты последнего периода часто объясняются высоким удельным весом металлургии, по продукции которой наблюдалось падение экспортных цен и сокращение экспорта.

***

При написании книги использовались данные статистики, сайтов различных профильных организаций, материалы докладов и выступлений авторов, ранее предлагаемые ими проекты решений по тематике книги. Неоценимую помощь в оформлении и сборе исходной информации оказали сотрудники Центра развития и размещения производительных сил Института экономики УРО РАН Завьялова К. А. и Петровых Н. М.

ГЛАВА 1. УСИЛЕНИЕ РОЛИ БОЛЬШИХ СИСТЕМ ЭНЕРГЕТИКИ И ТРАНСПОРТА В ЭКОНОМИЧЕСКОМ РАЗВИТИИ РОССИИ И ЕЕ МАКРОРЕГИОНАЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

1.1. Системы энергетики и транспорта как большие инфраструктурные системы[1]

Энергетика и транспорт – две инфраструктурные отрасли народного хозяйства, создающие в качестве непосредственного результата своей деятельности универсальные продукты, в том или ином объеме и виде потребляемые обществом, его организациями и населением на любой территории. Универсальный в потреблении продукт энергетики – конечная энергия, необходимая для функционирования всех объектов человеческой деятельности. Универсальный по своему назначению продукт транспорта – перемещение человека и материальных объектов в пространстве.

Прогресс общественных производительных сил сопровождается появлением как новых энергоносителей и способов их передачи (Бушуев, 2012), по сути, транспорта энергии, так и новых видов транспорта, сред, в которых они предназначены работать, а также объектов, ценностей, в отношении которых следует выделять специальные способы транспортировки. Однако предмет этой книги ограничивается традиционным, классическим пониманием транспортной системы (Вакуленко, Евреенова, 2020) и электроэнергетической системы России (Макаров, 2016). Эти две инфраструктурные отрасли рассматриваются в свете их приоритетных задач и тех проблем, с которыми сопряжено решение этих задач. Инфраструктуры универсального назначения на территориях различного типа и уровня и, в первую очередь, в регионах страны являются безусловными приоритетами развития России, связанности ее социально-экономического пространства[2]. Успехи и достижения по ним – необходимое условие обеспечения быстрого формирования российской модели будущей экономики суверенного типа, когда наращивание ресурсно-технологического, производственного и инфраструктурного потенциала шло бы вместе с продуктивным разрешением социально-экономических противоречий, развитием человека и обеспечением качества его жизни.

[1] *Автор: М. Б. Петров.*

[2] *Энергетическая стратегия РФ и Транспортная стратегия РФ. Приоритеты научно-технологического развития РФ.*

Электроэнергетика и транспорт, особенно железнодорожный, обладают ярко выраженной системной технологией и организацией. В силу этого они теснейшим образом сопряжены со смежными отраслями хозяйства. С одной стороны, в формировании объемов своей работы они зависят от потребителей, с другой, являются крупными потребителями фондообразующей продукции промышленности. В этой связи и возникает необходимость рассматривать развитие транспортной и энергетической инфраструктуры в сопряжении с производственно-технологическими комплексами обслуживаемых территорий, регионов размещения таких комплексов и их транспортных и энергетических инфраструктур. А поскольку системная природа этих инфраструктур и масштабы обслуживаемых комплексов придают их объектам надрегиональное, макрорегиональное и даже общероссийское значение, то и масштаб оценок при обосновании решений по взаимосвязанному функционированию и развитию требует широких рамок.

В самом широком значении слова энергетика – это область хозяйственно-экономической деятельности государства и общества, основанная на совокупности больших систем и подсистем, служащих для производства, преобразования, передачи, накопления и использования энергетических ресурсов всех видов. Ядро энергетики – топливно-энергетический комплекс (ТЭК), в составе которого электроэнергетика и топливная промышленность, которую в основном составляют нефтегазовая и угольная отрасли промышленности. Объектом государственной политики и стратегии, включая научно-технологическую стратегию, политику и практику стратегического развития, обеспечения национальной безопасности в энергетике, становятся целостные комплексы, например, топливно-энергетический комплекс и смежные отрасли промышленности, включающие энергетическое машиностроение, электротехническую промышленность, электронику и приборостроение.

Аналогичным образом, необходимо понимать и выстраивать политику, стратегию, планирование и управление в сфере транспорта. Здесь существенен традиционный аспект транспортной доступности и транспортной обеспеченности, гарантирование пропускных способностей, географии и плотности транспортных сетей. Набирает значимость логистический аспект. Он состоит в том, что транспортные системы становятся несущей основой логистики, и следует развивать не просто системы транспорта как изолированные, но как транспортно-логистические системы, в которых потоки транспортных средств зависят от потоков грузов, на которые влияют объекты логистики как системы об-

служивания и управления материальными потоками. Подобно транспортным, объекты логистики включают линейные и узловые элементы.

1.2. Роль инфраструктурных систем в формировании эффективной экономики суверенного развития[3]

Российское общество и его экономика переживают сегодня сложный и противоречивый этап развития. Он характеризуется беспрецедентным сочетанием внешних и внутренних условий, когда крайне важно ускорить и усилить начавшиеся в экономической жизни зримые позитивные перемены, сделать их устойчивыми и непрерывными. Эти качества процессов развития во многом обеспечиваются транспортными и энергетическими проектами и, в первую очередь, большими проектами. Приоритетность таких проектов и их роль в развитии общества и укрепления его обороны и безопасности перед лицом геополитических и геоэкономических вызовов не совместима с общераспространенными экономическими критериями окупаемости. Это пространство системной экономики, где требуется максимально широкое понимание и определение народнохозяйственной эффективности в увязке с неэкономическими критериями принятия решений. Оценки абсолютной, преобладающей в широкой экономической практике эффективности должны дополняться сравнительным анализом. Системные экономические и технико-экономические исследования необходимы для формирования схем развития и программ развития. Программы предполагают увязку с экономико-технологическими и пространственно-стратегическими задачами. В программах нужно рассматривать широкий круг потенциальных проектов, но в силу ресурсных ограничений ранжировать проекты, избирать проектные траектории. При осуществлении программно-проектного подхода острой проблемой остается реализация отдельных проектов, целостных программ в их предметно-тематическом и территориальном единстве.

К настоящему времени в России успешно решена задача стабильности общества, которая, по-видимому, была приоритетом в смягчении противоречий, являвшихся сверхострыми на начало XXI века. И теперь на передний план со всей определенностью вышла проблема суверенного развития, адекватной необходимости обретения и устой-

[3] *Автор: М. Б. Петров.*

чивого расширенного воспроизводства в последующем лидерского качества научно-технического, производственно-экономического и экономико-технологического развития российского общества. К такому приоритету подвигают нас и внешние вызовы.

Определяющими мировыми тенденциями становится смена мирохозяйственных укладов, быстрое формирование многополярного мира, рост агрессивности коллективного Запада на фоне усиления противоречий позднего капитализма и его противостояния смещению центров развития на Восток и на Юг. Важнейшие процессы внутри страны связаны с последовательным преодолением негативных последствий нескольких десятилетий ошибок и неудач в реформировании экономических отношений, когда мы уже должны не просто проходить революционную фазу технологического прогресса, но и восстанавливать многие утраченные производственные компетенции, возвращаться к адекватному управлению наукой и образованием, смягчать возникшие ранее неприемлемые разрывы в уровне и качестве жизни, вводить и овладевать требуемыми инструментами социально-экономической, промышленной и пространственной политики.

Программы освоения обширных территорий включают в себя в качестве одной из первоочередных задач именно транспортную и энергетическую инфраструктуру освоения и дальнейшего развития. В круг стратегических территорий входят территории и акватории Арктики, Севера и Востока страны. Для Арктики транспортная система выступает и как инфраструктура ресурсного и иного освоения, и как отрасль специализации. Северный морской путь, портовое хозяйство, аэродромы, железнодорожные и автомобильные подходы, железнодорожный Северный широтный ход от низовий Оби до Норильска – Игарки с перспективой сооружения железнодорожного моста Лабытнанги – Салехард должны быть в кратчайшие сроки увязаны в большую транспортную систему Российской Арктики. Такая транспортная система обеспечит надежный и целиком суверенный выход России в мировой океан для морского сообщения со всеми континентами, являясь одной из доминант обеспечения безопасности страны, создаст возможности для наращивания транзитных и экспортно-импортных грузопотоков, а также предоставит доступ к огромным природным богатствам углеводородов и рудных запасов Арктики. Ее роль является геостратегической, ресурсно-технологической и опорной для формирования долгосрочного пространственного развития страны и новой логистики. В силу масштабности стратегических проектов, рассредоточенности их

проектов, экстремальности природных условий большая транспортная система Российской Арктики в максимальной степени пересекается с системами ТЭК, поскольку здесь сильна и взаимность двух отраслей с точки зрения их инфраструктурного взаимодействия, и экономико-технологическая их сопряженность как основа кооперации в деятельности их организаций и предприятий.

Экономико-технологическое сопряжение отраслей индустрии и инфраструктуры транспорта и энергетики существенно дополняется капиталоемким характером этих двух инфраструктур, которые являются крупнейшими потребителями материалов, машин и оборудования, продукции электротехнической и электронной промышленности, приборостроения. Комплементарность двух крупнейших инфраструктур и отраслей индустрии означает значимость прямых и обратных связей в системах.

Прямая связь энергетики и транспорта с производственными комплексами состоит в жесткой зависимости электропотребления, электрических и тепловых нагрузок, объема перевозки и грузооборота от объема и структуры энергопотребляющих и грузообразующих производств, их размещения и направлений отгрузки их продукции. При этом на железнодорожном транспорте и в электроэнергетике, согласно законодательству, действует публичный, заявительный характер предложения энергии и услуг по перевозкам. Так, все предъявленные к перевозке по железным дорогам общего пользования грузы должны быть перевезены, и все заявки на техприсоединение должны быть удовлетворены. То есть и транспорт, и энергетика имеют объем производства, преимущественно заданный существующим платежеспособным спросом.

Обратная связь состоит в том, что любые проекты в рассматриваемых системах и текущее содержание объектов системы формируют спрос на фондообразующую продукцию – как расходные материалы и энергию, так и продукцию инвестиционного назначения.

Особый и новый аспект обратной связи связан с системной логистикой. Авторская концепция системной логистики предполагает синтез транспортной и логистической систем в иерархическую транспортно-логистическую систему. Необходимо строить новую логистику на иерархической транспортно-логистической системе региона исходя из того, что две исходные подсистемы в процессах грузодвижения и товародвижения имеют значительный потенциал системной увязки.

В частности, в иерархической транспортно-логистической системе региона возможно дополнение имеющейся инфраструктуры поддержки и обслуживания потоков агрегатными инициативами субъектов

транспортной и логистической деятельности, например, по принципу экосистемы, где оркестраторы логистической экосистемы создают взаимодействующие платформы, на которых происходит агрегация грузовых ресурсов и потоков. Потребность в такой постановке вызвана сосуществованием сегментов реальной экономики с различной степенью интеграции и связанной с ней централизацией. Такая агрегация сможет частично восполнять явные пробелы экономической координации связей между предприятиями, расширяя в перспективе взаимную обозреваемость потенциальных контрагентов, тем самым внося вклад в планирование производственных программ грузообразующих предприятий. Новые системы транспортно-логистической иерархии смогут способствовать воссозданию излишне фрагментированных и суженных кооперационных взаимодействий между производствами, повышая планомерность перспективных производственных программ предприятий, снижая риски создания новых производственных мощностей на них. Новый тип транспортно-логистических систем через информационную поддержку будет работать на интеграцию в технологических совокупностях, участвуя в формировании сетей технологического сопряжения производств реального сектора.

Производственно-технологический и экономический суверенитет заявлены как важнейшие национальные стратегемы. Их воплощением выступают производства и их совокупности, создающие конечный продукт целевой структуры, уровня и качества. Но развитие производственно-экономических комплексов неразрывно связано и во многом опосредуется развитием транспортно-энергетических инфраструктур и систем информатики и связи. Проекты развития приобретают черты взаимосвязанности и взаимной зависимости.

1.3. Электроэнергетические системы Урала и оценка их современного состояния[4]

В состав Объединенной энергетической системы (ОЭС) Урала входят девять региональных энергетических систем. Они расположены на территориях двух федеральных округов – Уральского и Приволжского. ОЭС Урала включает следующие субъекты Российской Федерации: 1) Республику Башкортостан; 2) Удмуртскую Республику; 3) Ханты-Мансийский автономный округ (ХМАО); 4) Ямало-Ненецкий автономный

[4] *Автор: К. Б. Кожов.*

округ (ЯНАО); 5) Пермский край; 6) Кировскую область; 7) Оренбургскую область; 8) Свердловскую область; 9) Курганскую область; 10) Тюменскую область; 11) Челябинскую область. Необходимо отметить, что Тюменская энергосистема объединяет энергокомплексы Тюменской области, ХМАО и ЯНАО. На Урале режимами работы энергообъединения управляет филиал системного оператора — АО «СО ЕЭС» — Объединенное диспетчерское управление (ОДУ) Урала, а оперативно-диспетчерское управление энергосистемами субъектов РФ в составе ОЭС Урала осуществляется шестью региональными диспетчерскими управлениями (Башкирское, Оренбургское, Пермское, Свердловское, Тюменское и Челябинское). ОЭС Урала представляет собой сложную многокольцевую сеть 500 кВ, которая соединяется межсистемными линиями электропередачи 500 кВ с энергообъединениями Центра, Средней Волги, Сибири и Казахстана. Основной функционал энергосистем в ОЭС Урала заключается в обеспечении надежного и экономичного функционирования энергосистемы; регулировании частоты; выполнении ремонтов энергогенерирующего и сетевого оборудования; выработке и потреблении электроэнергии и др. Электростанции, подключенные к единой энергосистеме, обеспечивают электроснабжение таких потребителей электроэнергии субъектов РФ как промышленные предприятия (в том числе специализирующихся на добыче нефти и газа в ХМАО и ЯНАО), коммунально-бытовой сектор, транспорт, объекты инфраструктуры, а также социальные и коммерческие объекты.

По данным на 1 января 2026 года, суммарная установленная мощность электростанций ОЭС Урала составляет 53 783,7 МВт.

Характеристика баланса электрической мощности за 2024 год по субъектам РФ входящим в ОЭС Урала приведена в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Баланс электрической мощности субъектов РФ в зоне ОЭС Урала в 2024 году

Субъекты РФ	Электрическая нагрузка, МВт	Установленная мощность, МВт	Небаланс, МВт	Доля небаланса, %
Курганская область	746	706,21	-39,79	-5,33
Свердловская область	6 593,00	10 625,18	4 032,18	61,16

Ханты-Мансийский автономный округ – Югра	9 033,00	14 204,47	5 171,47	57,25
Ямало-Ненецкий автономный округ	1 489,00	1 066,67	-422,33	-28,36
Тюменская область без автономных округов	2 457,00	2 269,05	-187,95	-7,65
Челябинская область	5 377,00	5 842,93	465,93	8,67
Республика Башкортостан	4 269,00	5 586,07	1 317,07	30,85
Удмуртская Республика	1 595,00	701,47	-893,53	-56,02
Пермский край	3 539,00	7 831,40	4 292,40	121,29
Кировская область	1 187,00	963,30	-223,70	-18,85
Оренбургская область	2 338,00	3 837,50	1 499,50	64,14

Источник: Рассчитано автором по данным Федеральной службы государственной статистики (URL: https://rosstat.gov.ru/).

Как показано в таблице 1.1, наибольший дефицит мощности наблюдается в Удмуртской Республике, ЯНАО и Кировской области. Самый большой избыток – в ХМАО, Пермском крае и Свердловской области.

Отметим, что небаланс мощности в субъекте РФ зависит как от изменения установленной электрической мощности электростанций в нем, так и от величины электрической нагрузки. Проведем детальный анализ характеристик составляющих небаланса, чтобы оценить их потенциальное влияние на динамику электропотребления в региональном разрезе.

Рост установленной электрической мощности субъекта РФ может оказывать влияние на изменение электропотребления, но это влияние не всегда прямо пропорционально и зависит от множества факторов. Увеличение генерирующих мощностей само по себе не гарантирует автоматического роста электропотребления. Увеличение генерации в регионе создает потенциал для увеличения электропотребления, но ре-

ализация этого потенциала зависит от комплекса факторов: состояния экономики, структуры хозяйства, технологического уровня, инфраструктуры, климатических условий и регуляторной политики. Простое наращивание мощностей без учета этих аспектов не гарантирует роста потребления. Для эффективного использования генерирующих мощностей необходима комплексная стратегия, включающая развитие сетей, привлечение инвесторов, поддержку энергоэффективности и учет региональных особенностей.

Например, Свердловская область является избыточной с высоким положительным небалансом 4 032 МВт (61 %) по сравнению с Челябинской – 466 МВт (8,7 %), что можно классифицировать как самобаланс, и дефицитной Курганской областью – 39,8 МВт (-5 %). Значительная избыточность Свердловской области обусловлена рядом факторов: 1) исторически сложившаяся структура генерации и расположение на ее территории крупных электростанций (Рефтинская ГРЭС на угле, Среднеуральская ГРЭС на природном газе, Белоярская атомная электростанция и др.); 2) развитая электросетевая инфраструктура и структура энергосистемы позволяют области гибко перераспределять ресурсы между регионами Урала в зависимости от потребностей; 3) исторически так сложилось, что область является одним из крупнейших индустриальных центров России со значительной долей энергоемких отраслей экономики – металлургией, машиностроением, горной промышленностью, которые способствуют стабильному потреблению электроэнергии при относительно высоком уровне генерации. Можно также отметить, что в последние годы наблюдается снижение электрической нагрузки в Свердловской области, что связано с комплексом факторов, характеризующих происходящие изменения в структуре экономики региона. Ключевыми факторами стали спад в традиционных энергоемких отраслях (металлургии, добыче полезных ископаемых и в других традиционных промышленных секторах), структурный сдвиг в сторону менее энергоемких секторов. Свердловская область демонстрирует классическую картину структурной перестройки под давлением внешних и внутренних факторов. Традиционные центры роста замедляются в своем развитии и им на смену приходят новые секторы – машиностроение, химическая промышленность, пищевая промышленность и сфера услуг (научные исследования, операции с недвижимостью, гостиничный бизнес и др.). Новые отрасли менее энергоемкие по сравнению с традиционной промышленностью. Эти преобразования отражают адаптацию экономики к изменяющимся рыночным условиям

и внешним вызовам и способствуют снижению общей электрической нагрузки в регионе.

При этом нужно отметить, что рост электрической нагрузки субъекта РФ напрямую влияет на увеличение электропотребления в регионе. Это связано с тем, что электрическая нагрузка отражает совокупный спрос на электроэнергию со стороны всех потребителей – промышленности, населения, сферы услуг, транспорта и других секторов экономики. Увеличение нагрузки означает рост объемов производства, расширение бытовых потребностей, развитие инфраструктуры или появление новых энергоемких объектов, что приводит к повышению общего потребления электроэнергии. Важно учитывать, что динамика электропотребления может быть сложной и многогранной, и ее анализ требует учета множества взаимосвязанных факторов (Некрасов, 2022).

Характеристика динамики электропотребления за период 2021–2024 годов по субъектам РФ, входящим в ОЭС Урала, приведена в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Потребление электроэнергии по субъектам РФ в зоне ОЭС Урала, млн кВт.час

Субъекты РФ	2021 г.	2022 г.	2023 г.	2024 г.	Базисный индекс (2024 г. к 2021 г.)
Курганская область	3971,0	4007,7	4028,9	4399,6	1,108
Свердловская область	49156,5	48194,3	48398,9	46528,2	0,947
Ханты-Мансийский автономный округ – Югра	66267,5	69429,5	68486,4	64744,5	0,977
Ямало-Ненецкий автономный округ	15107,4	15312,7	15308,8	15439,6	1,022
Тюменская область без автономных округов	14197,0	14054,2	14334,7	14901,4	1,05
Челябинская область	38963,7	39380,0	39533,3	39583,1	1,016

Республика Башкортостан	26544,3	27556,3	28358,6	28505,7	1,074
Удмуртская Республика	9374,3	9493,3	9775,6	9872,6	1,053
Пермский край	25744,7	24213,8	25157,3	25727,6	0,999
Кировская область	7468,3	7635,3	7624,8	7697,8	1,031
Оренбургская область	19060,2	18271,3	18002,8	16882,3	0,886

Источник: Рассчитано автором по данным Федеральной службы государственной статистики (URL: https://rosstat.gov.ru/).

Анализ потребления электроэнергии на Урале показал, что в семи регионах Урала наблюдается рост базисного индекса, в остальных четырех – снижение. Так, например, в Свердловской области за рассматриваемый период произошло снижение электропотребления (базисный индекс 0,947), то есть объем потребления электроэнергии в текущем периоде оказался ниже, чем в базовом. Это, по-видимому, обусловлено снижением экономической активности, сокращением производства на предприятиях или закрытием промышленных объектов на территории области. В Свердловской области снижение производства в металлургии, а также изменения в структуре экономики (переход на менее энергоемкие виды деятельности, рост доли сектора услуг по сравнению с промышленностью) повлияли на уменьшение потребности в электроэнергии. Также на динамику электропотребления в области значительное влияние оказывают не только изменения в промышленном секторе, но и макроэкономические факторы (Петров, 2024).

Полученная динамика электропотребления и его структурные показатели позволяют выдвинуть гипотезу о диагностике с их использованием социально-экономического развития регионов Урала. Динамика структурных показателей электропотребления может служить важным индикатором социально-экономического развития регионов Урала. Электропотребление тесно связано с промышленным производством, инвестиционной активностью, уровнем жизни населения и состоянием инфраструктуры. Анализ этих показателей позволяет сделать выводы о тенденциях и проблемах в экономике региона. Рост электропотребления может указывать на расширение производства, реализацию инвестиционных проектов и повышение уровня жизни населения, тогда как снижение — на спад производства, структурные изменения в экономике или энергосберегающие меры. Структура потребления

(доля промышленности, населения, других секторов) позволяет оценить отраслевую специализацию и изменения в экономике региона. При этом регионы Урала имеют разные структуру экономики и ситуацию в ее развитии, что отражается динамикой электропотребления и величиной его базисных индексов. Отмечаемый спад электропотребления в ХМАО, имеющем энергоемкие производства в нефтяной отрасли, обусловлен снижением объемов добычи и прокачки нефти из-за влияния различных факторов – международных санкций против нефтегазового сектора РФ, участия в соглашении ОПЕК+, а также истощения месторождений, роста доли трудноизвлекаемых запасов, сокращения геологоразведочных работ и снижения эффективности традиционных методов повышения нефтеотдачи пластов. С другой стороны, отмечается бурный рост электропотребления в Курганской области и Пермском крае при недостаточном развитии региональной экономики. В Курганской области ключевыми причинами этого являются – рост активности промышленных предприятий и грузоперевозок, развитие обрабатывающей промышленности, повышение гособоронзаказа и наращивание выпуска импортозамещающей продукции. В Пермском крае наблюдается рост потребления электроэнергии на промышленных предприятиях и населением (в том числе применение электроотопления), а также увеличение потерь электроэнергии в электросетях при ее передаче в соседние регионы из-за высокого уровня износа этих сетей.

Для дальнейшего развития экономик регионов Урала необходимо развитие электрогенерирующего сектора. В настоящее время большая доля генерации электроэнергии на Урале производится на традиционных крупных тепловых электростанциях, работающих на газе и угле и на ядерном топливе (Белоярская АЭС в Свердловской области). Между тем мировой опыт, в частности, опыт Китая, показывает альтернативный путь развития электроэнергетики, основанный на использовании возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в основном это солнечные и ветровые электростанции. Ключевыми документами, регулирующими развитие ВИЭ в России, являются Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ «Об электроэнергетике»[5], Постановление Правительства РФ от 28.05.2013 № 449[6] и Постановление Правительства РФ от 17.02.2026

[5] Федеральный закон «Об электроэнергетике». Принят Государственной думой от 21.02.2003 г. № 35 – ФЗ. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/ (дата обращения: 08.05.2026).

[6] Постановление Правительства РФ от 28.05.2013 № 449 (ред. От 17.02.2026) «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке

г. № 153[7]. В России имеются программы развития ВИЭ, такие как механизм ДПМ ВИЭ (договор на поставку мощности), инициатива «ВИЭ 2.0», а также региональные программы. Например, в Свердловской области ВИЭ-проекты включены в региональную схему развития электроэнергетики на пятилетний период, по которой в 2024 году реализован пилотный проект солнечной электростанции в Артинском городском округе — первый на Среднем Урале.

Для строительства ветровых электростанций необходим достаточно высокий ветропотенциал, который отсутствует на Урале. Относительно российских солнечных электростанций можно сказать, что они уже построены в ряде регионов страны. Среди крупнейших СЭС можно выделить Амурскую СЭС (650 МВт) в республике Алтай, Аршанскую СЭС (115 МВт) в Калмыкии, Старомарьевскую СЭС (100 МВт) в Ставропольском крае, Дербентскую СЭС (102 МВт) в Дагестане и др. На Урале широкое развитие солнечная энергетика получила в Оренбургской области, в которой введено в эксплуатацию 18 объектов суммарной мощностью 370 МВт. В сентябре 2024 года в Свердловской области запущена Артинская СЭС мощностью 37,9 МВт.

Развитие солнечных электростанций в России сегодня актуально по нескольким ключевым причинам, связанным с экологическими, экономическими, технологическими и социальными аспектами. Солнечные электростанции не производят выбросов углекислого газа и парниковых газов, что способствует снижению загрязнения атмосферы. СЭС снижают зависимость от ископаемого топлива, которое используется на тепловых электростанциях. Развитие солнечной энергетики способствует появлению новых рабочих мест в сфере производства оборудования, строительства и обслуживания СЭС. Это может стимулировать экономическое развитие регионов, особенно тех, где есть потенциал для размещения солнечных электростанций (южные регионы, Поволжье, Урал, Сибирь и др.). Развитие солнечной энергетики стимулирует создание отечественных технологий и оборудования, что важно в условиях санкций и стремления к технологическому суверенитету. Несмотря на высокие первоначальные затраты на установку оборудования, солнечная энергетика имеет долгосрочную экономическую выгоду. Современные технологии позволяют снижать стоимость солнечных панелей и повышать их эффективность, что делает солнечную

[7] *Постановление Правительства РФ от 17 02 2026 г. № 153 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации» URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=504754 (дата обращения: 08.05.2026).*

энергию все более конкурентоспособной. Назрело время подвергнуть ревизии целесообразность газовой паузы. Альтернативная стоимость газа растет, и это говорит о необходимости оценки эффективности газовых электростанций и ВИЭ в современных условиях. С учетом этого в разделе 5.2 приведена расширенная методика, адаптированная для экономического сравнения различных солнечных электростанций как между собой, так и в сравнении их с газовыми электростанциями аналогичной мощности.

Следует подчеркнуть, что наращивание мощностей солнечных электростанций не является обязательным условием для поддержания экономического развития региона. Однако при грамотном формировании новой структуры генерирующих мощностей это решение позволяет эффективно учитывать требования программно-стратегических документов, расширяет возможности варьирования режимов загрузки энергосистемы и создает предпосылки для оптимизации территориального развития, а также снижения энергетической нагрузки на экономику регионов.

1.4. Западно-Сибирский нефтегазовый комплекс и его транспортная инфраструктура[8]

Регионы Западной Сибири характеризуются ярко выраженной специализацией по добыче, переработке нефти и газа, транспорту нефтегазового сырья и продуктов его переработки. Особенности транспортных потребностей нефтегазового комплекса таковы, что его потоки способствуют интеграции национальных транспортных систем, совмещением на крупных объектах транспортной сети межрегиональных и межгосударственных функций.

Особое место в расширении межгосударственных и внутрироссийских транспортно-экономических и других связей отводится формированию и планомерному развитию международных транспортных коридоров (МТК), являющихся инструментом интеграции как национальной, так и важным элементом создаваемой глобальной транспортной инфраструктуры (Резер, Прокофьева и др., 2010).

Основные мировые грузопотоки внешнеторговых и транзитных перевозок, концентрирующиеся на генеральных направлениях МТК по осям «Восток – Запад» и «Север – Юг», одновременно совпадают с

[8] *Автор: К. С. Чумляков.*

главными направлениями перевозок в межрегиональном сообщении внутри страны. В регионах, где добывается более двух третей нефти и газа страны, национальная транспортная инфраструктура в особенно высокой степени является и транспортной инфраструктурой международного значения (МТИ). Такие территории в силу геологических запасов, особенностей их освоения обладают особым ресурсным потенциалом развития, тем самым, выступают в роли стратегических макрорегионов. Эти макрорегионы должны обладать определенным типом транспортного обустройства, при котором будет возможна реализация их ресурсного потенциала, эффективное вовлечение в национальное хозяйство и мирохозяйственную интеграцию.

Мировая интеграция транспортной инфраструктуры стратегического макрорегиона РФ отвечает как политическим, так и экономическим интересам страны. Так, включение транспортной системы РФ в общемировые и региональные транспортно-коммерческие коммуникации будет способствовать привлечению дополнительных транзитных грузопотоков на транспортные коммуникации страны, ускоренному развитию транспортной инфраструктуры регионов, привлечению дополнительных иностранных инвестиций и созданию комфортных условий ведения внешнеторговых операций.

Одной из приоритетных национальных задач в настоящее время является развитие транспортных коммуникаций в направлении стран Азиатско-Тихоокеанского региона (АТР). Во-первых, АТР на сегодняшний день является одним из главных регионов развития мировой экономики. Во-вторых, наиболее вероятно, возможные расширения экономических взаимосвязей между Азией и Европой будут сконцентрированы в регионах восточной части России, обладающих большим транзитным и экспортно-импортным потенциалом и внутриполитической стабильностью.

Признаков устойчивого и тем более радикального изменения пространственных пропорций в ближайшей перспективе не предвидится. Связано это с добычей полезных ископаемых в восточной части России, объемы добычи в восточных округах традиционно высокие[9]. Дальнейшее повышение доли этих округов РФ в суммарном объеме добычи полезных ископаемых на ближайшие годы видится гарантированным. С учетом прогнозируемой высокой динамики товаропотоков со странами АТР, как экспортно-импортных, так и транзитных, развитие су-

[9] *Россия в цифрах. 2020: Крат. стат. сб. // Росстат – М., 2020. – 550 с.*

ществующей транспортной инфраструктуры Сибири, Дальнего Востока России становится наиболее вероятным (Мачерет, 2013). В перспективе это привлечет в Россию дополнительные транзитные грузопотоки из Казахстана, Китая, Японии и других стран Азии. Кроме того, вовлечение Урала, Западной и Восточной Сибири, Дальнего Востока России в глобальную транспортную сеть мира, интенсификация международного транзита и создание физических условий для конкурентного притока капиталов из Японии, Китая и стран Юго-Восточной Азии предусмотрены стратегией развития железнодорожного транспорта РФ[10].

При таких предпосылках Уральский федеральный округ (УрФО), являясь одним из крупнейших макрорегионов-экспортеров углеводородов, а также благодаря своему срединному экономико-географическому положению, получает возможность использовать специфику современного периода развития инфраструктуры международных экономических связей на Евразийском континенте (Позиционирование…, 2016).

Вопросы, посвященные исследованиям срединных (серединных) макрорегионов, отражены в многочисленных научных трудах как экономистов, так и экономико-географов. Такие исследования продолжаются и в настоящее время (Акбердина, Сергеева, 2018; Большие…, 2023; Глумов, 2007; Маергойз, 1974; Проникая…, 2016; Срединный…, 2009; Тонышева, Кузьмина, 2019; Управление… , 2018). В общем смысле под срединным понимается макрорегион, расположенный посередине какой-либо территории более высокого порядка, например, страны или континента. Срединное экономико-географическое положение благоприятствует развитию торговли и бизнес-инфраструктуры, способствует развитию производственных функций, получающих экономию на транспортных перемещениях сырья и продукции (Акбердина, Сергеева, 2015).

Учитывая эти территориальные обстоятельства и то, что Россия является связующим звеном между Европой и Азией, можно предположить, что эффективность решения поставленной макроэкономической задачи будет определяться развитием транспортно-логистической инфраструктуры исследуемого макрорегиона. На дальнейших этапах существенно возрастет роль ближайшего Сибирского (СФО), а затем и Дальневосточного (ДВФО) федеральных округов, занимающих лидирующие позиции по доле транспортной составляющей в валовом регио-

[10] *О Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года. Официальный сайт ОАО «РЖД». URL: https://company.rzd.ru/ru/9353/page/105104?id=155&ysclid=m8ybp07rs1302274962 (дата обращения: 01.04.2025).*

нальном продукте в РФ – 11 % и 20 % соответственно, а также имеющих выходы на Китай. Для сравнения: этот показатель в среднем по России равен примерно 7 %[11].

С целью обоснования стратегических преимуществ одного из социально развитых и крупнейших макрорегионов-экспортеров углеводородов в РФ, а также перспектив его развития с учетом геоэкономических приоритетов выполнен анализ внешнеэкономической деятельности УрФО (Петров, Чумляков и др., 2020).

УрФО является одним из социально развитых и экономически диверсифицированных макрорегионов РФ. Территориально располагается в пределах Урала и Западной Сибири, в его составе находятся Курганская, Свердловская, Тюменская и Челябинская области, а также Ханты-Мансийский и Ямало-Ненецкий автономные округа. Располагаясь на перекрестке железнодорожных магистралей и сибирских рек, УрФО имеет все благоприятные условия для своего дальнейшего устойчивого развития. Правомерно заключить, что макрорегион уже сейчас обладает достаточно развитой сетью маршрутов, которые могут быть задействованы в транзитных евроазиатских направлениях (Чумляков, 2016).

Одним из основных индикаторов экономической деятельности региона, который охватывает все особенности региональной структуры производства товаров и услуг, транспортные перемещения сырья и продукции, а также диверсифицированность отраслевой экономики, является валовой региональный продукт (ВРП). ВРП по областям УрФО представлен на рис. 1.1.

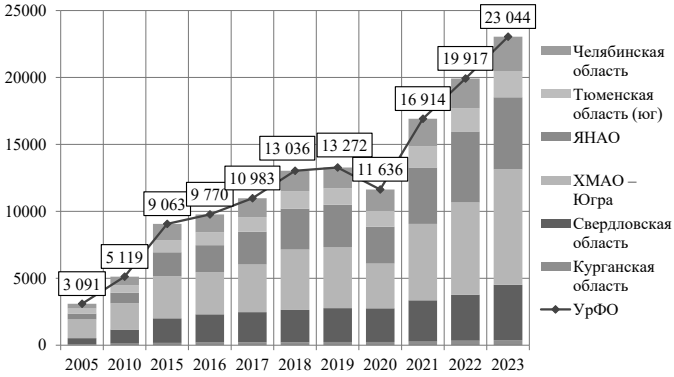
Как видно, по сравнению с 2005 г. ВРП вырос более чем в семь раз. Наличие такого устойчивого роста показателя и развития экономики в целом свидетельствует о том, что УрФО стабильно увеличивает свои макроэкономические показатели, такие как экспорт, импорт и внешнеторговый оборот.

Макрорегион имеет стабильные внешнеэкономические связи, что свидетельствует о большой инвестиционной привлекательности, развитом производстве, высоком уровне развития технологий и многих других, связанных между собой, параметрах. Динамика внешней торговли УрФО представлена на рис. 1.2.

---

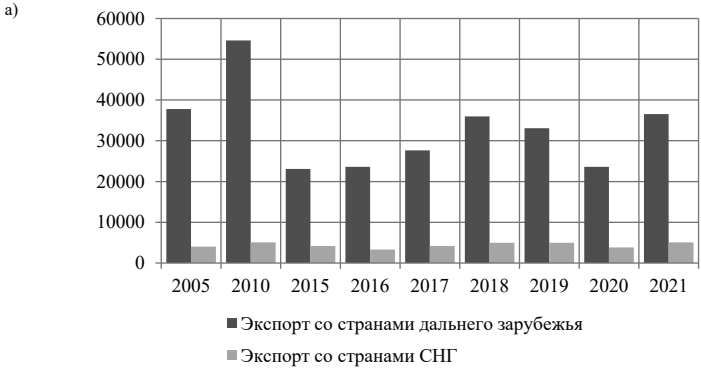
[11] Стратегия социально-экономического развития Дальнего Востока и Байкальского региона на период до 2025 года // Министерство регионального развития Российской Федерации. URL: http:// www.minregion.ru/activities/territorial_planning/strategy/federal_development/346/ (дата обращения: 23.12.2013).

При закрытости в настоящее время официальной статистики внешней торговли России динамика внешней торговли УрФО проанализирована до 2021 г.[12]



Источник: составлено автором на основе данных Росстата[13]

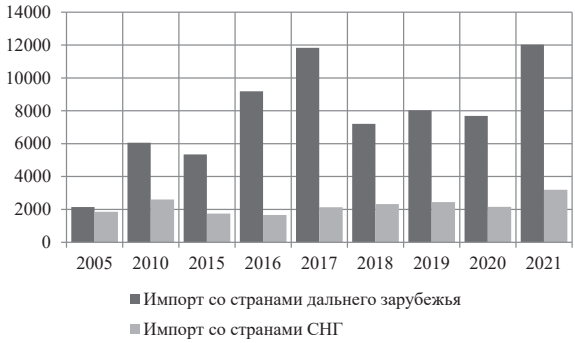
Рис. 1.1. Валовой региональный продукт по областям УрФО, млрд руб.



[12] *Во исполнение поручения Правительства Российской Федерации с февраля 2022 года были временно приостановлены публикация и распространение подробных данных статистики внешней торговли товарами Российской Федерации.*

[13] *Регионы России. Социально-экономические показатели. Федеральная служба государственной статистики. URL: https://rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204?ysclid=m8prlq5y7i586396205 (дата обращения: 26.03.2025).*

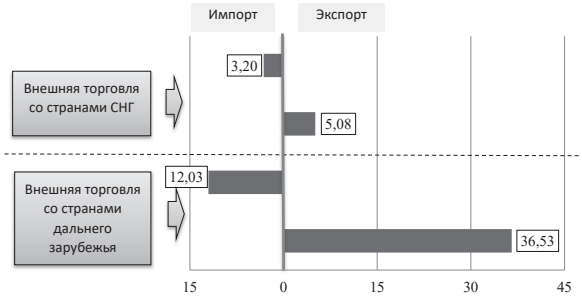
б)



Источник: составлено автором на основе данных Росстата[14] и Уральского таможенного управления[15]

Рис. 1.2. Показатели внешней торговли УрФО, млн долл.: а) экспорт; б) импорт.

Географическая структура международной торговли представляет собой распределение потоков экспорта и импорта, формируемых по территориальному или организационному признаку. Сравнение значений экспорта/импорта УрФО со странами СНГ и дальнего зарубежья за 2021 г. представлено на рис. 1.3.



Источник: составлено автором на основе данных Росстата[16] и Уральского таможенного управления[17]

Рис. 1.3. Внешняя торговля УрФО со странами СНГ и дальнего зарубежья в 2021 г., млрд долл. США.

[14] Регионы России. Социально-экономические показатели. 2023. Стат. сб. / Росстат. – М., 2023. – 1126 с.

[15] Внешняя торговля УрФО // Уральское таможенное управление. Официальный сайт. URL: https://utu.customs.gov.ru/folder/143373 (дата обращения: 26.03.2025).

[16] Регионы России. Социально-экономические показатели. 2023. Стат. сб. / Росстат. – М., 2023. – 1126 с.

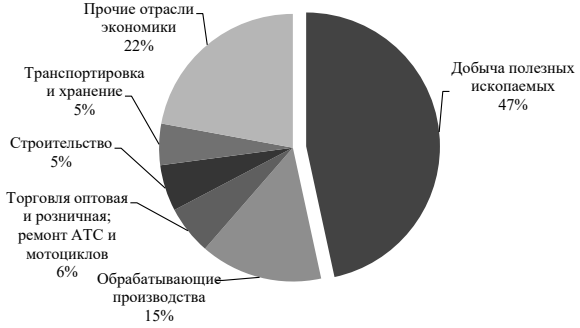
[17] Внешняя торговля УрФО // Уральское таможенное управление. Официальный сайт. URL: https://utu.customs.gov.ru/folder/143373 (дата обращения: 26.03.2025).

Основными партнерами макрорегиона в сфере торгового сотрудничества являются страны дальнего зарубежья. Так, за 2021 г. внешнеторговый оборот со странами дальнего зарубежья составляет 48,56 млрд долл. США, что на 83 % выше, чем со странами СНГ.

Среди стран дальнего зарубежья существенное значение для внешнеэкономической деятельности как макрорегиона, так и страны в целом, имеют страны Европейского союза. Одновременно с этим, с каждым годом доля стран Европы во внешнеторговом обороте сокращается в пользу стран АТР. В основном экспортно-импортные сделки носят создавшийся конъюнктурный характер, преимущественно в сферах добычи полезных ископаемых и обрабатывающих производств. Так, доля стран АТР в общем объеме экспорта российских энергетических ресурсов к 2035 году достигнет 50 %[18].

Говоря про страны ближнего зарубежья, взаимная торговля макрорегиона в большей степени сконцентрирована на торговле с Казахстаном и Беларусью. Между УрФО и этими странами установлено долгосрочное сотрудничество в сферах развития транспортно-логистических комплексов, транспортных коридоров, туризма и т. д. Ключевой областью экономического взаимодействия макрорегиона является топливно-энергетический комплекс, что играет важную роль и для экономики стран-партнеров.

Отраслевая структура валовой добавленной стоимости УрФО в 2021 г. представлена на рис. 1.4.



Источник: составлено автором на основе данных Росстата[19]

Рис. 1.4. Отраслевая структура валовой добавленной стоимости УрФО в 2021 г.

[18] *Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р.*
[19] *Регионы России. Социально-экономические показатели. 2023. Стат. сб. / Росстат. – М., 2023. – 1126 с.*

Добыча полезных ископаемых занимает первое место в отраслевой структуре валовой добавленной стоимости (47 %), на втором месте – обрабатывающие производства (15 %). Это связано с наличием уникальных и крупнейших месторождений нефти и газа в пределах Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, с историческим развитием горнозаводской промышленности и размещением металлургических предприятий и заводов на территории Среднего и Южного Урала (Степанов, 2017).

Хотя ключевую и долговременную специализацию экономики макрорегиона определяет нефтегазовая отрасль, структура валовой добавленной стоимости также представлена такими сферами экономики, как торговля, строительство, транспортировка и хранение. Прочие сферы в отраслевой структуре имеют менее 3 % каждая и в сумме составляют 22 %.

Несмотря на то, что основным экспортным товаром являются углеводородные ресурсы, перспективы образования новых мирохозяйственных связей и расширения международных интеграционных процессов открывают для российского экспорта новые несырьевые рынки (Андреева, Тарасов, 2020). Поэтому на будущее прогнозируется одновременное наращивание объемов экспорта и углеводородов, и продовольственных товаров в страны, обладающие большим потенциалом развития.

УрФО в экономическом пространстве выделяется многоотраслевой промышленностью, относится к территориям с высокой концентрацией топливно-энергетических, минерально-сырьевых и других природных ресурсов, расположен на территории промышленно развитого Урала, имеет все благоприятные условия для своего хозяйственного развития. В макрорегионе к отраслям специализации относятся топливная, добывающая, химическая промышленности, производство строительных материалов, а также электроэнергетика, без которой невозможно развитие ни одной отрасли.

На территории УрФО (и частично СФО) расположена Западно-Сибирская нефтегазоносная провинция, являющаяся одной из крупнейших нефтегазодобывающих территорий РФ. Она обладает наивысшим углеводородным потенциалом и содержит наибольшие среди всех провинций России запасы нефти, газа и газового конденсата. Извлекаемые запасы нефти составляют 63 % от общероссийских, а газа – 69 %. Оценка начальных суммарных извлекаемых ресурсов (НСР) превышает суммарную оценку НСР всех остальных провинций России на 18 % по

нефти и на 34 % по газу. Всего же в Западной Сибири открыто более 900 месторождений, основные месторождения (Уренгойское, Бованенковское, Самотлорское, Усть-Тегусское) расположены в пределах Тюменской области (Ямало-Ненецкий и Ханты-Мансийский автономные округа, Уватский район). Также месторождения имеются в Томской, Омской, Свердловской, Новосибирской областях и Красноярском крае (Брехунцов, Нестеров и др., 2019; Брехунцов, Нестеров и др., 2024).

Территория по объективным причинам является стратегической для мировой интеграции, является многоотраслевой системой по совокупности хозяйственных связей промышленных комплексов, производственной инфраструктуры и региональных транспортных путей, интегрирующих макрорегион с остальной частью страны и другими государствами. В условиях дальнейшего расширения масштабов деятельности и образования новых хозяйственных связей, развитие транспортной инфраструктуры особенно важно.

Транспортные системы исследуемого макрорегиона (в границах Западной Сибири) представлены всеми видами магистрального транспорта общего пользования. Железнодорожный транспорт представлен Свердловской, Западно-Сибирской, Южно-Уральской и Северной железными дорогами. Протяженность Свердловской железной дороги составляет 7 200 км (по Пермскому краю – 2 050 км, по Свердловской области – 3 300 км и по Тюменской области – 1 850 км). Западно-Сибирская железная дорога пролегает в основном по территориям Омской, Новосибирской, Кемеровской, Томской областей и Алтайского края РФ, а также частично по территории Казахстана. Протяженность Южно-Уральской железной дороги составляет 4 806 км (по Челябинской области – 2 137 км, по Оренбургской – 1 695 км, по Курганской – 741 км). Северная железная дорога обслуживает ЯНАО и является главным транспортным конвейером, стабильно обеспечивающим потребности Северо-Запада России в перевозках. Эксплуатационная длина железнодорожных путей общего пользования субъектов Западной Сибири представлена в таблице 1.3.

Южная территория макрорегиона обладает достаточно развитой сетью автомобильных дорог, обеспечивающих не только региональные и межрегиональные транспортно-экономические связи, но и дорожное сообщение с зарубежными странами, такими как Казахстан, Китай и Монголия. Основными центрами транспортной логистики являются крупнейшие промышленные и транспортные узлы – Екатеринбург и Челябинск. В свою очередь северная территория макрорегиона харак-

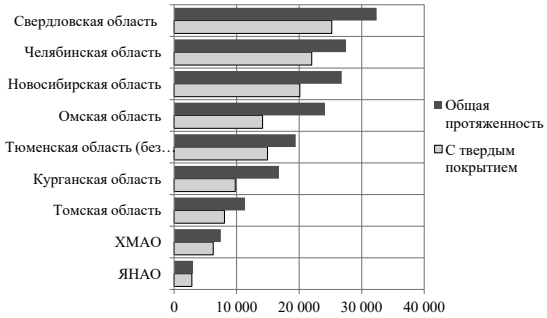
теризуется низкой транспортной связностью и ограниченной транспортной доступностью, здесь в основном функционируют зимние автомобильные дороги регионального значения. Протяженность автомобильных дорог общего пользования областей макрорегиона представлена на рисунке 1.5.

Таблица 1.3

Эксплуатационная длина железнодорожных путей общего пользования субъектов Западной Сибири за 2023 г.

Наименование субъектов	Эксплуатационная длина железнодорожных путей общего пользования, км
Курганская область	746
Свердловская область	3511
Тюменская область	2442
в том числе:	
ХМАО	1084
ЯНАО	481
Челябинская область	1795
Новосибирская область	1505
Омская область	735
Томская область	344

Источник: составлено автором на основе данных Росстата[20].



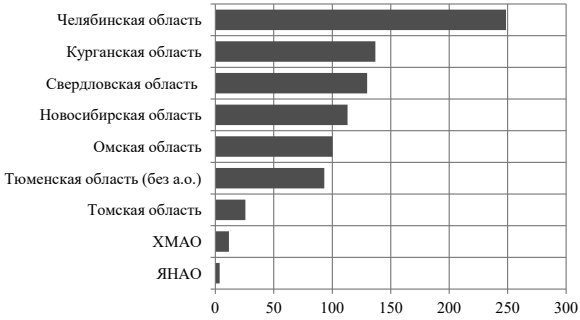
Источник: составлено автором на основе данных Росстата[21]

Рис. 1.5. Протяженность автомобильных дорог общего пользования по субъектам Западной Сибири за 2023 г., км.

[20] Регионы России. Основные характеристики субъектов Российской Федерации. 2024: Стат. сб. / Росстат. – М., 2024. – 852 с.

[21] Росстат. Федеральная служба государственной статистики. Официальный сайт. URL: http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Prot_avtodor_obsch_2023.xlsx (дата обращения: 03.04.2025).

Значительная часть северной территории макрорегиона лишена транспортной инфраструктуры, и ряд районных центров не располагает круглогодичной связью с дорожной сетью страны. Например, отдельные участки автодорожной инфраструктуры ЯНАО не связаны между собой и не имеют выхода за пределы автономного округа, поскольку сеть автомобильных дорог ЯНАО находится на стадии формирования. Плотность автомобильных дорог общего пользования с твердым покрытием по областям макрорегиона представлена на рисунке 1.6.



Источник: составлено автором на основе данных Росстата[22]

Рис. 1.6. Плотность автомобильных дорог общего пользования с твердым покрытием по субъектам Западной Сибири за 2023 г., км дорог на 1 000 км^2 территории.

Связь центральных и северных районов с промышленно освоенным югом обеспечивают речные бассейны таких крупных рек Западной Сибири, как Обь и Иртыш. В период летней навигации водный транспорт является основным видом транспорта на севере макрорегиона. Помимо рек, для судоходства используются внутренние водные пути, включая Обскую, Тазовскую, Гыданскую губы Карского моря.

На реках Обь, Иртыш, Пура, Тавда расположены крупные речные порты Тюмень, Сургут, Салехард, Ханты-Мансийск, Надым и др. Иртыш и Обь – две крупнейшие реки, образующие одну из главных речных магистралей России, связывающую крупнейшие субъекты Западной Сибири. Через речные порты обеспечивается снабжение населения и предприятий Севера продуктами питания, промышленными товарами, топливом, стройматериалами и др. товарами первой необходимо-

[22] *Росстат. Федеральная служба государственной статистики. Официальный сайт. URL: http://ssl.rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Prot_avtodor_obsch_2023.xlsx (дата обращения: 03.04.2025).*

сти. Протяженность внутренних водных путей по субъектам Западной Сибири представлена в таблице 1.4.

Таблица 1.4

Протяженность внутренних водных путей по субъектам Западной Сибири

Наименование субъектов	Протяженность, км	Из нее с гарантированными габаритами судового хода, км
Свердловская область	1 173,0	–
Тюменская область	11 834,0	5 059,0
в том числе:		
ХМАО	6 281,0	1 650,0
ЯНАО	4 088,0	2 742,0
Новосибирская область	647,0	402,0
Омская область	1 474,0	1 133,0
Томская область	5 195,0	2 301,0

Источник: составлено автором на основе данных Министерства транспорта[23]

Во время навигации (продолжительность до пяти месяцев) осуществляются перевозки нефти, газового конденсата, леса из Тюменской области в другие регионы России и за ее пределы судами класса «река – море». Крупнейший перевозчик в системе речного флота Западной Сибири – ПАО «Обь-Иртышское речное пароходство». Кроме того, на территории ЯНАО расположено около 1 тыс. км водных акваторий с морскими режимами судоходства с выходом на важнейшую в Российской Арктике водную артерию – СМП. Навигация в автономном округе продолжается не более 3–4 месяцев, а в Обской губе – с середины июля до середины сентября (два месяца).

На основании вышеизложенного, в макрорегионе сложилась ситуация крайне неравномерной обеспеченности территории транспортной инфраструктурой, в том числе формирующей транспортно-логистические коридоры международного значения. Во многом из-за того, что развитие транспортной инфраструктуры в макрорегионе, особенно на его северных территориях, происходило и происходит в соответствии с

[23] *Внутренние водные пути. Министерство транспорта Российской Федерации. Росморречфлот. Официальный сайт. URL: https://morflot.gov.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/rechnoy_flot/vvt/ (дата обращения: 04.05.2024).*

развитием нефтегазового комплекса. Как правило, появление и совершенствование транспортных путей определяется их необходимостью для освоения месторождений нефти и газа. Такие тенденции сохраняются и в настоящее время. Поэтому для обеспечения эффективного использования транспортно-транзитного (и ресурсного) потенциала макрорегиона большое значение имеет комплексное развитие транспортной системы в совокупности с развитием топливно-энергетического комплекса Западной Сибири (добывающей промышленности, перерабатывающих производств и магистрального трубопроводного транспорта).

В Западной Сибири сосредоточено большое количество крупных центров нефтяной и газовой промышленности (Чумляков, 2015). Крупнейшим нефтяным центром является ХМАО, где добывают 80 % нефти всего Западно-Сибирского макрорегиона. Крупномасштабная добыча нефти ведется на месторождениях Ватинское, Федоровское, Самотлорское, Усть-Булыкское, Покуровское и др. Вторым по объему добычи нефти в макрорегионе считается ЯНАО, там же в основном добывают и природный газ. К числу крупнейших газовых месторождений Западной Сибири относятся Уренгойское, Заполярное, Медвежье и Ямбургское.

В промышленные комплексы по переработке углеводородов входят нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ) и предприятия газонефтехимической отрасли, выпускающие бензин, дизельное топливо, авиакеросин, мазут, метанол и серную кислоту, а также предприятия по производству синтетического каучука, резинотехнических изделий, пластмасс и т. д. На территории макрорегиона в настоящее время действуют два крупных НПЗ – Омский и Антипинский, а также ряд мини-НПЗ.

Одним из самых современных нефтеперерабатывающих заводов России и одним из крупнейших в мире является ООО «Газпромнефть-Омский НПЗ». Установленная мощность предприятия – порядка 20,5 млн тонн нефти в год. Предприятие специализируется на выпуске различных видов нефтепродуктов и продукции, востребованных на внутреннем и внешнем рынках. В рамках масштабной программы модернизации на заводе совершенствуются существующие и вводятся в эксплуатацию новые производственные объекты, это позволяет повышать качество выпускаемых нефтепродуктов, снижать трудовые и энергетические затраты на производство продукции, сокращать экологическую нагрузку на окружающую среду[24].

[24] *Омский НПЗ. Флагман отечественной нефтепереработки / АО «Газпромнефть-ОНПЗ». Официальный сайт. URL: https://onpz.gazprom-neft.ru/company/about/ (дата обращения: 15.04.2025).*

Другим крупным НПЗ Западной Сибири является АО «Антипинский НПЗ» (ныне – Тюменский нефтеперерабатывающий завод). Предприятие было основано в 2004 г. и до последнего времени являлось крупнейшим нефтеперерабатывающим предприятием на территории Тюменской области, где сконцентрирована основная часть российских запасов нефти (64 %) и природного газа (91 %). Территориально Тюменский НПЗ расположен в центре УрФО с развитой логистической инфраструктурой, подключенной к магистральным нефтепроводам (общей мощностью более 7,5 млн тонн в год) и продуктопроводу дизельного топлива (мощностью 2,3 млн тонн в год) ПАО «Транснефть». Мощности завода позволяют полностью обеспечивать тюменским топливом потребителей в УрФО, где традиционно сосредоточены компании, широко потребляющие продукты нефтепереработки.

По официальным данным за 2014 г., на предприятии было произведено более 6,2 млн тонн различной продукции, реализованной во всем макрорегионе и смежных с ним округах, а в 2016 г. после ввода в эксплуатацию установки глубокой переработки мазута глубина переработки достигла 98 %. Тем не менее, несмотря на высокие технологические показатели, в 2019 г. предприятие приостановило свою деятельность из-за недостатка оборотного капитала, а после банкротства Тюменский НПЗ был продан на конкурсных торгах. Однако современное руководство компании в лице ООО «РИ-ИНВЕСТ» не планирует остановку завода, причем имеется перспективное направление развития в плане более глубокой нефтепереработки[25]. Также в планах значится выход на начальную проектную мощность по переработке в размере 7,5 млн т нефти в год[26].

ТЭК Западной Сибири также представлен мини-НПЗ, к ним относятся НПЗ мощностью до 1 млн т/год нефти. В отличие от крупных производств по переработке нефти и газового конденсата, для функционирования мини-НПЗ не требуется развитая инфраструктура, обслуживание огромной территориальной зоны в связи с необходимостью дальней транспортировки сырья и продукции. Из мини-НПЗ, функционирующих на территории макрорегиона, отметим УПН и ПБ ПАО «Сургутнефтегаз», ООО «Пурнефтепереработка», УПН ТПП «Когалымнефте-

[25] ООО «РИ-ИНВЕСТ». Официальный сайт. URL: https://www.ri-invest.ru/company (дата обращения: 15.04.2025).

[26] Руководство Русинвеста не планирует остановку Антипинского НПЗ / Официальный сайт газеты и сетевого издания «Агентство нефтегазовой информации». URL: https://www.angi.ru/news/2892445-Руководство%20Русинвеста%20не%20планирует%20остановку%20Антипинского%20НПЗ/ (дата обращения: 15.04.2025).

газ», ООО «Красноленинский НПЗ», ООО «Стрежевской НПЗ», НПЗ ТПП «Урайнефтегаз» и др.

Крупнейшим в России предприятием по переработке газового конденсата и крупнейшим предприятием ХМАО по переработке углеводородного сырья является Сургутский завод стабилизации конденсата, основанный в 1984 г. Завод осуществляет переработку нефтегазоконденсатной смеси, производит в ассортименте моторные топлива, сжиженные углеводородные газы, авиакеросин и другую продукцию.

Из предприятий газонефтехимической отрасли в макрорегионе представлены газоперерабатывающие заводы (ГПЗ), предприятия по переработке газового конденсата, а также нефтехимические предприятия.

Территориально газоперерабатывающие предприятия расположены в ХМАО и ЯНАО. Продукцией заводов, большинство из которых принадлежат ПАО «СИБУР Холдинг», по одному – ПАО «Сургутнефтегазу» и ООО «ЛУКОЙЛ-Западная Сибирь», являются сухой отбензиненный газ, направляемый в систему магистрального транспорта газа, в дальнейшем перерабатываемые широкая фракция легких углеводородов (ШФЛУ) и стабильный газовый бензин. На некоторых предприятиях в качестве продукции производятся пропан-бутановая техническая смесь, либо отдельные фракции углеводородов. Перспективы развития газоперерабатывающей отрасли связаны с активным вовлечением попутного нефтяного газа месторождений с небольшими запасами, удаленными от мест расположения действующих ГПЗ. Опыт строительства небольших ГПЗ имеют такие страны, как Канада и США.

К предприятиям, перерабатывающим газовый конденсат, действующим на территории макрорегиона, относятся Уренгойский завод по подготовке конденсата к транспорту, Сургутский завод стабилизации конденсата компании ООО «Газпром переработка», объединенные единой технологической связью в своеобразный газоконденсатный кластер сырьевой направленности, а также Пуровский завод по переработке конденсата компании ПАО «НОВАТЭК». Предприятия обеспечивают деэтанизацию сырого нестабильного конденсата, добываемого на газоконденсатных месторождениях, а также производят ряд продуктов: сжиженные углеводородные газ, стабильный конденсат, ШФЛУ, авиакеросин и прочее.

Строительство газоперерабатывающих предприятий на территории Западной Сибири, обеспечивших углеводородным сырьем нефтехимическую отрасль, дало стимул к вводу новых нефтехимических предприятий в Омской, Томской и Тюменской областях.

Так, в г. Тобольске в 2014 г. был запущен масштабный проект по расширению транспортной инфраструктуры – магистральный продуктопровод «Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская ГНС – Тобольск-Нефтехим», соединивший три территории – ЯНАО, ХМАО и юг Тюменской области. Данный инфраструктурный проект, общей протяженностью продуктопровода 1 100 км, направлен на развитие единой технологической цепочки от добычи углеводородного сырья до его переработки на территории России. Ранее, в 2013 г., компанией ПАО «СИБУР Холдинг» в г. Тобольске был введен комплекс дегидрирования пропана и производства полипропилена мощностью 0,5 млн тонн. Также осуществляется производство пиролиза крупнейшего российского комплекса «ЗапСибНефтехим» (ПАО «СИБУР Холдинг»). Основной продукцией предприятия является полиэтилен и полипропилен различных марок, включая сополимеры, ряд таких продуктов, как бутадиен (основа для производства каучуков и шин), метил-трет-бутиловый эфир (высокооктановый экологический компонент топлива). Побочные продукты пиролиза становятся сырьем для получения вторичной энергии. В настоящее время весь тобольский комплекс проходит этап модернизации по увеличению мощности и повышению экологичности.

Помимо тобольского комплекса, на территории макрорегиона сформированы локальные Новоуренгойский и Омский нефтегазохимический комплексы (НГХК), объединившие в себе ряд предприятий, связанных единым технологическим циклом, выпускающих изделия для медицины, электротехники, машиностроения и т. п.

ТЭК Западной Сибири также представлен многочисленными гидроэлектростанциями и теплоэлектростанциями, работающими на мазуте, газе и угле, а также каменноугольными и буроугольными бассейнами – Кузнецким, Обь-Иртышским и Северо-Сосьвинским. Крупнейшими гидроэлектростанциями являются Сургутская, Уренгойская и Нижневартовская.

Становление и дальнейшее развитие нефтехимических предприятий на территории Западной Сибири связано с возникновением новых добывающих центров на Среднем Приобье. Так, на территории Западной Сибири предусмотрено создание Западно-Сибирского нефтегазохимического кластера, который будет ориентирован на переработку сырья из попутного газа нефтяных месторождений и нестабильного газового конденсата газоконденсатных месторождений ХМАО и ЯНАО. Для обеспечения кластера сырьем планируется постепенное расшире-

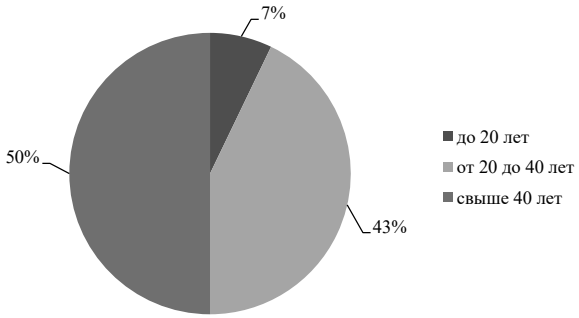
ние действующих и строительство новых перерабатывающих заводов в макрорегионе.

Традиционно отрасли ТЭК связаны с магистральным трубопроводным транспортом. Между тем система магистральных трубопроводов Западной Сибири имеет свои особенности и ограничения (Чумляков, Чумлякова, 2015). Доля трубопроводов в транспортной системе макрорегиона значительна, что объясняется большим экспортным потенциалом нефте- и газодобывающей отрасли.

Современная система магистрального транспорта углеводородов из Западной Сибири представляет собой совокупность подсистем: магистральных газопроводов, магистральных нефтепроводов и формирующуюся сеть продуктопроводов. Система магистральных газопроводов Западной Сибири начала развиваться с 1967 г. после ввода в эксплуатацию первого магистрального газопровода «Игрим – Серов», предназначенного для подачи газа из Пунгинского и Игримского месторождений (Крылов, Рафиков и др., 1990). Надежная сырьевая база, включающая месторождения Медвежье, Уренгойское, Ямбургское и др., обеспечила темпы развития Западной Сибири как экспортера природного газа. В настоящее время система газотранспортных магистралей макрорегиона входит в число основных звеньев Единой системы газоснабжения (ЕСГ). Сеть магистральных газопроводов обеспечивает поставку газа с северных территорий промышленным центрам Урала, европейской части страны и на экспорт, в страны ближнего и дальнего зарубежья.

Особенность газотранспортных магистралей Западной Сибири – объединение в одном технологическом коридоре газопроводов с тем или иным рабочим давлением. Связано это с оснащением магистралей газоперекачивающими агрегатами российского и импортного производства, имеющими разные значения рабочего давление (Крылов, Рафиков и др., 1990). Газопроводы, введенные до 1974 г., оснащались отечественными компрессорными агрегатами с рабочим давлением 5,48 МПа. В связи с необходимостью транспорта все более значительных объемов газа с 1974 г. магистральные газопроводы стали оснащать компрессорами зарубежного производства с рабочим давлением 7,45 МПа. Позже отечественная промышленность освоила выпуск компрессорных агрегатов нового поколения, полностью вытеснив поставки из-за рубежа.

Сейчас многие газопроводы Западной Сибири, введенные в эксплуатацию в прошлые годы, требуют ремонта. На рисунке 1.7 представлена возрастная структурная диаграмма газопроводов Западной Сибири на начало 2025 г.



Источник: составлено автором на основе (Чумляков, Чумлякова, 2015) [27].

Рис. 1.7. Структура магистральных газопроводов Западной Сибири по продолжительности эксплуатации.

Формирование ЕСГ как единого комплекса происходило в 70–90-е годы XX века, и сейчас потребность в ремонтных работах во многом превышает возможности производственных подразделений, а объемы восстановительных работ сопоставимы с объемами работ по строительству новых газопроводов. Более 90 % всех магистральных газопроводов Западной Сибири составляют газопроводы старше 20 лет (рис. 1.7).

Требования бесперебойной работы газотранспортных магистралей обусловливают высокие требования к их надежности. Ремонтные производственные подразделения компании ПАО «Газпром» ежегодно осуществляют меры по продлению срока работы трубопроводов и компрессорного оборудования. Проблема обеспечения надежности комплексная и включает ремонтные и диагностические мероприятия, а также замену наиболее изношенных участков трубопроводов. Чтобы продлить эксплуатацию на максимально возможный срок, режим работы каждого трубопровода устанавливается с учетом его состояния в режиме реального времени.

Развитие газотранспортных магистралей Западной Сибири обусловлено потребностями страны в природном газе, разработкой и вводом в эксплуатацию новых газовых месторождений северных территорий, побережья и шельфа Арктической зоны России.

Программами (проектами) комплексного освоения месторождений полуострова Ямал и прилегающих акваторий предусмотрено освоение групп месторождений – Бованенковской, Тамбейской, Южной,

[27] *Чумляков К. С., Чумлякова Д. В. Развитие системы магистральных трубопроводов в пространстве инфраструктурного освоения Западной Сибири // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – № 5(60). – С. 18 –22.*

Приямальской. Общее количество месторождений – 18, уникальные по запасам месторождения – Бованенковское и Харасавэйское28. Начало промышленной разработки залежей Бованенковского и Харасавэйского месторождений запланировано на 2025 –2026 гг.

Для обеспечения транспортировки газа с полуострова Ямал в ЕСГ России будет использоваться система магистральных газопроводов «Бованенково – Ухта» и «Бованенково – Ухта-2», введенных в эксплуатацию в 2012 –2014 гг. и 2017 г. Доставка материально-технических ресурсов на объекты Бованенковской группы месторождений осуществляется по железной дороге «Обская – Бованенково» протяженностью более 500 км[29].

Мегапроектом «Ямал» предусмотрено дальнейшее развитие системы магистральных газопроводов от месторождений Обской и Тазовской губ (Каменномысское-море, Северо-Каменномысское, Обское, Чугорьяхинское, Антипаютинское, Тота-Яхинское), Харампурского и Новопортовского месторождений, а также сети газопроводов на территории Гыданского полуострова. Очередность ввода газопроводов будет синхронизирована с развитием объемов добычи газа на месторождениях макрорегиона.

С сокращением объемов перекачки газа по территориям стран-транзитеров, в первую очередь Украины и Белоруссии, связано развитие новых экспортных направлений магистральных трубопроводов макрорегиона. На территории Западной Сибири до 2035 г. предполагается расширение газотранспортных мощностей и строительство новых магистральных газопроводов.

Принципиально иной диверсифицированный маршрут транспортировки российского газа с территории Ямала и Западной Сибири в страны АТР, прежде всего в Китай, будет реализован по магистральному газопроводу «Сила Сибири-2» (ранее «Алтай»), который имеет два варианта – прямой на территорию Китая и через Монголию.

Сегодня в рамках реализации проекта проведены предметные технико-экономические исследования маршрутов поставок, завершена стадия обоснования инвестиций. Согласно достигнутым договоренностям, объем поставки на полное развитие составит 50 млрд м3 в год, запуск газопровода из России в Китай ожидается ориентировочно в 2033 г.[30]

---

[28] Мегапроект «Ямал» [Электронный ресурс] // ПАО «Газпром». Официальный сайт. URL: https://www.gazprom.ru/projects/yamal/ (дата обращения: 12.05.2025).

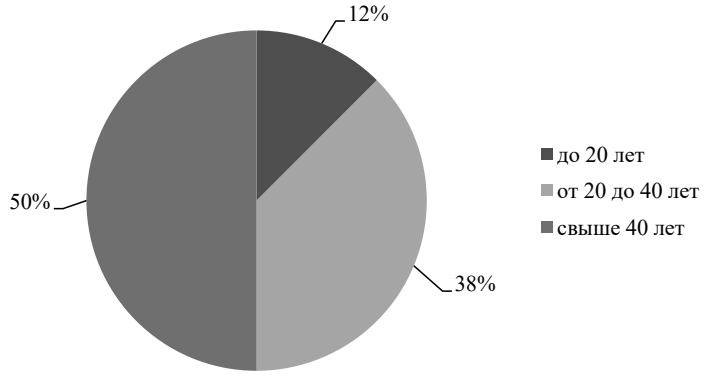
[29] Бованенковское месторождение // ПАО «Газпром». Официальный сайт. URL: https://www.gazprom.ru/projects/bovanenkovskoye/ (дата обращения: 12.05.2025).

[30] Запуск «Силы Сибири–2» в Китай ожидают в 2033 году // EADaily. URL: https://eadaily.com/ru/news/2024/03/14/zapusk-sily-sibiri-2-v-kitay-ozhidayut-v-2033-godu (дата обращения: 12.05.2025).

Помимо экспортных поставок и выхода на новые перспективные рынки, проект обеспечит газификацию Новосибирской и Томской областей, Алтайского края и Республики Алтай, ЯНАО и ХМАО. Реализация проекта окажет существенное влияние на экономическое развитие указанных территорий и будет способствовать повышению их инвестиционной привлекательности.

Магистральные нефтепроводы Западной Сибири начали вводиться в эксплуатацию одновременно с освоением нефтяных месторождений Среднего Приобья. Первый нефтепровод «Шаим – Тюмень» был введен в эксплуатацию в декабре 1965 г. Он обеспечивал транспорт нефти от месторождений Шаимской группы на Омский нефтеперерабатывающий завод, далее от Тюмени нефть транспортировалась по железной дороге. После освоения месторождений ХМАО, ЯНАО и Томской области была сформирована сеть магистральных нефтепроводов Западной Сибири, интегрированная в магистральные нефтепроводы нефтедобывающих районов европейской части России.

Сейчас на территории Западной Сибири функционируют 16 магистральных нефтепроводов[31]. На рисунке 1.8 представлена структурная диаграмма магистральных нефтепроводов Западной Сибири по продолжительности их эксплуатации на начало 2025 г., она во многом сходна с возрастной диаграммой газопроводов.



Источник: составлено автором на основе (Чумляков, Чумлякова, 2015).

Рис 1.8. Структура магистральных нефтепроводов Западной Сибири по продолжительности эксплуатации.

[31] *Схема нефтепроводов Сибири и Дальнего Востока России. URL: http:// https://nemiga.info/eto-interesno/shema_nefteprovodov-v-sibiri.htm (дата обращения: 12.05.2025).*

Следует упомянуть, что в Западной Сибири магистральные нефтепроводы распространены неравномерно. Ограничения в инфраструктурном развитии влияют на нежелание нефтяных компаний выходить на освоение новых месторождений в северной части ЯНАО. Между тем с началом разведочного бурения на севере ЯНАО и в Красноярском крае, по решению Правительства РФ, был построен новый магистральный нефтепровод «Заполярье – Пурпе – Самотлор», являющийся самым северным магистральным нефтепроводом в России. Существующие магистральные нефтепроводы макрорегиона обеспечивают подачу сырья на нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ) РФ, экспортную транспортировку нефти потребителям ближнего и дальнего зарубежья. Для того чтобы нефть из северных регионов направлялась не только на Запад, но и на Восток, необходимо строительство новой трубопроводной системы.

Трубопроводная транспортировка газового конденсата на территории Западной Сибири находится на стадии формирования, централизованной системы транспорта легких углеводородов не существует. Вся сеть трубопроводов представлена конденсатопроводами и продуктопроводами отдельных компаний, ведущие компании – ПАО «Газпром», ПАО «НОВАТЭК» и ПАО «СИБУР Холдинг».

Компания ПАО «Газпром» располагает сетью трубопроводов по перекачке нестабильного газового конденсата. От Ямбургского и Уренгойского нефтегазоконденсатных месторождений (НГКМ) нестабильный газовый конденсат транспортируется по двухниточному трубопроводу на Уренгойский завод подготовки конденсата к транспорту (ЗПКТ), далее деэтанизированный нестабильный газовый конденсат поступает на Сургутский завод стабилизации конденсата (ЗСК). Окончательное формирование газоконденсатного кластера завершится с вводом Новоуренгойского газохимического комплекса.

Система транспорта нестабильного конденсата ПАО «НОВАТЭК» берет начало от Юрхаровского месторождения и продолжается до Пуровского ЗПК. В этот же трубопровод поступает ШФЛУ от Самбургского месторождения и Восточно-Уренгойского лицензионного участка. Для транспортировки ШФЛУ и смеси пропан-бутана технической от Пуровского завода переработки конденсата компанией построен магистральный продуктопровод «Южно-Балыкский газоперерабатывающий комплекс (ГПК) – Тобольский нефтехимический комплекс (НХК)». В районе г. Ноябрьска в трубопровод предусмотрена подача ШФЛУ от Губкинского ГПК, Муравленковского газоперерабатывающего пред-

приятия, Вынгапуровского газоперерабатывающего завода. Возможна подача в продуктопровод ШФЛУ от Белозерного и Нижневартовского ГПК в районе Южно-Балыкского ГПК.

С начала освоения новых месторождений углеводородов в ЯНАО и на севере Красноярского края ПАО «СИБУР Холдинг» запустило новый магистральный продуктопровод «Пуровский ЗПК – Южно-Балыкская ГНС – Тобольск» от Пуровского завода по переработке конденсата до Тобольск-Нефтехим (ООО «СИБУР Тобольск»). Трубопровод предназначен для транспортировки ШФЛУ и переработки на Тобольском НХК. Таким образом, ПАО «НОВАТЭК» совместно с ПАО «СИБУР Холдинг» обеспечивает транспортировку ШФЛУ для переработки в Тобольском НХК.

Следует отметить, что нефтяная компания «Роснефть» в лице оператора АО «Роспан интернешнл» построила железнодорожный терминал для отгрузки ШФЛУ на станции Коротчаево. Этот терминал предназначен для приема, хранения и отгрузки газового конденсата и позволяет отгружать около 3 млн тонн газового конденсата в год. Стабильный конденсат подается на нефтеперекачивающую станцию НПС-2 нефтепровода «Заполярье – Пурпе».

Итак, магистральный трубопроводный транспорт газа и нефти, в отличие от транспорта конденсата, в границах Западной Сибири имеет четкие централизованные структуры, способные обеспечить транспортировку углеводородов от мест добычи к потребителям внутреннего рынка России и для экспортных поставок. Основные технические проблемы – износ системы магистрального транспорта газа и нефти, неразвитость магистрального транспорта нефти, отсутствие единой системы транспорта газового конденсата.

Подводя итоги, УрФО (в том числе в границах Западной Сибири) обладает уникальным стратегическим потенциалом долгосрочного инфраструктурного развития. Все приведенные в пользу этого аргументы имеют одну общую основу – ресурсную базу северных территорий макрорегиона, обеспечивающую деятельность предприятий добывающей промышленности, перерабатывающих производств, всех видов транспорта и в настоящее время, и на долгосрочную перспективу. Богатейшая ресурсная база, последовательное формирование крупных центров газо- и нефтедобычи, создание необходимых МТК и их ответвлений – все это позволит организовать в макрорегионе новый центр экспортно-импортных поставок, ориентированный как на страны Европы, так и на АТР.

Несмотря на высокий ресурсно-производственный потенциал, экономическое развитие макрорегиона в настоящее время тормозит существующая, недостаточно развитая транспортная инфраструктура. Серьезное препятствие состоит в том, что без развития железнодорожного, автомобильного и воздушного сообщений невозможно масштабное промышленное освоение северных территорий макрорегиона. Доставка значительных объемов грузов на Ямал осуществляется только морским транспортом в период летней навигации через порт Харасавэй. В связи с этим многие промышленные предприятия работают в убыток, причем их производственные мощности не загружены в полном объеме.

В дополнение, современные темпы развития мировой торговли значительно опережают возможности транспортно-логистической инфраструктуры макрорегиона по пропускной способности, впрочем, такая особенность характерна и для РФ в целом. Сдерживающими факторами являются сложные климатические и метеорологические условия.

Тем не менее формирование транспортно-логистической инфраструктуры исследуемого макрорегиона не завершено. Перспективным для РФ видится использование в полной мере мощного транспортного потенциала – включение транспортной и производственной инфраструктуры северных регионов (ЯНАО, ХМАО) и южных областей в систему МТК. Это даст возможность выхода на рынки АТР, Западной Европы и США, независимо от каких-либо ограничений других транзитных стран. Вовлечение экспортно-импортных грузопотоков, формируемых на территории макрорегиона, в международные транспортные сообщения, во многом будет способствовать более интенсивному развитию территории и привлечению на нее еще больших объемов международного транзита, в том числе контейнерных грузов. Через наземные МТК будет обеспечена связь между СМП и индустриально развитыми областями макрорегиона.

В ходе создания современной системы транспортной инфраструктуры УрФО, в том числе международного значения, предлагается увязать ее развитие с ТЭК (добывающей промышленностью, перерабатывающими производствами, магистральным трубопроводным транспортом). Взаимосвязанное развитие обеспечит эффективное использование как ресурсного, так и транспортно-транзитного потенциала макрорегиона.

При условии скоординированного развития инфраструктуры реализация приоритета приведет к увеличению экономического роста

смежных отраслей экономики и потокообразующего значения самого макрорегиона, укрепит экономические связи с центральной Россией и соседними странами.

Масштабная диверсификация существующих маршрутов и инфраструктуры позволит эффективнее осуществлять транспортировку груза. Максимальное использование инфраструктурных объектов для обеспечения внутренних, внешнеторговых и транзитных перевозок обеспечит эффективное функционирование производства и рынка, снижение транспортных издержек, создаст необходимые предпосылки для вовлечения макрорегиона России в международное производственное, информационное, транспортное и торговое пространство. Вместе с тем крупные транспортно-инфраструктурные проекты помогут избежать рецессии, возникшей вследствие факторов геополитической напряженности в мире.

Таким образом, в соответствии с приведенными приоритетными направлениями мировая интеграция транспортной инфраструктуры УрФО (в том числе в границах Западной Сибири) позволит значительно снизить существующие региональные инфраструктурные ограничения, а развитие генерирующих мощностей создаст необходимые условия для реализации уникального транспортно-географического потенциала стратегического макрорегиона, обеспечив активное социально-экономическое развитие территории.

ГЛАВА 2. ТЕРРИТОРИАЛЬНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ КОМПЛЕКСЫ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГОПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЦИКЛОВ НА ПРИМЕРЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ОТРАСЛИ УРАЛА В КОНТЕКСТЕ «ОТРАСЛИ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ – СИСТЕМЫ ИНФРАСТРУКТУРЫ»[32]

2.1. Теоретико-методологические подходы и их приложение к оценке влияния циклов добычи и переработки руд на развитие и размещение производительных сил региона

В данном разделе для анализа развития производительных сил макрорегионов как в плане оценки качественных сдвигов в развитии хозяйства административно-территориальных образований, так и в части выделения наиболее эффективных полигонов пространственно-экономического, в том числе и транспортно-инфраструктурного развития, использовался подход, базирующийся на изучении процессов и тенденций на значительных временных лагах в ключевых энергопроизводственных цепочках или циклах (ЭПЦ), формирующих базис макро- или межрегиональных территориально-производственных комплексов (ТПК). Целесообразность такого подхода была обусловлена тем, что при совмещении на карте схем размещения таких ЭПЦ с выделенными пространственными ядрами можно выделять и совокупную зону их наилучшего совмещения, то есть пространственно оптимального размещения ТПК с выделением размера его «ядра» или базового полигона, а, стало быть, и эффективного экономического пространства макрорегиона в целом.

Для этого был использован разработанный предварительно оригинальный инструментарий, позволяющий качественно оценивать состояние и сдвиги в развитии каждого ЭПЦ, его прогрессивность на основе анализа используемых в нем предметов труда (материалов), видов и источников энергии (топлива) и технико-технологических средств производства (Литовский, 2023, с.16 –43).

К сожалению, в постперестроечный период по причине разрушения плановой экономики разработке таких подходов должного внимания не уделялось, что привело к существенному комплексному и иерархическому ослаблению развития национального хозяйства, его суверенности в мировой хозяйственной системе, что показали и специально

[32] *Автор: В. В. Литовский.*

выполненные по проблеме на уральском материале исследования за последние 30 лет (Литовский, 2024, с. 501–507).

В итоге базовые императивы выделения приоритетов при отборе наиболее инновационных и перспективных технологий оказались существенно искаженными. А проблема целостного развития ТПК и регионов с должными эффектами синергии осталась не решенной.

Для решения задач размещения инфраструктуры на современном этапе достаточно рассмотрения эволюции и пространственного развития главенствующих в иерархии ключевых региональных ЭПЦ. Таких, как было показано (Литовский, 2023, с.16–43), в Уральском экономическом районе насчитывается 6–7, а с учетом и сопряженных территорий УрФО – 9–10 ЭПЦ.

Более детальное их изучение показало, что одной из важнейших проблем современных ЭПЦ для выстраивания из них территориально-промышленных комплексов (ТПК) является то, что они не только не комплементарны, но и зачастую находятся в жесткой конкуренции друг другу. Обусловлено это тем, что в условиях рыночной экономики ЭПЦ образуют несбалансированный «конгломерат» с противоречиями из-за источников сырья, энергии или средств труда, что не способствует должному использованию потенциала и целостному развитию территорий. По этой причине в данном исследовании поиск был направлен и на выявление решений по гармонизации обрабатывающего и добывающего звеньев ЭПЦ горно-металлургических комплексов, связывание их в комплементарную коэволюционирующую экосистему ТПК.

Для хозяйства Уральского макрорегиона с его традиционной спецификой на разработку металлорудных ресурсов для ЭПЦ добычи и обработки черных, цветных, драгоценных или редких металлов такая гармонизация имеет особенное значение. Как выявил анализ таких ЭПЦ (Литовский, 2023, с.16–43; с.126–142; Влияние…, 2024; Alekseeva, 2023; Bystrova, 2024; Алексеева и др., 2024), для их связывания в ТПК необходимо более скоррелированное развитие добывающих (сырьевых), энергетических и специализированных производственных составляющих, с допустимой их универсализацией и модульностью для более гибкого многофункционального использования в региональных или страновых целях.

Для выявления ядра экономического пространства макрорегиона и его ТПК более детально такая проблема изучалась на примере как базового для промышленности Урала железорудного ЭПЦ, так и ЭПЦ подотраслей цветной металлургии и химии. Технологические системы металлургии за три века своей эволюции вывели металлургические циклы да-

леко за рамки исторически доминантного пирометаллургического цикла производства металлов. В частности, было установлено, что со второй половины XX в. и особенно в последние десятилетия пирометаллургические технологии с различными печами дополнились технологиями внепечной металлургии с перспективой технологий прямого восстановления металлов в струйно-эмульсионных агрегатах. Эволюция рудно-металлургических циклов имеет тенденцию все большего использования природоподобных технологий, то есть технологий получения сплавов, в некотором роде подобных процессам генеза минералов в недрах – с меньшими, чем в пирометаллургическом цикле температурами и затратами энергии.

В таблице 2.1 сведено описание технологической эволюции производств некоторых подотраслей цветной металлургии и химии в последовательности технико-технологических укладов.

Таблица 2.1

Матрица (ij) с критериальными параметрами (i, j=1,2…N) для оценки уклада ЭПЦ и статуса технологий переработки руд в новое и новейшее время (XVIII – XXI вв.)

1. Место, время	**2. Вид энергии средства труда (добыча/ обработка соли)**	**3. Вид топлива для средства труда**	**4. Предмет труда /продукт**	**5. Средства труда (добыча/ обработка соли), технологии, транспорт**
11 (XV –XIX вв.) Прикамье (до 1870 г.)	Механическая энергия / тепловая, (12)	Твердое природное (дерево) + воздух-13	рассолы/поваренная соль с глубин до 20–40 м (14)	Соляные варницы / (ручные буровые средства печи, црены), выварочные, гужевой, водный (15)
21 (с 1750 гг. – XIX в.) Соль-Илецк	Гидромеханич.+ паровая энергия (22)	Пар + твердое природное топливо (уголь, газ) -23 На Дедюхинском заводе Любимова в течение 1889 г., топки для каменного угля *заменены топками с двумя перекрестными струями газов*	+Поверхностная и приповерхностная каменная соль открытых выработок /поваренная соль (24) *На Березниковском заводе Любимова действовали две паровые машины, что служили для выкачки рассола, а также для выкатки соли в амбары*	Раскопы, карьеры (*механические+ живая тяга/* соле- и рассоло-подъемные установки, с 1870 г. –железные трубы, гидронасосы, буровые средства, дробилки (грохота) паровые машины), карьерные (25), *гужевой,водный*

31а С 1890-х – по 1960 гг. XX в. Соль-Илецк	+ Химическая энергия (32)	Жидкое -33 *(мазут, бензин, etc.)*	Каменная соль подземных выработок/дробленая пищевая и техническая соль	Рудники, камерные выработки, шахтные подъемники, горнопроходческие комбайны, транспортеры, дробилки (грохота), *шахтные, гужевой+ж/д*
31б С 1890-х – по 1960 гг. Березники, Соликамск	+ химическая энергия (32)	Жидкое -33 (мазут, бензин, etc.)	+калийные соли/калийные удобрения (с 1934 г.)+галит/поваренная, технич. соль (с 1942 г.)+ карналлит (с 1943 г.) (34)	+ двигатели внутреннего сгорания (35) *С 1963 г. – фабрика флотационного обогащения (первая в СССР),* Шахтные, *галургическая, флотационная*, транспорт: водный, ж/д
41 С 1960-х	+ Электромагнитная энергия (42)	Газообразное -43 (природный газ) *негативно – (взрывоопасно)*	Калийные+магниевые /удобрения, магний (44)	+электротехника / электроустановки (45) *Не основные*
51 (XX –XXI)	+Электрохимическая энергия (52)	Электрохимич. (электролиты) -53 *Электроды не исп.*	Комплексные минералы/ порошки, (54)	+электролитические (55) *Не задействованы*
61 (XX –XXI)	+Энергия плазмы +ядерная энергия (62)	Плазменные смеси + радиоактивные вещества (63) *Не используются*	Продукты ядерного синтеза и распада (64)	Плазмогенераторы+ Ядерные реакторы (65) *Не задействованы*

В черной металлургии наиболее продвинутые технологии добычи руд и получения из них железа относятся к пятому уровню. Помимо классических пирометаллургических (с восстановлением металлов при высоких температурах), в XX в. получили развитие гидро- и химико-металлургические (с восстановлением из солей в растворах), а также электрометаллургические технологии, получаемые при электролизе раствора или расплава (рис. 2.1).



Рис. 2.1. Доля сталеплавильных процессов в мире[33]

Выполненный анализ по внедрению на Урале технологий прямого получения металла из железосодержащих материалов с непрерывным металлургическим процессом разливки стали, активно развивающиеся в мире, показал (см. раздел 2.3), что на Урале они пока отстают от мировых лидеров на несколько десятилетий.

Для анализа процессов и тенденций в пространственной локализации металлургических и горнодобывающих предприятий ЭПЦ черных металлов была исследована специфика и последовательность вовлечения различных осваиваемых железорудных ресурсов, их пространственное распределение в регионе и глубинное в недрах, важные для анализа факторы их доступности и технологической востребованности, а для комплексной оценки их потенциала и взаимосвязи с месторождениями других руд и металлов важные аспекты генезиса в рамках современных естественно-научных представлений, а также технических и технологических возможностей добычи, транспортировки и переработки руд.

В экономическом аспекте выбор ЭПЦ железорудной отрасли был продиктован тем, что железо является не только ключевым из индустриальных элементов, как видно, из рисунка 2.2 (вторым после *Al*), но и по причине, что оно концентрирует возле себя большую «экосистему» из интрузий и вторичных отложений связанных с ним «железолюбивых» (сидерофильных) элементов (*Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni; Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh; Re, Os, Ir* и *Pt*). При этом важно, что в экосистему входят не только черные металлы (ванадий, хром и марганец), но и востребованные современной металлургией цветные металлы (титан, скандий,

[33] *Прямое восстановление железа. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Прямое_восстановление_железа*

ванадий, никель), а также благородные металлы платиновой группы. Не менее важно и то, что железорудные залежи в виде «шляп» или кепроков сопрягаются с медьсодержащими, залегающими глубже со своими «меделюбивыми» (халькофильными) элементами, включая золото и серебро. Таким образом, их пространственное распределение предопределяет и сопряжение медных руд, а также благородных элементов, то есть втройне повышает геоэкономическую ценность территории, а соответственно и размещение там инфраструктуры.

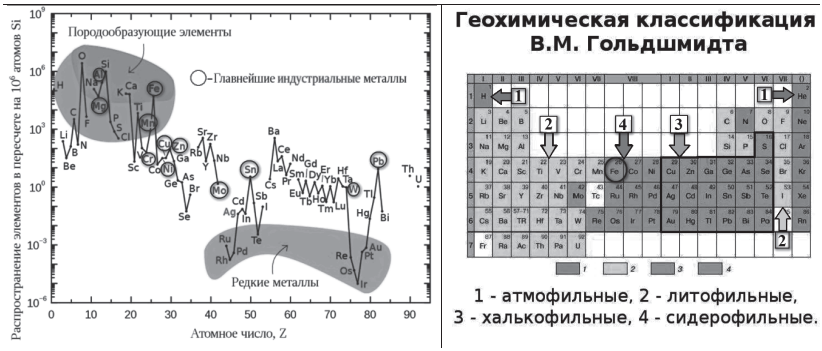


Рис. 2.2. Распространение железа в коре в пересчете на 10^6 атомов кремния и геохимическая классификация В. М. Гольдшмидта[34]

Для России, которая по запасам железных руд занимает первое место в мире, это важно и актуально вдвойне. Еще более важно это в свете новых естественно-научных представлений, где генезис элементов недр рассматривается не только как геохимический, но и ядерно-физико-химический процесс, а, стало быть, обращение к природоподобным технологиям может дать более экономичные технологические решения.

2.2. Минерально-сырьевая специфика современного освоения железорудного потенциала Урала и его влияние на приоритеты энергопроизводственных циклов производства черных металлов

На Урале ныне первостепенное значение придается освоению потенциала титаномагнетитовых руд, доля которых в добыче желез-

[34] *Распространенность элементов в земной коре. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Редкоземельные_элементы#/media/Файл:Elemental_abundances.svg; https://mypresentation.ru/documents_6/0ab5f5945d23a7d654acfef1468ceabc/img18.jpg*

ных руд на Урале составляет 76,8 % (Бузмаков, 2022). За ними следуют магнетитовые (12,5 %), сидеритовые (6,2 %), железо-хромо-никелевые (2,2 %) и, наконец, бурожелезняковые месторождения – 1,9 % (титаномагнетиты). В обратном порядке эти процентные соотношения характеризует степень их разработанности на сегодняшний день, доступность освоения применяемыми средствами производства. Учитывая это и то, что титаномагнетитовые месторождения ныне могут разрабатываться открытым способом, их размещение на Урале было изучено более детально.

В ходе исследования было установлено, что магматогенные титаномагнетитовые и скарно-магнетитовые железорудные месторождения, составляющие в ресурсе железных руд РФ до 15 %, ныне являются ключевыми, что нашло отражение в Государственных докладах «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации» последних лет (Государственный доклад..., 2021; 2022), а для Урала и Свердловской области это имеет особое значение, так как бóльшая их часть (рис. 2.3) сосредоточена у нас (Государственный доклад..., 2022, с.111).



Рис. 2.3. *Основные месторождения железных руд и их распределение между субъектами РФ*[35]

[35] *Государственный доклад..., 2021, с.113.*

В основном на Урале в настоящее время эксплуатируются легкообогатимые ванадийсодержащие титаномагнетитовые руды трех ключевых месторождений: Собственно-Качканарского, Гусевогорского (Свердловская область) и Суроямского (Челябинская область), где добыча руды возможна открытым способом. Установлено также, что месторождения эти, хотя и бедны на железо (его среднее содержание там не превышает 17 %), зато скомпенсированы промышленно значимыми количествами ванадия (0,5–1,5 % V_2O_5) и титана (около 2 % TiO_2). Недостаток же содержания железа восполним при обогащении магнитной сепарацией. Таким образом, в концентратах содержание железа доводится до нужных 62 %, что для его извлечения делает их также промышленно пригодными.

В менее крупных, но более насыщенных железом уральских месторождениях (с содержанием от 25 до 45 %) скарно-магнетитового типа Высокогорской и Гороблагодатской групп (Свердловская область), руды легко обогащаемы железом посредством магнитной сепарации. Наконец, в еще более богатых железом рудах (от 29 до 52 %) Бакальской группы месторождений (Шиханское, Ново-Бакальское, Северо-Западный Иркускан, Петлинское и др.; Челябинская область) гетит-гидрогетитового генезиса, эффективными являются комбинированные (магнитно-гравитационные и магнитно-флотационные способы обогащения). Таким образом, пространственное распределение и потенциал наиболее значимых сегодня железорудных месторождений в регионе известны и активно осваиваются.

В частности, около 80 % железных руд на Урале ныне добываются на Гусевогорском месторождении. Для увеличения объемов добычи в 2021 г. в пяти километрах от него начата также разработка и Собственно-Качканарского месторождения комплексных титаномагнетитовых руд. Открытым способом с 4,5 млн тонн добычи руды в 2021 г. к концу 2024 г. по исходному плану там планировалось нарастить до 13 млн т. Конечным продуктом переработки руд месторождения предполагаются железистые окатыши и агломерат. К сожалению, расчетные сроки отработки запасов этих месторождений ограничиваются 15 годами.

Из других титаномагнетитовых месторождений на Урале к разработке также подготавливается Суроямское титаномагнетитовое месторождение (Челябинская область) (Государственный доклад.., 2022, с.119) (в 2025 г. его разработку планировало начать ООО «ЛЕКС ЭЛЕКТА», чтобы в 2026 г. выйти на объем в 3 млн т). Таким образом, ныне в числе приоритетных для освоения значатся, прежде всего, титано-

магнетитовые месторождения Среднего и Южного Урала. Их ресурсный потенциал значителен, но для переработки таких руд требуются и все более совершенные металлургические технологии. На это, в частности, указывают дисбалансы прироста между добычей за последние 10 лет железных руд (10 % в целом в России) и производства из них товарной железорудной продукции (5 %).

Географически ныне прирост добычи руд на железорудных месторождениях происходит в основном за счет ввода в эксплуатацию титаномагнетитовых месторождений руд в азиатской части страны (Забайкалье, Дальний Восток, Урал). Однако при общем объеме добычи железных руд в России в 370 млн т, выпуск из них железорудной продукции (концентратов и аглоруды) ограничен 116 млн т. Таким образом, лишь треть из них становится должной продукцией современной переработки: железорудными концентратами, окатышами и горячебрикетированным железом (ГБЖ). В частности, окатышей из концентратов производится не более 50 млн т. Объем же металлизированных окатышей и ГБЖ, полученных прямым восстановлением железа (ПВЖ[36]) из мелкодисперсных рудных фракций руды на порядок меньше. Неравномерно распределена по территории РФ и добыча самой руды, что приводит к существенным логистическим издержкам доставки ее к обрабатывающим предприятиям. При 48 действующих в стране месторождениях более половины добычи (54 %) приходится на район Курской магнитной аномалии (КМА). Из-за такой диспропорции в географии месторождений и концентрации металлургических предприятий Урал и Западная Сибирь хронически испытывают дефицит традиционного сырья и обеспечены им из региональных ресурсов на 5–15 лет (Государственный доклад…, 2022, с.118).

Институциональной основой добычи железных руд (около 80 %) в стране являются четыре вертикально-интегрированные холдинга: АО Холдинговая компания «Металлоинвест», ПАО «Северсталь», ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» («НЛМК») и «Евраз Груп С.А.», обладающие полным циклом производства – от добычи и переработки руды до выпуска металлопродукции. Они же эксплуатируют и две трети запасов распределенного фонда недр. Из этих

---

[36] Прямое восстановление железа (ПВЖ), или в англоязычной литературе DRI (Direct Reduced Iron) – это восстановление его из железной руды или окатышей с помощью газов (CO, H_2, NH_3), твердого углерода, газов и твердого углерода совместно. Его особенностью является то, что процесс осуществляется при температуре около 1 000 °C, пустая рудная порода не ошлаковывается, а примеси кремния, марганца, фосфора и серы не восстанавливаются, благодаря чему металл получается чистым.

ключевых компаний более трети отечественного железорудного сырья обеспечивает рынку «Металлоинвест», разрабатывающий месторождения КМА. ПАО «Северсталь», ПАО «НЛМК» и холдинг «ЕвразГруп С.А.» по размеру производственных мощностей уступают ему более чем вдвое. С Уралом из них в наибольшей мере связан холдинг «ЕвразГруп С.А.», который включает в себя два базовых горнообогатительных комбината – АО «ЕВРАЗ «Качканарский ГОК» и АО «ЕВРАЗ ЗСМК». Первое из них разрабатывает крупнейшее Гусевогорское и Собственно-Качканарское месторождения титаномагнетитовых руд, обеспечивая 90 % добычи холдинга (14,4 млн т агломерата и окатышей из железо-ванадиевого концентрата в 2021 г.). В обрабатывающем цикле оно связано с Нижнетагильским металлургическим комбинатом, куда на переработку отправляет железорудное сырье. Второе предприятие (АО «ЕВРАЗ ЗСМК), добывающее оставшиеся 10 % руды холдинга, эксплуатирует месторождения Кемеровской области, а металлы производит в Новокузнецке на Западно-Сибирском металлургическом комбинате.

Из других, связанных с Уралом холдингов, следует отметить ПАО «Мечел», которое в качестве добывающего звена использует ПАО «Коршуновский ГОК» с его Коршуновским и Рудногорским месторождением в Иркутской области, а в качестве перерабатывающего – Челябинский металлургический комбинат.

Холдинговой компанией неполного цикла в регионе является Научно-производственное региональное объединение (НПРО) «Урал», спецификой деятельности которого является не выпуск конечной металлопродукции, а торговля железными рудами через свой торговый дом «Руда Урала». Это обеспечивает добывающим компаниям, входящим в холдинг, более активное продвижение их продукции к конечным потребителям – без лишних посреднических звеньев, с экономией времени и стоимости доставки за счет логистики и собственной инфраструктуры. В Свердловской области в горнодобывающий актив этого холдинга включены: ОАО «Высокогорский ГОК», разрабатывающий месторождения Высокогорской и Гороблагодатской групп скарно-магнетитовых руд, Естюнинское месторождение в 8 км к северо-западу от г. Нижний Тагил, АО «Богословское рудоуправление», эксплуатирующее Песчанское месторождение, а в Челябинской области – ООО «Бакальское РУ», эксплуатирующее Ново-Бакальское, Шиханское, Петлинское месторождения, а также Северо-Западный склон горы Ирускан.

Важным достоинством НПРО «Урал» является наличие у него собственного научно-внедренческого предприятия «Пиромет-Технология», что позволяет холдингу не отставать в части прогрессивных технологий по обогащению руд, окусковыванию концентратов, электрометаллургии и доменному производству с учетом самых современных запросов.

Из других крупных уральских компаний в Челябинской области выделяется ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат» («ММК»), что как холдинг эксплуатирует месторождение горы Малый Куйбас, а в качестве металлургической компании использует мощности своего комбината. Холдингом «Саимун лимитед» через ООО «Лекс Электа» эксплуатируется Суроямское месторождение. Наконец, Уральским трубным заводом в Свердловской области используется Первоуральское месторождение, а УГМК через АО «Святогор» – ресурсы Волковского месторождения. Таким образом, все предприятия отрасли пытаются выстраивать производственные цепочки, но далеко не все полные и комплементарные в рамках макрорегионального ТПК. В целом, обеспеченность сырьем ключевых компаний, связанных с Уралом, даже с учетом их сибирских активов, оценивается сроком до 20 лет.

Соответственно, такие горизонты планирования на долгосрочную перспективу вряд ли приемлемы для опорного края державы и требуют более привлекательных перспектив для инвестиций. Еще больше проблема усугубляется из-за все большей оторванности ключевых металлургических комбинатов от руднодобывающей базы – месторождений и ГОКов, что приводит к повышению издержек на транспорт и логистику. Так, для Урала географическая разобщенность горнодобывающих предприятий и его металлургических комбинатов, существенно увеличивает «плечо перевозок» железорудной продукции и препятствует эффективному функционированию энергопроизводственных циклов. И хотя к металлургическим комбинатам Среднего Урала (в частности, к Нижнетагильскому) и европейской части страны это относится в меньшей степени, к металлургическим комбинатам Южного Урала, изначально сориентированным на дальнепривозное сырье (проект Урал – Кузбасс), относится напрямую. Ныне Магнитогорский и Челябинский металлургические комбинаты из-за почти исчерпанной своей сырьевой базы легкообогатимых магнетитовых руд оказались в зависимости от поставок руд с месторождений КМА, Республики Карелия, Мурманской и Иркутской областей, а также из Казахстана, что влечет их значительные транспортно-логистические издержки. В перспек-

тиве ситуация усугубляется тем, что с учетом эксплуатации все более и более бедных руд и отвалов для выплавки чугуна или производства продуктов прямого восстановления железа на 80 % ключевых отечественных металлургических комбинатах (Новолипецком, Оскольском, Нижнетагильском, Магнитогорском, Череповецком, Западно-Сибирском, Челябинском, бывшем Орско-Халиловском металлургическом комбинате – ныне «Уральская Сталь»), им необходимо перевозить все большие объемы загрузочного материала.

2.3. Технико-технологические аспекты развития металлургического звена железорудных ЭПЦ

С учетом выше приведенных негативных факторов в горнодобывающем звене железорудных ЭПЦ требуется введение и разработка все более совершенных, экономичных природоподобных металлургических технологий, учитывающих и экологические аспекты.

Из них с учетом известных ныне трендов эволюции сталеплавильных технологий (Юсфин, 1994; Лисин,1998; Скляр, 2014; Кириченко, 2016), а также «времен их жизни», в качестве перспективных считаются три – технология с использованием кислородных конвертеров, электропечная технология и технология прямого восстановления железа, причем с приоритетом последней как наиболее инновационной (рис. 2.1).

Из рисунка видно, что технология прямого восстановления железа (DRI – Direct Reduction of Iron) действительно одна из новейших – бурно развивающаяся технология. Из-за стремления повысить качество сталей при снижении себестоимости производимой продукции за последнее десятилетие в мире построено и планируется создать до 100 установок такого типа. В целом же внедрение технологии прямого восстановления железа в мире началось в конце 1950-х гг., когда был разработан ряд принципиально новых процессов и агрегатов, например, реакторы кипящего слоя (Рыбенко, 2018).

На рубеже 1980–1990 гг. интерес к процессам прямого получения металла вырос из-за дефицита лома и возросших экологических проблем, в частности, потребности переработки пылевидных отходов.

Из способов прямого восстановления железа с использованием железосодержащих полуфабрикатов и отходов к настоящему времени разработан ряд схем, которые подразделяются на одностадийные и многоступенчатые, твердофазные и жидкофазные, струйные и эмульсионные,

использующие твердые или газообразные восстановители. В одних из них используются процессы восстановления-плавления, в других – процессы плавления-восстановления. На выходе получаются металлизированные продукты в твердом (окатыши, губчатое железо), пластичном (кричное железо) или жидком состоянии (чугун, полупродукт, сталь).

В ретроспективном аспекте для обоснования временных лагов в матрице (табл. 1) было выявлено, что первично с использованием шахтных печей и продуктов конверсии природного газа получило распространение твердофазное восстановление губчатого железа. Так, впервые возможность использования природного газа для восстановления железа в шахтной печи методом «Purofer» была показана в ФРГ (1961 г.). В 1971 г. в США и ФРГ были введены в эксплуатацию первые промышленные шахтные печи Мидрекс с годовой мощностью 400 тыс. т. В 2002 г. этот процесс использовали уже 18 стран, где работало до 50 таких агрегатов. С 1983 г. четыре модуля процесса Мидрекс общей производительностью 1,7 млн т металлизованного сырья в год появились и на Оскольском электрометаллургическом комбинате (ОЭМК) в СССР. В целом ныне на долю указанного процесса в мире, использующего в качестве сырья окисленные окатыши и кусковую руду, приходится примерно 65 % производства губчатого железа. Еще 25 % получаются по технологии HyL (16,4 % – HyL-III и 9,2 % – HyL-I). Самый мощный из таких заводов производит 2,2–2,3 млн т/год (Мексика).

Ко второму поколению технологии прямого твердофазного восстановления железа с использованием в качестве сырья уже рудной мелочи и отходов, относятся технологии и реакторы с кипящим слоем. Из них с 1976 г. получили развитие реакторы Fior (Венесуэла) производительностью 400 тыс. т/год губчатого железа, а несколько позже – *Finmet* и *Cincored* с установками кипящего слоя производительностью 500 тыс. т/год. Преимуществом процессов восстановления железа в кипящем слое принято считать возможность использования для этого дисперсных материалов (Рыбенко, 2018, с. С.19).

Из технологий третьего поколения интерес представляют технологии с процессами прямого восстановления железа в жидкой ванне (ПЖВ), что позволяет перерабатывать любые железосодержащие материалы и отходы, причем без предварительной обработки.

Из таких внедряемых в разных странах разновидностей технологии ПЖВ, ныне известны: *Corex* (ЮАР), *Finex* (ЮАР), *Romelt* (Россия), *AusIron* (Австралия), *AISI* (США), *CCF* (Нидерланды), *DIOS* (Япония), *Hismelt* (Австралия), *Tecnored* (Бразилия). В целом они подразделяются

на одностадийные и комбинированные, где стадии предварительного нагрева, восстановления и плавления разделены и происходят в агрегатах, последовательно связанных между собой. В частности, многостадийный процесс *Corex*, разработанный в 1979 г., в виде промышленного агрегата производительностью 300 тыс. тонн чугуна в год, в 1988 г. был апробирован ЮАР и к настоящему моменту растиражирован до 10 установок (производительность – от 50 до 180 т/ч). В агрегатах используются плавильные газогенераторы разной мощности. Первая такая установка в Южной Корее (2007 г.) имела производительность 600 тыс. т/год, вторая уже 1,5 млн т/год.

Из отечественных одностадийных технологий с жидкофазным восстановлением железа (разработка МИСИС) первая была испытана на Новолипецком металлургическом комбинате в 1992 г. В ней в качестве топлива использовался уголь, а в качестве сырья – железосодержащая пыль и шламы металлургического производства без специальной предварительной подготовки.

Наиболее совершенной в сфере технологий с жидкофазным восстановлением железа ныне считается технология с использованием струйно-эмульсионных процессов Британской ассоциации исследований в области производства чугуна и стали (БИСРА) и Французского НИИ черной металлургии (ИРСИД) (Рыбенко, 2018, с. 21–22). Ключевым процессом в ней является распыление падающей струи жидкого чугуна мощными кислородными струями, окисляющими примеси чугуна непосредственно у желоба доменной печи, что позволяет использовать такой процесс при домнах. К началу 2020-х гг. их производительность достигла 80 т/ч.

В России подобную технологию прямого получения металла из железосодержащих материалов с непрерывным металлургическим процессом на опытной установке струйно-эмульсионного типа апробировали в Новокузнецке в 2010 гг. при кислородно-конвертерном цехе № 2 АО «ЕВРАЗ Объединенный Западно-Сибирский металлургический комбинат». За основу в ней был принят, вышеописанный процесс, прошедший испытание на опытно-промышленной установке во Франции. Примечательной особенностью этого процесса, благодаря большим отклонениям от термодинамического равновесия взаимодействующих в струе компонентов стала возможность получать эффекты синергии, в полтора раза уменьшающие энергетические и в 2–3 раза капитальные затраты. В целом такой процесс допускает широкий спектр используемого сырья, топлива и производимой продукции. В частности, побочную энергию исходного топлива в нем можно использовать для переработки пылевид-

ных отходов и миниатюризации производства, создания мини-заводов с полным циклом производства «руда – сталь» (Цымбал, 2014, с. 37–42).

Таким образом, технологии прямого восстановления металлов в струйно-эмульсионных агрегатах из промышленно апробированных ныне считают наиболее перспективными.

2.4. Пространственный анализ железорудной базы региона с учетом специфики ее руд и глубин их залегания для развития природоподобных технологий

Важность анализа железорудной базы региона и развития природоподобных технологий обусловлена основополагающим статусом железа в недрах в целом, поскольку, будучи самым тяжелым из четырех ключевых элементов (*O*, *Si*, *Al*, *Fe*), по современным представлениям оно не только ответственно за баланс и дифференциацию геооболочек, но и формирует ядро Земли, а, стало быть, в виде его различных соединений с разной плотностью и запасом энергии, включая электромагнитную, распределено в недрах по всему объему Земли – от ее поверхности до центра. Соответственно для оценки и выбора его наиболее перспективных соединений и приоритета должных технологий в таком контексте историческую практику вовлечения в разработку железных руд следует сочетать с закономерностями их естественного распределения в недрах. А именно: переходить от физических и в плане освоения наиболее легких окисленных поверхностных и приповерхностных железных руд (бурых и красных железняков осадочных пород) к приповерхностным метаморфическим минералам (магнетитам и пиритам), а далее – к еще более сложным для добычи и получения из них железа силикатных минералов «изверженных» пород и интрузий из верхней мантии: титаномагнетитов и других руд. С учетом прогресса самих металлургических технологий, ориентированных и на вторичное сырье, в настоящее время стали использоваться и комплексные минералы, из которых для последующих процессов стали готовиться порошки, расплавы, жидкая сталь.

Важным результатом выполненного анализа на базе природоподобного подхода для наиболее адекватного размещения инфраструктуры стало выявление противоречия между по инерции длительное время используемыми пирометаллургическими технологиями и потенциалом невостребованных руд с использованием для них перспективных, более подходящих технологий.

Действительно, ретроспективный анализ освоения уральских железорудных ресурсов показал, что одним из наиболее ранних, доступных для промышленных целей вторичных осадочных железорудных минералов, вовлеченных в хозяйственный оборот, оказался бурый железняк ($nFe_2O_3 + nH_2O$). В экономическом аспекте он примечателен тем, что издавна стал доступен, так как его разновидности наиболее часто встречаются не только в виде коллоидных растворов в озерных и болотных осадках (болотных рудах), но и в корах выветривания в виде «железных шляп» (кепроков) мощностью в сотни метров, выходящих на поверхность, что обусловило их доступность. Из других железорудных залежей их плотность наименьшая и в зависимости от состава и структуры варьируется в диапазоне от 3 300 до 3 900 кг/м^3, что и обусловило их залегание в верхних слоях земных покровов. Примером залежей бурых железняков на Урале являются Кыштымское и Карабашское месторождения (Южный Урал) и Алапаевское месторождение (Средний Урал).

Следующей разновидностью сильно окисленных железорудных пород, также давно вовлеченных в использование, оказался красный железняк (гематит Fe_2O_3), где железа содержится до 70 %. Это произошло из-за того, что он также встречается в самых верхних и наиболее окисленных слоях земной коры, но по своему генезису пространственно тяготеет к зонам выхода вулканических лав и сопряженных с ними контактно-метасоматических зон, что обусловливает его более значительную плотность (4 900–5 300 кг/м^3) и температуру плавления (1 565 °С). Наконец, ключевым минералом из окисленных промышленных железных руд стал магнитный железняк (магнетит – $FeO\ Fe_2O_3$ или Fe_3O_4), содержащий в себе более 70 % *Fe* и значительную магнитную энергию, которая, вероятно, осредняет его плотность до 5 175 кг/м^3, а снятие намагниченности можно использовать для снижения энергозатрат в применяемых для них технологических процессах. На Среднем Урале залежи магнетитов уже длительное время осваиваются при горе Высокая (Нижний Тагил), а также при горе Благодать (г. Кушва), на Южном Урале – при горе Магнитной (г. Магнитогорск).

Еще более перспективной разновидностью магнетитов подкласса сложных оксидов, ныне вовлеченных в промышленное использование и содержащих титан $(Fe,Ti)Fe_2O_4$, являются титаномагнетиты, пространственно расположенные вдоль восточного склона Уральского хребта в меридиональном направлении и сосредоточенные в зоне Среднего и Южного Урала. В недрах они присутствуют в виде минеральных скоплений и жил, а по происхождению связываются с породами верхней

мантии, внедрившейся в земную кору. По сути, это твердые растворы наиболее древних, а потому наиболее метаморфизированных магнитных железняков (Fe_3O_4), где часть железа оказалась замещенной окислами титана (Fe_2TiO_4) с плотностью от 4 800 до 5 300 кг/м^3 и с особым типом магнетизма – *ферримагнетизмом,* повышающим эффективность магнитных методов для извлечения. Еще более сложными для добычи и получения железа оказались соединения железа с серой (сульфиды) и мышьяком (арсениды), обладающие высокой плотностью и потому залегающие более глубоко в недрах.

В рамках приведенной выше матрицы оценки энергопроизводственных циклов все это было учтено (табл. 2.1) и предложено использовать для выбора вида наиболее эффективной энергии, обеспечивающей тот или иной металлургический процесс. А именно: для того чтобы разогреть, модифицировать, химически изменить или расплавить руду, помимо тепловой энергии, получаемой за счет сжигания (окисления) древесного, угольного или углеводородного топлива, можно использовать более широкий спектр физического воздействия на руду: от механической обработки (ковки) до использования резонансных механических или электромагнитных волн, когерентного светового (лазерного) или радиационного излучения, химической или электрохимической обработки и т. п. Таким образом, указано, что учет и более полное использование различных диапазонов поглощения рудами и их химическими элементами разных видов энергии – важный инструмент выбора более эффективной технологии металлообработки и металлургических процессов. То же относится и к более адекватному учету и химических свойств руд в выборе наиболее адекватных технологий.

В этом аспекте обращено внимание на то, что в минерализациях железа при перемещении в недра от дневной поверхности наблюдается тенденция их перехода от гидроксидных и высоконасыщенных углеродом и кислородом соединений, например, $FeCO_3$ с плотностью до 3 000 кг/м^3 или Fe_2O_3 к менее ими насыщенным, например, закисному железу FeO с плотностью 5 745 кг/м^3 и температурой плавления 1 377 °С, являющемуся основной формой нахождения железа в мантии и земной коре. А также к сульфидам железа – серным или железным колчеданам – пиритам (FeS_2) и магнитным колчеданам – пирротинам (Fe_nS_{n+1}), имеющим при плотностях в диапазоне от 4 580 до 5 100 кг/м^3 существенно меньшую температуру (от 1 180 °С до 1 200 °С), что возникает при поглощении сероводорода, образуемого в донных илах или в погребенной недрами биоте и что предпочтительнее окисленных руд.

Следовательно, этому необходимо уделять особое внимание и в зависимости от типа руд в большей мере пользоваться природоподобными более экологичными технологиями. Очевидно, что в недрах закись железа (*FeO*) вне кислородной среды трансформируется в магнитный железняк и чистое железо ($4FeO \rightarrow Fe_3O_4 + Fe$) при нагреве уже с 200–565 °С, а на воздухе ($6FeO + O_2 \rightarrow 2Fe_3O_4$) при температурах от 300 до 500 °С, что существенно ниже температур в доменных печах. В серный колчедан *FeO* при взаимодействии с сероводородом тоже переходит ($FeO + H_2S \rightarrow FeS + H_2O$) при температуре 500 °С много меньшей температуры в доменных процессах. Это означает, что в земной коре такие процессы идут существенно в более экономичном режиме, причем на относительно небольших глубинах (всего до нескольких км) и, судя по всему, не в жидком («магматическом»), а в твердом состоянии.

Таким образом, если следовать природным технологиям, связанным с образованием в недрах железных руд разного состава, то механизм их образования по В. Гольдшмидту, хотя технологически и подобен процессу выплавки из шихты тяжелых металлов, при котором дифференциация пород обусловливается их весом, но существенно более экономичен. Наиболее тяжелые оседают вниз, а легкие силикатные породы коры поднимаются на поверхность аналогично шлакам в печи. Вещества промежуточного веса (сульфиды железа и других металлов) в недрах, подобно вязкому «штейну» в металлургических процессах, занимают промежуточное положение и образуют мантию, из расплава которой сила Архимеда выталкивает наиболее легкие соединения железа с водородом, углеродом и кислородом, серой вверх, а более тяжелые, движет вниз. В этом отношении кремний, как второй после кислорода (47 %) наиболее распространенный элемент земной коры (29,5 %), выполняет функцию «балластного» элемента, в виде кремнезема (SiO_2) составляя до 12 % массы земной коры с разноуплотненными его формами от песка и полевых шпатов до кварца.

В плане выделения наименее энергозатратных технологий получения железа было обращено внимание на то, что восстановление железа из его закиси при взаимодействии с водородом требует еще меньших издержек, чем при взаимодействии с кислородом или углеродом, что не учитывают, эксплуатируя по инерции пирометаллургический ЭПЦ.

Так, восстановление железа при взаимодействии с водородом идет при температуре всего лишь 350 °С ($FeO + H_2 \rightarrow Fe + H_2O$), тогда как при взаимодействии с углеродом – при температуре свыше 1 000 °С ($FeO + C \rightarrow Fe + CO\uparrow$). При этом на выходе получается экологически чистая вода!

Соответственно, фундаментально в энергоциклах по производству железа в перспективе в большей мере следовало бы сориентироваться на водородные технологии с воздействием в диапазоне их наивысшего резонансного воздействия на железорудные породы механическими или электромагнитными волнами для «стряхивания» присутствующего в недрах водорода, чтобы стимулировать нужную реакцию с экологически минимальными последствиями, так как в ходе ее образуется железо и вода.

А потому в пространственно-экономическом отношении для использования потенциала естественно истекающего из недр водорода предприятия черной металлургии следовало бы максимально приблизить именно к зонам его повышенного истечения. В частности, к оси главного уральского разлома, где практически и выявлены базовые уральские месторождения железных руд, хотя большей частью вслепую – без должного понимания фундаментальных факторов их образования там.

В перспективе для природоподобной стимуляции железовыделения в таких зонах горнообогатительные фабрики следовало бы размещать не на поверхности земли, как это делается сейчас при использовании кислородно-углеродных технологий, а в недрах, причем не только на горизонтах наибольшей концентрации окислов железа, но и водорода.

В плане транспортно-инфраструктурных подходов, как было показано (Литовский, 2024), также в большей мере следовало бы приоритетным сделать не развитие транзитных коммуникаций, резко меняющихся из-за геополитической нестабильности и внешнеэкономической конъюнктуры, а развитие внутрирегиональной инфраструктуры с наибольшим охватом обслуживания макрорегиона и обеспечения его связности.

В этом аспекте как для железорудного, так и для меднорудного ЭПЦ макрорегиона наиболее проблемным для развития оказывается юго-восточная прихребтовая зона Урала со значительными разрывами железнодорожной инфраструктуры.

Тем не менее, несмотря на внесенное еще в «Схему территориального планирования Республики Башкортостан до 2020 г.» (рис. 2.4), важное железнодорожное звено для связывания ГОКов и металлургических предприятий ЭПЦ железорудной и меднорудной промышленности Башкортостана, Оренбургской, Челябинской и Свердловской областей – железнодорожный участок от Сибая (Республика Башкортостан) до Сары (Оренбургская обл.) не только не запустили в соответствии с планом, но и в «Схеме… до 2040 г. » отнесли ко второй очереди (2034–2040 гг.) (Крылов, 2024).

О востребованности этого участка для макрорегиона свидетельствует и разработанное ныне совместно с Уральской горно-металлургической компанией технико-экономическое обоснование строительства железнодорожной линии «Сибай – Подольск – Новорудная» (160 км), которая позволяет не только решать отраслевые задачи ЭПЦ, но и, не перегружая Челябинский железнодорожный узел, обеспечивать прямую связь восточных районов Южного, Среднего и Северного Урала с Казахстаном, Китаем, Средней Азией, районами нижней Волги и Кавказа (Бессонова, 2024). Таким образом, с учетом проведенных исследований и ранее выполненных на основе оценок комплексного потенциала использования рудного и сопутствующей сырьевой массы железорудного и меднорудного ЭПЦ (Литовский, 2020), транспортную инфраструктуру для обслуживания этих ЭПЦ с учетом перспектив эксплуатации действующих и освоения новых месторождений на вышеизложенной научной платформе следовало бы совместить с прихребтовой Южно-Уральской осью (рис. 2.4).

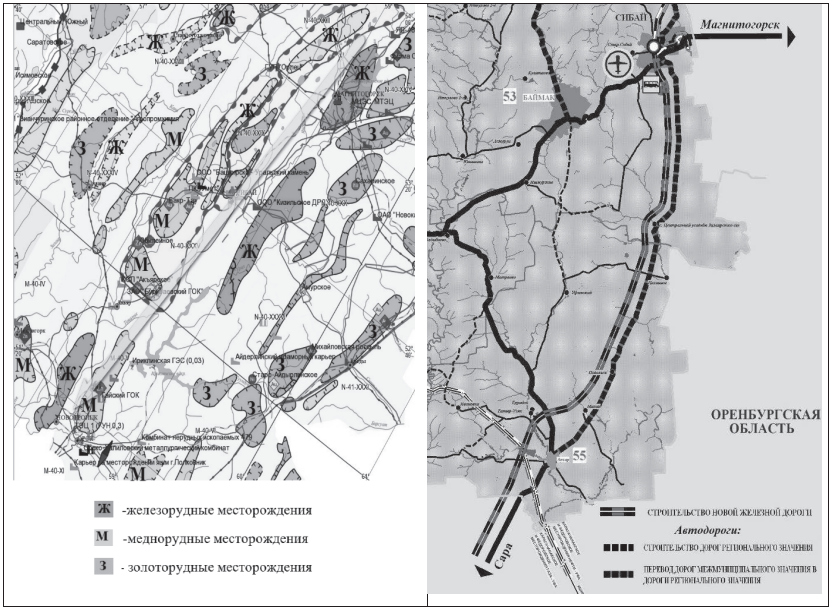


Рис. 2.4. Совмещенные железорудная и меднорудная база юго-восточного сектора Уральского макрорегиона (слева) и перспективная железнодорожная инфраструктура (справа).

Выводы:

1. На основе оригинальной методики для сравнительного анализа уровней технологического развития отраслевых энергопроизодственных циклов (ЭПЦ) в мире, на страновом и региональном уровнях построена матрица оценки состояния и потенциала технико-технологического развития железорудной отрасли в добывающем и металлургическом звеньях уральского макрорегиона.

2. С ее помощью оценен уровень технико-технологического прогресса в добывающем и металлургическом звеньях ЭПЦ железорудной отрасли уральского региона и выполнено его сравнение с уровнем лидеров отрасли. Показано, что наиболее продвинутые технологии для добычи руд и получения из них железа на предприятиях-лидерах отрасли достигли пятого уровня технологического уклада, а в целом, помимо пирометаллургических (с восстановлением металлов при высоких температурах), включают гидро- и химико-металлургические (с восстановлением из солей в растворах), а также электрометаллургические и порошковые технологии, используемые для электролитического получения металлов из растворов или расплавов.

3. Для выделения ядра ЭПЦ в макрорегионе были выделены региональные предприятия и их наиболее прогрессивные технологические цепочки, ориентированные на бурно развивающиеся в мире технологии прямого получения металла из железосодержащих материалов с непрерывным металлургическим процессом разливки, и показано, что они пока не охватили большинство уральских предприятий ЭПЦ.

4. Для установления тенденций в горнодобывающем звене ЭПЦ железнорудной отрасли и пространственном освоении месторождений региона с наиболее перспективными рудами и вторичным сырьем был выполнен соответствующий их пространственный и рудный анализ и показан потенциал использования более экономичных природоподобных технологий в исследуемом ЭПЦ.

5. С учетом развития и тенденций в добывающем и обрабатывающем (металлургическом) звене, а также пространственных проблем по оптимизации их взаимодействия (уменьшению лагов перевозок от ГОКов к металлургическим предприятиям) и транспортного обслуживания ЭПЦ в регионе предложено развивать наиболее слабое звено макрорегиональной железнодорожной инфраструктуры в юго-восточной прихребтовой части региона, где сосредоточены ГОКи, не только железорудные и меднорудные месторождения, но и сопряженные с ними перспективные месторождения драгметаллов.

ГЛАВА 3. РОЛЬ МЕЖРЕГИОНАЛЬНЫХ ПОТОКОВ В РАЗВИТИИ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ МАКРОРЕГИОНА

3.1. Транспортная инфраструктура макрорегиона и ее роль в формировании транспортного каркаса России [37]

Транспортная инфраструктура, обладая значительным эндогенным потенциалом, является одним из ключевых секторов экономики, способных инициировать мультипликативные эффекты и выступать драйвером позитивной динамики множества социально-экономических процессов. На сегодняшний день накоплено значительное количество исследований, эмпирически подтверждающих взаимосвязь между уровнем развития транспортной инфраструктуры и социально-экономической динамикой регионов. Этим вопросам посвящены последующие части данной книги.

Одной из первых работ, в рамках которой была подтверждена гипотеза о продуктивности государственных вложений в развитие больших инфраструктур, их способности напрямую влиять на рост экономики и на взаимосвязанную эффективность отраслей, зависящих от развития инфраструктур и уровня загрузки самих инфраструктур, стала работа Ашауэра (Aschauer, 1989). В ней автор показал, что наибольшую отдачу имеют инвестиции государства, направленные на развитие транспортной инфраструктуры. В дальнейшем зависимость уровней развития транспортной инфраструктуры и социально-экономического развития регионов изучалась на примере Китая (Yu, De Jon, et. al., 2011; Zhang, Zhang, 2021), Индии (Ghani, Goswami, Kerr, 2016; Pradhan, Bagchi, 2013; Sahoo, Dash, 2009), Тайваня (Andersson, Shyr, Fu, 2010), Армении, Грузии, Турции (Badalyan, Herzfeld, Rajcaniova, 2014), Испании (Mas, Maudos, et. al., 1995), Хорватии (Grgić, 2020), России (Исаев, 2015; Садовничий, Осипов и др., 2018; Разуваев, 2021; Валеев, Мачарет, 2003) и других стран.

В российском экспертном сообществе также давно закрепилось представление о безусловном приоритете развития транспортной отрасли и транспортной инфраструктуры, в частности. Однако многие специалисты по-прежнему констатируют, что ее фактическое состояние не соответствует ни масштабу современных вызовов, ни растущим

[37] *Автор: К. А. Завьялова.*

потребностям экономического развития РФ. Среди основных проблем выделяют значительный износ основных фондов. Несмотря на то, что благодаря реализации масштабных проектов, в том числе в рамках Комплексного плана модернизации и расширения магистральной инфраструктуры РФ до 2024 г., были реализованы проекты, усилившие транспортный каркас России, однако до сих пор высока доля износа основных фондов (в целом по видам деятельности «Транспортировка и хранение» степень износа основных фондов составляет около 40 %, а в части железнодорожного транспорта еще выше и составляет 34,8 % по грузовым и 46,5 % по пассажирским перевозкам).[38] Также можно отметить существенное отставание качественных характеристик транспортной инфраструктуры от других развивающихся и развитых стран, высокую дифференциацию регионов по уровню развития транспортной инфраструктуры и транспортной доступности; низкую рентабельность активов в большинстве подотраслей транспортной отрасли (Разуваев, 2021; Валеев, Мачарет, 2003). Так, в 2024 году уровень рентабельности собственного капитала, зафиксированный в традиционно низкорентабельном секторе пассажирских перевозок РЖД составил 8,5 %[39] при уровне инфляции почти в 10 %, в 2025 году рентабельность снизилась до 6,7 %, причем падение обусловлено не ростом собственного капитала, а снижением чистой прибыли. Как следствие, транспортная отрасль становится мало привлекательной для инвестиций, в том числе иностранных, что создает риски дальнейшего углубления рассмотренных проблем, что особенно важно сегодня, когда часть финансовых рынков для России ограничена политической ситуацией, а развитие транспортной инфраструктуры в мировом масштабе характеризуется не просто увеличением километров путей сообщения, но выходит на новый уровень технологического развития.

Перечисленные аспекты лишь отчасти характеризуют проблемы развития транспортной инфраструктуры России. Более того, нарастание разрыва уровня развития транспортной инфраструктуры в сравнении с другими экономиками мира в дальнейшем может привести к критическому отставанию стратегически важной отрасли экономики. Однако несмотря на то, что трудности есть, и их накопилось немало, в последние годы можно говорить о сдвигах в наращивании реального потенциала в развитии этого сектора экономики.

---

[38] Транспорт в России. 2024: Стат. сб./ Росстат. – М., 2024 – 100 с.

[39] Рассчитано на основании Финансовой отчетности АО ФПК по РСБУ за 2024 и 2025 гг. – URL: https://fpc.ru/ru/7022/page/103290?id=20375 (дата обращения: 29.04.2026).

В последние годы мы наблюдаем новый виток в стратегическом управлении развитием транспортной отрасли, направленный как раз на преодоление отмеченных трудностей и принявший окончательную форму проектного управления. На сегодняшний день к основным стратегическим документам, на базе которых в ближайшие годы будет развиваться транспортная отрасль, относятся:

- Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 28 декабря 2024 года № 4146-р;
- Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года, утвержденная 27 ноября 2021 года № 13363-р;
- Национальные проекты. Так, на сегодня одним из приоритетных и активных в смысле реализации является Национальный проект «Безопасные и качественные автомобильные дороги», охвативший в 2019 году 83 российских региона.

Заложенные в данных стратегических документах проекты достаточно масштабны, а их реализация действительно может придать стимул развитию экономики. Так, в соответствии с Транспортной стратегией РФ развитие транспортной системы должно быть направлено на реализацию четырех долгосрочных стратегических целей:

- повышение пространственной связности и транспортной доступности территорий;
- повышение мобильности населения и развитие внутреннего туризма;
- увеличение объема и скорости транзита грузов и развитие мультимодальных логистических технологий;
- цифровая и низкоуглеродная трансформация отрасли и ускоренное внедрение новых технологий.[40]

Анализ стратегических документов показывает, что долгое время транспортная инфраструктура востока России развивалась по линейному принципу, опираясь на две широтные магистрали (Транссиб и БАМ) и несколько ответвлений меридиональных направлений. Более разветвленная структура сети, но имеющая признаки подобия с территориями Урала и Сибири, характерна для генезиса сети в европейской части страны. Этим была обеспечена базовая связность территории, но осталась не решенной

[40] *Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденная 27 ноября 21 года № 13363-р. – URL: https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577 (дата обращения: 07.11.2025)*

проблема дискриминации транспортного обслуживания в полосах развития магистралей и на периферии. Сегодня Транспортная стратегия РФ предполагает переход к формированию каркасной модели транспортной инфраструктуры, под которой понимается совокупность магистральных путей сообщения (железные дороги, автомагистрали, внутренние водные пути) и опорных мультимодальных узлов (логистические хабы), обеспечивающих устойчивую связность ключевых центров расселения и производства. Причем, помимо федерального каркаса, соединяющего север и юг, запад и восток и формирующего остов инфраструктуры, сегодня на первый план выходит задача формирования ребер жесткости внутри этого остова, за счет развития макрорегиональной инфраструктуры (соединение ответвлений, кольцевые маршруты, альтернативные пути и центры). Опора на макрорегиональный уровень предполагает ориентацию на трансграничные потоки между несколькими соседними регионами России и даже странами в рамках развития международных транспортных коридоров. Именно на макрорегиональном уровне формируется реальный запрос. Например, масштабный проект М-12 «Восток» станет новой транзитной иглой, связывающей Москву и Тюмень, или обрастет распределительными нитями, соединяющими Челябинск, Тюмень, Омск в единый промышленный пояс (Косой, 2016; Стародубцева, Ким, 2021).

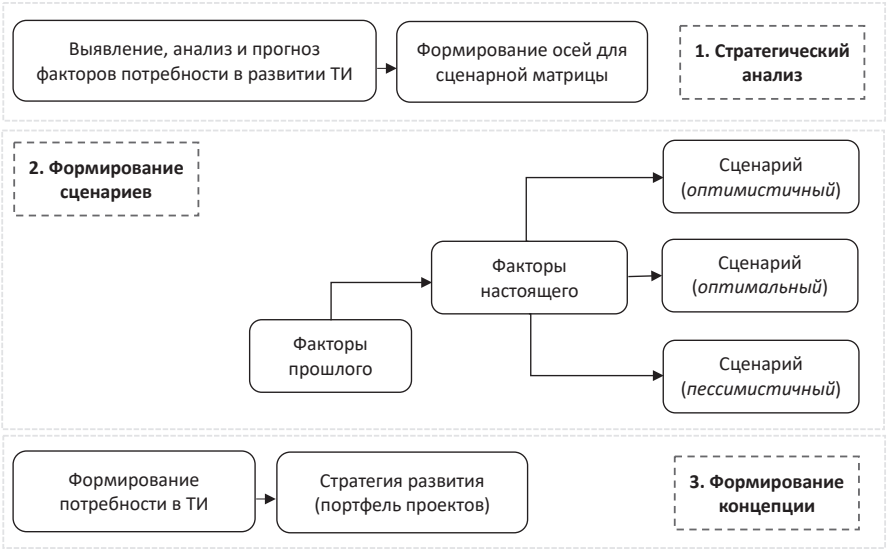
Очевидно, что решение поставленных целей требует формирования, комплементарного поставленным задачам, инфраструктурного транспортного каркаса. При этом развитие транспортной инфраструктуры всегда сопряжено со значительными капитальными затратами и большими сроками окупаемости, что требует взвешенных решений, в том числе на основе научного анализа, что, в свою очередь, актуализирует необходимость теоретико-методологического осмысления различных аспектов выбора приоритетов в развитии транспортной инфраструктуры.

Несмотря на то, что в научной литературе и в практике управления исследованию транспортной инфраструктуры посвящено значительное количество научных и методических работ, нормативно-правовых актов, незначительное количество исследований посвящено полноценному анализу факторов, формирующих потребности в транспортной инфраструктуре, то, что должно предшествовать формированию запроса на разработку проектов по развитию транспортной инфраструктуры и закладывать основу сценарного прогнозирования развития больших инфраструктурных систем.

Важнейшей задачей в процессе формирования транспортного каркаса России становится систематизация и анализ факторов, формирующих потребности в транспортной инфраструктуре на региональном уровне. Формирование потребности региона в развитии транспортной инфраструктуры определяется совокупностью факторов, среди которых значимую роль играют не только количественные параметры, определяющие социально-экономическую динамику региона (изменение ВРП, демографические процессы и пр.), но и качественные структурные сдвиги (цифровая трансформация, экологизация и пр.), которые должны быть учтены в сценарном прогнозировании развития транспортного каркаса.

Реализация больших инфраструктурных проектов в области транспорта всегда сопровождается ограниченностью инвестиционных ресурсов. Тем важнее на начальном этапе правильно оценить запрос региона, увидеть, предвосхитить объективную потребность региона в развитии инфраструктуры.

Роль и место выявления и системного анализа факторов, формирующих потребность в развитии транспортной инфраструктуры в сценарном прогнозировании и стратегическом планировании, показана на рисунке 3.1.



Источник: составлено автором.

Рис. 3.1. Схема сценарного прогнозирования развития транспортной инфраструктуры.

В целом в настоящее время формирование потребности региона в развитии транспортной инфраструктуры может включать в себя широкий спектр детерминант и процедур, которые условно можно разделить на две укрупненные группы: стратегические перспективные детерминанты потребности (идущие «сверху») и потребности, предъявляемые субъектами различного уровня (идущие «снизу») (рис. 3.2).

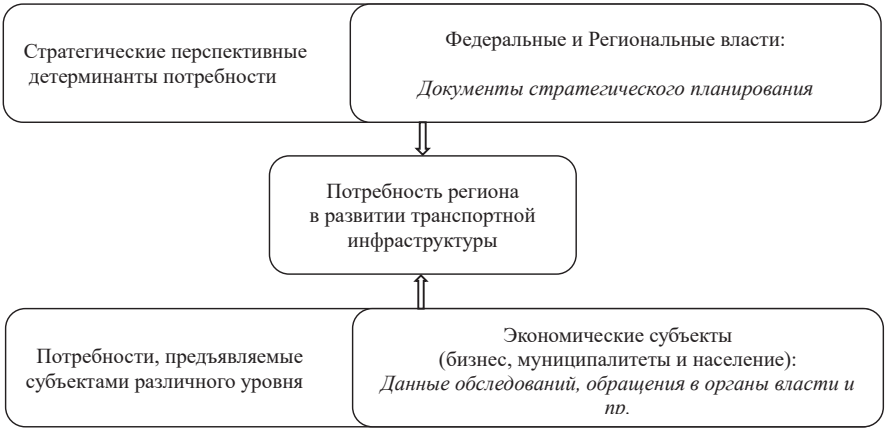
При формировании направлений развития транспортного каркаса регионов и страны в целом основной упор делается, прежде всего, на обеспечение реализации поставленных в Стратегии транспортного развития целей, которых на сегодняшний день четыре:

1. Повышение транспортной связности и транспортной доступности территорий.

2. Повышение мобильности населения и развитие внутреннего туризма.

3. Увеличение объема и скорости транзита грузов и развитие мультимодальных логистических технологий.

4. Цифровая и низкоуглеродная трансформация отрасли и ускоренное внедрение новых технологий[41].



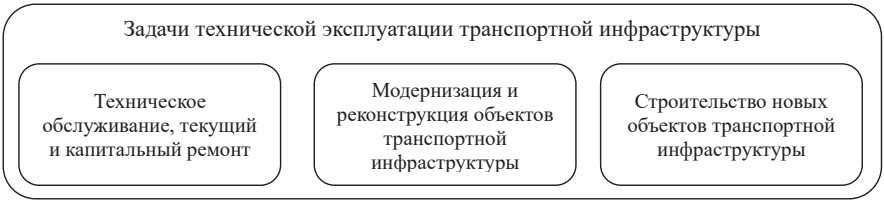
Источник: составлено автором.

Рис. 3.2. Классификация факторов по направлению их формирования.

[41] *Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденная 27 ноября 2021 года № 13363-р. – URL: https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577 (дата обращения: 07.11.2025)*

Конкретизация, необходимая для формирования проектов развития, нуждается в постоянном отслеживании уже имеющихся потребностей, формируемых в процессе развивающейся хозяйственной деятельности, кооперации, поиска возможностей для экспорта, усилий региональных органов власти и потребностей населения. Отсутствие должного взаимодействия и накопление нерешаемых проблем, выражающихся, прежде всего, в высоких логистических издержках для бизнеса, чревато переносом инвестиций в другие регионы и оскудением запаса человеческого потенциала вследствие его миграции в более благополучные регионы. Логистические издержки могут быть завышенными, в том числе вследствие недостаточного развития транспортной инфраструктуры.

Следующая группа факторов, формирующих спрос на развитие транспортной инфраструктуры, обусловлена качеством и формами общественного воспроизводства, в том числе воспроизводства систем транспортной и энергетической инфраструктуры (рис. 3.3). Учитывая высокий износ основных фондов, отмеченный выше, а также необходимость в обеспечении на транспорте высоких темпов развития процессов автоматизации и цифровизации производственных процессов, транспорт формирует значительный объем потребности в фондообразующей продукции промышленности.



Источник: составлено автором.

Рис. 3.3. Классификация факторов по формам воспроизводства объектов транспортной инфраструктуры.

В целом на основании анализа ряда исследований (Мельников, 2025; Крюков, Коломак, 2021; Соколов, Руднева, 2024), данных Росстата и Министерства транспорта РФ можно сделать вывод о том, что проблема износа транспортной инфраструктуры и обеспеченности ею имеет выраженную территориальную неравномерность. Эксперты выделяют несколько групп регионов, состояние транспортной инфраструктуры в которых обладает повышенной проблематичностью.

Проблемную группу образуют, в частности, малонаселенные и отдаленные регионы, в том числе Крайнего Севера и Востока, имеющие при этом важное стратегическое значение (Республика Саха, Камчатский край, Магаданская область, Чукотский автономный округ, Сахалин, Красноярский край). Состояние транспортной инфраструктуры и любые ее модернизации осложняются экстремальными климатическими условиями, сложностью и высокой стоимостью логистики строительных материалов, а также низкой плотностью населения и невысокой транспортной интенсивностью, что делает коммерческие инвестиции нерентабельными.

К другой группе регионов с инфраструктурными особенностями относятся регионы без выраженной крупной отраслевой специализации, где имеются и промышленные, и сельскохозяйственные территории (Псковская, Брянская, Тверская области, Калмыкия, Алтай и др.). Здесь характерно разнообразие транспортной обеспеченности по территории при ограниченных бюджетных возможностях.

Особую группу с точки зрения повышенной проблемности составляют регионы, в которых наиболее заметно влияние роста внутреннего туризма и автомобилизации населения, там резко выросла нагрузка на изношенную транспортную инфраструктуру всех видов транспорта. Однако из-за низкого бюджетного потенциала, отсутствия заинтересованных инвесторов и сложностей прокладки дорожного полотна, например, из-за горного рельефа, необходимые изменения происходит медленно. К таким регионам относятся, в частности, ряд регионов Северного Кавказа.

Также при анализе факторов, формирующих потребности в транспортной инфраструктуре, следует выделять циклические и нециклические (Karpovich, Shlafman, 2017).

Циклические факторы обусловлены текущим циклом развития экономики или его сменой. К ним относятся спад или рост, рецессия и экономическая депрессия. При анализе этих факторов важно учитывать не только сопутствующие им угрозы и риски развития транспортной инфраструктуры, но и вероятность в целом возникновения смены каких-либо циклических факторов.

Нециклические факторы в свою очередь также целесообразно разделять на две группы: *условно-постоянные* (действуют долгое время и легче поддаются прогнозированию) и *непостоянные*. К условно-постоянным относятся научно-технический прогресс и сопутствующие ему изменения потребности, конкурентность на рынках, модель государ-

ственного регулирования и основы экономической политики, развитие внешних рынков, сезонность. К непостоянным факторам можно отнести политические кризисы и социальные конфликты, стихийные бедствия, аварии, катастрофы, военные конфликты.

Последним основанием классификации факторов выделим четыре группы по сфере их формирования (табл. 3.1). Каждая из них имеет важное значение при формировании осей сценарной матрицы.

Таблица 3.1

Классификация факторов формирования потребности в развитии транспортной инфраструктуры по сферам и их проявление в региональной экономике

Группы факторов	Характеристика	Примеры изменений в развитии транспортной инфраструктуры
Экономические	Первичные драйверы, формирующие потребность в развитии ТИ, создают спрос на перевозки, определяют их объем, направление и структуру:	
	– рост ВРП, объемов промышленного производства; – развитие АПК; – рост внешнеторгового оборота; – крупные инвестиционные проекты; – высокие логистические издержки бизнеса; – освоение новых месторождений; – внутренняя конкуренция между видами транспорта; –развитие международных транспортных коридоров и пр.	– расширение магистральной сети; – строительство хабов и мультимодальных центров; – строительство подъездных путей к элеваторам, портам, транспортным хабам; – реконструкция сети с целью повышения пропускной способности; – изменения тарифной политики и пр.
Социальные	Драйверы, формирующие не только количественные, но и качественные требования к транспортной инфраструктуре:	

Социальные	– демографические процессы, включая мобильность населения; – рост автомобилизации населения; – урбанизация и агломерация; – строительство и освоение новых районов; – социальная справедливость; – развитие туризма; – экология и безопасность и пр.	– строительство развязок, парковок, мостов, борьба с заторами; – строительство высокоскоростных магистралей и пассажирских коридоров; – строительство мультимодальных хабов; – развитие дорог местного значения, объездных дорог; – соответствие современным требованиям безопасности и экологичности и пр.
Инновационные	Факторы, требующие предвосхищения будущего, поскольку, ориентируясь только на текущие требования, высок риск построения «новой» морально-устаревшей инфраструктуры	
	– цифровизация; – электрификация; – беспилотные технологии; – автоматизация; – новые материалы; – роботизация и пр.	– системы управления, ЦОДы, сети 5G; – зарядная инфраструктура; – модернизация энергосетей; – строительство мультимодальных ТПУ, хабов; – развитие автоматизированных терминалов и пр.
Институционально-организационные	Факторы, не только формирующие потребность в развитии ТИ, но и определяющие принципиальную возможность и качество ее реализации на практике	
	– система управления и координации; – нормативно-правовые регуляторы; – финансово-экономические институты; – политические и общественные институты и пр.	– система документов стратегического планирования транспортной отрасли; – кадровое обеспечение отрасли и связных ведомств; – межведомственная и межмуниципальная координация; – техническое регулирование и стандартизация и пр.

Источник: составлено автором.

В заключение важно отметить, что реализация крупных проектов по развитию транспортной инфраструктуры является действенным инструментом преодоления ограничений экономического роста. С другой стороны, сам рост и его структура играют важнейшую роль в формировании транспортных потребностей и, соответственно, инициировании

новых транспортных проектов, что и является основной характеристикой сценариев развития транспортной инфраструктуры.

Потребность в развитии транспортной инфраструктуры региона в современном мире не может опираться исключительно на экстраполяционные методы прогнозирования. При сценарном прогнозировании должен учитываться весь комплекс тенденций развития как самой территории, так и ключевых факторов, влияющих на формирование будущего спроса на услуги транспорта (пассажирских и грузовых перевозках), а, следовательно, на потребность в развитии транспортной инфраструктуры. При этом среди факторов доминирующую роль играют не только количественные параметры (рост промышленного производства, миграция населения и пр.), но и качественные сдвиги, концептуально меняющие требования к транспортной инфраструктуре будущего.

3.2. Методология использования межрегиональных зависимостей для моделирования сценарных условий развития целевой территории[42]

Современные процессы пространственного развития Российской Федерации характеризуются высокой степенью взаимозависимости региональных экономик, что определяет необходимость учета межрегиональных связей при разработке стратегий и сценариев социально-экономического развития. Межотраслевая кооперация и общая транспортно-логистическая система приводят к тому, что региональные экономики функционируют как взаимосвязанные элементы единого экономического пространства.

Игнорирование региональных взаимосвязей при прогнозировании приводит к существенным искажениям в оценке потенциала роста и устойчивости территориальных систем. В работах многих выдающихся ученых (Изард, 1966; Fujita, Krugman, Venables, 1999; Стратегии…, 2004; Татаркин, 2013) подчеркивалось, что пространственная экономика должна рассматривать отдельные регионы как элементы сложной сети межрегиональных взаимодействий.

В частности, каждый регион необходимо рассматривать в контексте функционирования и развития макрорегиона (совокупность территориально и функционально связанных субъектов РФ, объединенных

[42] *Автор: А. В. Мартыненко.*

общими экономическими, транспортными, социальными и институциональными характеристиками). В отечественной науке к макрорегионам принято относить крупные межобластные системы (например, Уральский, Сибирский, Приволжский макрорегионы). Именно на уровне макрорегионов проявляются ключевые межтерриториальные зависимости, которые в совокупности формируют устойчивость национального экономического пространства (Стратегии…, 2004; Минакир, Исаев и др., 2020).

Поэтому для корректного описания и моделирования развития региона необходимо учитывать внешние эффекты, порожденные макрорегиональной средой. Такие эффекты включают как прямые связи (товарные и миграционные потоки, транспортную связанность), так и косвенные, которые реализуются через изменение спроса на продукцию региональных предприятий, движение инвестиций, технологий и инноваций. В совокупности они оказывают существенное влияние на параметры экономического роста, структуру занятости и демографические характеристики (Fujita, Krugman, Venables, 1999; Anselin, 1988).

Поэтому весьма важной является задача моделирования подобных межрегиональных зависимостей и их интеграция в систему сценарного прогнозирования. Традиционные модели регионального развития (регрессионные, трендовые, макроэкономические) в основном учитывают эндогенные факторы (внутренние инвестиции, производственные мощности, численность и структуру населения). Однако региональные системы действуют в сложной пространственной среде, где взаимное влияние соседних территорий проявляется как в форме сотрудничества, так и в виде конкуренции. Например, для индустриально развитых регионов (в частности, субъектов Уральского макрорегиона) характерна ярко выраженная взаимозависимость производственных и транспортных подсистем (Татаркин, 2013).

Необходимо отметить, что с точки зрения прогнозирования, межрегиональные зависимости выступают как внешние граничные условия для модели сценарного развития. Их корректное включение в модель позволяет:

1) определить возможные траектории развития целевой территории с учетом экзогенных воздействий;

2) оценить чувствительность региональной экономики к изменению внешних параметров (например, спроса в соседних регионах или доступности транспортных связей);

3) выявить межрегиональные мультипликаторы, отражающие степень влияния одной территории на другую.

Таким образом, учет зависимостей между регионами позволяет выполнять моделирование социально-экономических систем, при котором в единую пространственную структуру объединяются данные о потоках товаров, пассажиров, капитала и трудовых ресурсов. Такие подходы позволяют формировать сценарии развития региона не как изолированного субъекта, а как целевой территории в системе макрорегиональных взаимодействий. Отметим, что именно такой подход соответствует принципам пространственной интеграции, заложенным в Стратегии пространственного развития Российской Федерации до 2030 года[43].

Таким образом, подход к использованию межрегиональных зависимостей при моделировании сценарных условий развития должен включать:

- выявление основных форм межтерриториальных связей на уровне макрорегиона;
- количественную оценку силы и направленности этих связей;
- определение способов их интеграции в прогнозные модели;
- проверку чувствительности сценариев к изменениям внешних параметров.

Рассмотрим основные виды связей между регионами:

- производственно-экономические связи формируются на основе специализации регионов и межотраслевой кооперации; они определяют распределение производственных цепочек, объемы межрегиональных поставок и формирование добавленной стоимости на смежных территориях;
- транспортно-логистические связи обеспечивают перемещение продукции, рабочей силы и информации, выступая основным каналом пространственной интеграции;
- социально-демографические зависимости отражают маятниковую и постоянную миграцию населения, формируя трудовой баланс макрорегионов;
- финансово-инвестиционные потоки выражают перераспределение капитала, трансферты, субсидии и корпоративные инвести-

[43] *Стратегия пространственного развития Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2036 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2024 г. № 4146-р. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1310767692/titles (дата обращения: 17.11.2025).*

ции, определяя степень экономической связанности регионов;

- институциональные взаимодействия проявляются через участие территорий в общих программах, соглашениях о сотрудничестве, федеральных и межрегиональных проектах;
- научно-технологическое взаимодействие охватывает совместные исследования, обмен знаниями, создание сетей инновационных центров и технопарков, формирование межрегиональных кластеров в сфере высоких технологий. Оно способствует диффузии инноваций и укреплению технологической конкурентоспособности макрорегионов;
- культурное взаимодействие выражается в совместных гуманитарных и образовательных инициативах, обменах в сфере искусства, сохранении историко-культурного наследия и формировании пространства общих ценностей.

Современные методы анализа межрегионального взаимодействия базируются на сочетании макроэкономических и пространственно-эконометрических инструментов, позволяющих не только описывать структуру связей, но и оценивать их количественное воздействие на динамику целевой территории. К наиболее широко распространенным относятся следующие методы и модели:

1. Межрегиональные межотраслевые модели. Развивают классическую схему «затраты – выпуск» и позволяют оценивать прямые и косвенные эффекты межрегиональных поставок. Применение таких моделей обеспечивает выявление производственных мультипликаторов и эффектов обратной связи (Оптимизационные…, 1989), однако они требуют детализированной статистики по межрегиональным обменам, которая практически недоступна в современных условиях.

2. Гравитационные модели. Представляют собой инструмент анализа потоков товаров, пассажиров, информации, финансов и т. п., основанный на зависимости интенсивности взаимодействия от экономического потенциала территорий и расстояния между ними. Эти модели успешно применяются при недостатке детализированных данных, позволяя оценить структуру межрегиональных потоков и построить матрицы вероятностных взаимодействий. В современной практике они модифицируются с учетом транспортной доступности, логистических издержек и уровня социально-экономического притяжения (Томаев, Павлов, Каукин, 2020; Мартыненко, Сайфутдинов, 2023).

3. Пространственно-эконометрические модели. Развиты в рамках

пространственной эконометрики и позволяют учитывать влияние соседних регионов через пространственные лаги (Anselin, 1988; Elhorst, 2014; LeSage, Pace, 2009). С их помощью анализируются диффузионные процессы: распространение экономического роста, технологий и инноваций, изменения занятости, ценовых трендов и т. п. Основу таких моделей составляет весовая матрица *W*, определяющая структуру пространственных связей (географическую, транспортную или функциональную близость).

4. Сетевые модели. Рассматривают регионы как вершины графа, а межрегиональные связи как взвешенные ребра. Методы сетевого анализа (оценка центральности, плотности, модульности) применяются для изучения структуры транспортных и производственных кластеров, выявления регионов-узлов и периферийных территорий. Этот подход позволяет формализовать сложные системы взаимодействий, выходящие за рамки географической смежности (Filenta, Kydros, 2022).

5. Кластерный и факторный анализ. Такой подход используется для группировки регионов по сходству экономических структур и интенсивности связей. Результаты кластеризации служат основанием для построения сценариев развития межрегиональных образований и выделения центров роста внутри макрорегионов (Пискун, Хохлов, 2019).

Разнообразие подходов к исследованию межрегиональных связей отражает сложность самой пространственной экономики, где взаимодействие территорий носит многокомпонентный характер. Межрегиональные межотраслевые, гравитационные, сетевые и кластерные модели каждая по-своему описывают эти процессы, однако все они в той или иной степени ограничены в способности формализовать реальное влияние соседних регионов на параметры развития целевой территории. Пространственно-эконометрические модели позволяют преодолеть эти ограничения и обеспечить необходимый баланс между теоретической строгостью, статистической состоятельностью и практической применимостью в условиях неполноты данных.

Межрегиональные межотраслевые балансы дают детализированное представление о потоках продукции и добавленной стоимости, но остаются, по существу, статическими моделями, фиксирующими структуру экономики. Они слабо отражают динамику пространственных эффектов, зависящих от изменений транспортной доступности, миграции и инновационной активности. Гравитационные модели, напротив, концентрируются на пространственной динамике потоков, однако их

объяснительная сила ограничена: они хорошо описывают интенсивность взаимодействий, но не раскрывают механизмов экономического влияния. Сетевой подход успешно визуализирует архитектуру межрегиональных связей, выявляет центральные узлы и периферийные элементы, но остается в большей степени инструментом структурного анализа, чем прогнозирования. Кластерные и факторные методы полезны для типологизации территорий и выявления сходных моделей развития, однако они не позволяют оценить количественные эффекты взаимодействия между кластерами и не отражают динамику внешних воздействий.

На этом фоне пространственно-эконометрические модели во многом выступают как синтез перечисленных подходов. Они сохраняют системность межотраслевых схем, используя весовые матрицы для описания потоков и взаимосвязей, реализуют идею пространственного притяжения как гравитационные моделей, а также учитывают топологическую структуру пространства межрегиональных связей (как сетевой анализ). При этом в отличие от всех этих методов пространственно-эконометрический подход позволяет не просто констатировать наличие пространственной взаимосвязи, а измерять ее силу, направление и статистическую значимость. Использование лаговых компонент в модели дает возможность различать прямые и косвенные эффекты, то есть определять, как изменение экономических параметров в одном регионе воздействует на показатели других через цепочки взаимозависимостей.

Такой подход особенно продуктивен в ситуациях, когда экономические и социальные процессы распространяются в пространстве неравномерно и подвержены эффектам диффузии. Когда близкие регионы демонстрируют схожую динамику ВРП, занятости или инвестиций, т. е. наблюдается пространственная автокорреляция, необходимо использовать инструменты, способные учитывать зависимость наблюдений, иначе оценки оказываются смещенными, и прогнозы теряют достоверность. Пространственно-эконометрические модели непосредственно решают эту проблему, формализуя структуру взаимовлияний между территориями через матрицу весов, отражающую реальную географическую, транспортную или функциональную связанность.

Кроме того, эти модели обладают высокой адаптивностью к различным масштабам и задачам анализа. Они применимы как для пространственных, так и для панельных данных, могут использоваться на уровне макрорегионов, субъектов РФ или муниципальных образований. Их параметрическая структура позволяет включать множество

факторов – от промышленного производства до плотности транспортной сети – и тем самым обеспечивать комплексный учет условий пространственного развития.

Рассмотрим более подробно пространственно-эконометрические модели на основе панельных данных. Наиболее общая их форма описывается моделью GNS (General Nesting Spatial model), которая включает пространственные лаги как зависимой переменной, так и объясняющих факторов, а также пространственную корреляцию ошибок. Ее обобщенная спецификация имеет вид (3.1):

$$Y_{it} = \rho \sum_{j=1}^{N} w_{ij} Y_{jt} + X_{it}\beta + \sum_{j=1}^{N} w_{ij} X_{jt}\,\theta + \mu_i + u_{it}, \qquad (3.1)$$

$$u_{it} = \lambda \sum_{j=1}^{N} w_{ij} u_{jt} + \varepsilon_{it},$$

где Y_{it} – зависимая переменная для региона i в момент времени t (например, индекс промышленного производства, уровень занятости, валовой региональный продукт); X_{it} – вектор объясняющих переменных, характеризующих социально-экономические параметры региона; w_{ij} – элементы нормированной по строкам матрицы пространственных весов W, задающей структуру межрегиональных связей; μ_i – индивидуальные (фиксированные) эффекты регионов, отражающие устойчивые пространственные различия; ε_{it} – случайная ошибка, распределенная по нормальному закону; $\rho, \beta, \theta, \lambda$ – оцениваемые коэффициенты модели.

Модель GNS объединяет в себе несколько базовых пространственных спецификаций, каждая из которых имеет собственную интерпретацию и раскрывает различные особенности межрегиональных взаимодействий.

Если в уравнении (3.1) остается только лаг зависимой переменной ($\rho \neq 0, \theta = 0, \lambda = 0$), то модель называется пространственной авторегрессией (SAR – Spatial Autoregressive Model) и принимает вид (3.2):

$$Y_{it} = \rho W Y_t + X_{it}\beta + \mu_i + \varepsilon_{it}. \qquad (3.2)$$

Параметр ρ отражает пространственную зависимость результатов, т. е. эффект диффузии экономических процессов между соседними регионами. Рост показателя в одном субъекте РФ может стимулировать аналогичную динамику у географически или функционально близких

территорий. Это означает, что увеличение промышленного производства или инвестиционной активности в одном регионе может вызвать мультипликативный эффект в соседних через производственные и транспортные связи.

При отсутствии пространственного лага зависимой переменной ($\rho = 0$) и объясняющих факторов ($\theta = 0$) GNS превращается в модель с пространственной ошибкой (SEM – Spatial Error Model), но при наличии пространственной корреляции ошибок ($\lambda \neq 0$) модель описывает распространение ненаблюдаемых шоков:

$$Y_{it} = X_{it}\beta + \mu_i + u_{it},\ u_{it} = \lambda W u_t + \varepsilon_{it}. \quad (3.3)$$

Здесь λ отражает эффект пространственного распространения случайных возмущений. Например, макроэкономических шоков, изменения федеральной политики или колебаний внешнего спроса, затрагивающих группы территорий. Это позволяет выявить наличие межрегиональных возмущений, не объясняемых экономическими показателями, но передающихся по транспортно-производственным каналам.

Если $\rho = 0$, $\lambda = 0$, но $\theta \neq 0$, то модель (1) называется пространственной моделью с лагами объясняющих переменных (SLX – Spatial Lag of X Model). Она имеет вид (3.4):

$$Y_{it} = X_{it}\beta + WX_t\theta + \mu_i + \varepsilon_{it}. \quad (3.4)$$

Коэффициенты θ характеризуют влияние условий в соседних регионах через пространственные лаги объясняющих переменных. Это позволяет, например, оценить, как уровень инвестиций или транспортной доступности в соседних субъектах влияет на экономические результаты целевой территории.

Наиболее распространенной спецификацией модели GNS является пространственная модель Дарбина (SDM – Spatial Durbin Model), включающая лаги как зависимой переменной, так и объясняющих факторов ($\rho \neq 0, \theta \neq 0$):

$$Y_{it} = \rho W Y_t + X_{it}\beta + WX_t\theta + \mu_i + \varepsilon_{it}. \quad (3.5)$$

Эта модель одновременно учитывает прямое воздействие характеристик региона на его развитие и косвенные (spillover) эффекты, идущие от соседних территорий. В контексте пространственного анализа региональной экономики SDM позволяет оценить силу межрегиональных мультипликаторов. Например, как инвестиции или рост занятости на промышленно развитой территории отражаются на динамике эко-

номических показателей прилегающих территорий.

Если $\rho \neq 0$ и $\lambda \neq 0$ модель называется пространственно-авторегрессионной моделью ошибок (SAC – Spatial Autoregressive Combined Model) и отражает наличие взаимозависимости как уровней, так и возмущений:

$$Y_{it} = \rho W Y_t + X_{it}\beta + \mu_i + u_{it},\ u_{it} = \lambda W u_t + \varepsilon_{it}. \qquad (3.6)$$

SAC-модель позволяет одновременно учитывать пространственную зависимость между экономическими результатами регионов и пространственную структуру ненаблюдаемых факторов. Это важно для анализа комплексных межрегиональных систем, где эффекты внешнего воздействия могут накладываться на структурные зависимости, обусловленные транспортной или производственной связанностью.

При сохранении всех пространственных лагов ($\rho \neq 0, \theta \neq 0, \lambda \neq 0$) модель GNS становится наиболее общей. Она позволяет учитывать взаимозависимость результатов и факторов развития между регионами; выделять каналы прямого и косвенного влияния; моделировать распространение как наблюдаемых, так и скрытых возмущений, а также корректировать оценки на индивидуальные эффекты (μ_i) и временные тренды.

В прикладном смысле GNS-модель обеспечивает наиболее полное описание пространственной структуры макрорегиона и позволяет формировать сценарии развития целевой территории с учетом не только внутренних условий, но и воздействий со стороны соседних субъектов.

Ключевым элементом любой пространственно-эконометрической модели является матрица пространственных весов $W = [w_{ij}]$, определяющая структуру взаимодействий между регионами. Она задает механизм передачи воздействий и каналов диффузии экономических процессов. Величина w_{ij} характеризует степень влияния региона j на регион i и, по существу, представляет собой количественную меру экономической, транспортной или функциональной близости территорий.

Выбор структуры W имеет не только техническое, но и концептуальное значение. Он определяет, каким образом интерпретируется экономическое пространство в модели: как географическое, экономическое, институциональное или сетевое. В экономическом анализе используются несколько основных типов матриц весов, различающихся по смыслу и области применимости:

1. Матрица смежности (contiguity matrix). Наиболее простая форма, представляющая собой бинарную матрицу смежности:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если регионы } i \text{ и } j \text{ имеют общую границу,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

После нормировки по строкам ($\sum_j w_{ij} = 1$) она отражает непосредственные географические взаимодействия между соседними регионами.

С экономической точки зрения такая матрица адекватна в случаях, когда пространственные эффекты передаются через территориальную смежность. Например, при анализе миграции, маятниковых трудовых потоков или локальных агломерационных эффектов.

2. Матрица расстояний (distance-based matrix). Реализует взвешивание, обратное расстоянию между центрами регионов:

$$w_{ij} = d_{ij}^{-k}, \quad k > 0,$$

где d_{ij} – транспортное или геодезическое расстояние расстояние между регионами. Значение параметра k определяет скорость убывания влияния с расстоянием.

Такой тип матрицы позволяет учесть, что пространственное воздействие уменьшается при росте транспортных и транзакционных издержек. Т. е. чем дальше регионы друг от друга, тем слабее взаимовлияние их экономических параметров. При выборе расстояний не по прямой, а по сети автомобильных и железных дорог, матрица приобретает содержательный смысл транспортной связанности, что особенно важно при анализе пространственного размещения промышленности, а также и пассажирских потоков.

3. Экономически взвешенная матрица (economic proximity matrix). Пространственная близость может не совпадать с географической. Тогда матрица весов строится на основе экономической взаимосвязанности регионов. Элементы w_{ij} определяются через показатели межрегиональных товарных или инвестиционных потоков, объемы взаимной торговли, миграционные связи, интенсивность пассажирских перевозок и т. п.:

$$w_{ij} = \frac{F_{ij}}{\sum_j F_{ij}}, \tag{3.7}$$

где Fw_{ij} – поток товаров, капитала или пассажиров из региона j в регион i.

Такой подход отражает фактические каналы экономической передачи, а не только географическую близость. Он позволяет анализировать, каким образом экономическая активность одного региона влияет

на соседние территории через реальные хозяйственные связи.

4. Функционально-кластерная матрица. Для регионов, включенных в единую производственную или инфраструктурную систему (например, энергетическую сеть, транспортную сеть, металлургический и металлообрабатывающий сектор и т. п.), целесообразно использовать кластерную матрицу весов, где w_{ij} отражает принадлежность регионов к одному типу регионов. В простейшем виде:

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если регионы } i \text{ и } j \text{ принадлежат одному кластеру,} \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Экономическая интерпретация такой матрицы заключается в том, что процессы внутри кластера рассматриваются как взаимозависимые, а взаимодействие между кластерами как слабое или опосредованное.

5. Комбинированные и адаптивные матрицы. На практике структура межрегиональных взаимодействий редко описывается одним фактором. Поэтому используется комбинация различных критериев близости:

$$W = \alpha W^{(geo)} + (1 - \alpha) W^{(econ)}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1, \tag{3.8}$$

где $W^{(geo)}$ отражает географическую связанность, а $W^{(econ)}$ – экономическую. Такая матрица позволяет учитывать как пространственную близость, так и фактические экономические связи.

Возможности модели GNS позволяют использовать ее как основу для полноценного сценарного моделирования, позволяющего интегрировать макро- и мезорегиональные факторы в единые прогнозные конструкции. В отличие от традиционных подходов, ориентированных преимущественно на экстраполяцию трендов и учет эндогенных факторов, GNS учитывает всю совокупность пространственных взаимодействий, формирующих внешние условия развития региона. Это позволяет создавать количественно обоснованные сценарии, отражающие влияние как внутритерриториальных параметров, так и экзогенных воздействий со стороны соседних субъектов макрорегиона:

- сценарии внутреннего развития территории (изменение собственных параметров: инвестиций, производственного выпуска, занятости и др.);
- сценарии внешних воздействий, отражающие возможные изменения параметров соседних регионов;
- комбинированные сценарии, учитывающие взаимное действие внутренних и внешних факторов и пространственную диффузию эффектов.

Структура модели позволяет выделять три ключевых канала, через которые изменения в макрорегиональной среде оказывают влияние на целевую территорию:

1. Прямой эффект (own effect) – влияние изменений параметров самой территории на результат (коэффициенты β в модели).

2. Косвенный эффект (spillover effect) – влияние изменений в соседних регионах через пространственные лаги зависимой переменной (коэффициент ρ) и объясняющих факторов (матрица θ).

3. Эффект пространственных шоков (error propagation) – влияние ненаблюдаемых возмущений, распространяющихся по структуре взаимосвязей (коэффициент λ).

Разделение эффектов дает возможность моделировать различные сценарные условия с учетом различий в механизмах передачи экономических импульсов.

Сценарии могут быть заданы через экзогенные изменения вектора факторов X и его пространственного лага WX. Для целевой территории можно задать:

- увеличение/сокращение инвестиций;
- изменение индекса промышленного производства;
- изменение уровня занятости;
- изменение параметров инфраструктурного или транспортного обеспечения;
- изменение социально-демографических показателей.

Аналогичные изменения могут быть заданы для соседних территорий, что позволит смоделировать воздействие внешних процессов:

- изменение спроса в прилегающих регионах;
- запуск крупных инвестпроектов в соседних территориях;
- изменение логистической доступности в региональной сети;
- изменения федеральной политики, оказывающие неоднородное пространственное влияние.

Экономическая интерпретация достигается за счет свойств модели GNS, которая позволяет учитывать прямой и косвенный эффекты через матричное разложение и расчет пространственных мультипликаторов (LeSage, Pace, 2009). Такой подход необходим, поскольку полученные коэффициенты модели не могут быть непосредственно интерпретированы как величины влияния факторов (т. к. в модели присутствует пространственный лаг зависимой переменной), и для корректной интерпретации результатов необходимо рассчитать матрицу эффектов,

отражающую взаимное влияние регионов через структуру пространственных весов.

Для реализации указанного подхода нужно решить (1) относительно Y:

$$Y = (I - \rho W)^{-1}(X\beta + WX\theta) + (I - \rho W)^{-1}\varepsilon. \quad (3.9)$$

Отсюда следует, что изменение вектора факторов X оказывает влияние на результат Y через матрицу:

$$S = (I - \rho W)^{-1}(\beta I + \theta W), \quad (3.10)$$

где S – матрица совокупных (общих) эффектов. Элемент S_{ij} матрицы S показывает, насколько изменение фактора в регионе j влияет на результат в регионе i. На основе матрицы S вычисляется прямой эффект (Direct effect), который представляет собой среднее по диагональным элементам матрицы S:

$$DE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} s_{ii}. \quad (3.11)$$

Прямой эффект отражает влияние изменения фактора X_i на результат Y_i в том же регионе, учитывая внутреннюю обратную связь. Также матрица S позволяет рассчитать косвенный эффект (*Indirect effect* или *spillover*), который показывает влияние изменений факторов в других регионах на результат в целевом регионе:

$$IE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j\neq i} s_{ij}. \quad (3.12)$$

Общим эффектом (Total effect) называется сумма прямого и косвенного эффектов. Она показывает полное влияние изменения фактора на всю систему регионов с учетом всех цепочек пространственных взаимодействий.

На основе модели GNS могут быть сформированы три типа сценариев:

Базовый (инерционный) сценарий. Определяется через экстраполяцию текущих тенденций и сохранение параметров соседних регионов на уровне фактической динамики. Используется для оценки естественной траектории развития.

Внутренний структурный сценарий. Предполагает изменение внутренних факторов целевой территории (например, рост инвестиций или выпуск промышленности). Использование GNS позволяет определить, как эти изменения могут быть усилены или ослаблены пространственной средой. Например, повышение инвестиционной активности

может реализоваться лишь частично, если соседние регионы демонстрируют экономический спад (некоторая часть эффекта может поглотиться внешней средой).

Внешний сценарий (экзогенный сценарий макрорегиональной динамики). Включает изменение параметров соседних регионов, изменение транспортной доступности, структурные сдвиги в производственном или территориальном разделении труда. Например: запуск крупного металлургического проекта в соседнем субъекте вызывает рост выпуска, инвестиций и занятости, что через параметры ρ и θ приводит к росту спроса на продукцию предприятий целевой территории.

Естественно, возможна комбинация всех трех типов сценариев, которая объединяет изменения внутренних и внешних параметров, что позволяет анализировать комплексные изменения в макрорегиональной системе.

ГЛАВА 4. ЭВОЛЮЦИЯ ПРОГНОСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРАЕКТОРИЙ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ[44]

4.1. Вводные положения

Современная энергетика характеризуется высокой степенью неопределенности, обусловленной воздействием целого ряда факторов. К ним относятся технологические и общественно-экономические неопределенности, геополитические процессы и нормативно-правовые решения (World…, 2025; Wood…, 2025). Электроэнергетические системы обладают ярко выраженными признаками сложных нелинейных объектов. Они могут иметь множество устойчивых состояний, при которых различные способы и объемы генерируемой мощности могут быть экономически эффективными при неизменных внешних условиях, но крайне чувствительными к начальным условиям в силу системного свойства последействия: предыдущие решения, реализованные в текущем состоянии энергосистемы, могут привести к радикально разным результатам в долгосрочной перспективе. Кроме того, при непрерывном изменении управляющих параметров в них могут наблюдаться качественные скачкообразные переходы между режимами работы. Преобладающий на практике подход к прогнозированию использует набор прогнозных инструментов, направленных на поиск некой базовой траектории развития и допущении флуктуаций вокруг нее. Однако нужно учитывать непредсказуемость систем, в частности, используя теорию системной динамики, где для установления меры хаоса определяются степени дивергенции траекторий с помощью показателей Ляпунова (Lorenz, 1963; May, 1976). Практический смысл такого прогностического усложнения направлен на ограничения возможности разработки неэффективных долгосрочных стратегий энергетики, упускающих возможности своевременного перехода к активным трансформациям энергетического сектора.

В рамках исследования планируется создание комплексной теоретико-методологической системы, которая позволит формализовать нелинейное поведение электроэнергетических систем, учитывая многообразие их равновесий и чувствительность к параметрам. Обновляемая методология должна способствовать упреждающему распознаванию

[44] *Автор: А. Ю. Домников.*

критических переходов и установлению границы детерминированной предсказуемости с помощью показателей Ляпунова. Выход за ее пределы должен переводить прогнозный процесс на вероятностное моделирование. Такая парадигма прогностики опирается на междисциплинарный синтез, где основополагающими научными дисциплинами для формального описания эволюции энергосистем будут теория динамических систем и нелинейная динамика. Координатами многомерного фазового пространства могут быть генерируемая энергия и рабочая мощность ее источников, потребность и спрос на электроэнергию, инвестиции и технологический прогресс в отрасли (Strogatz, 2018). Ключевая гипотеза искомой прогнозной парадигмы – многообразие поведения нелинейных систем, к каковым относятся энергетические системы: от устойчивых равновесий до периодических колебаний и детерминированного хаоса (Lorenz, 1963; May, 1976). Подключение к прогнозированию синергетики и теории самоорганизации дает возможность описывать коллективные явления, которые возникают в результате взаимодействия большого числа элементов энергосистемы как большой человеко-машинной системы с ограниченной рациональностью в условиях большого числа независимых лиц, принимающих решения. К разряду таких явлений относятся как организационно-экономические явления (например, спонтанное образование коалиций субъектов или возникновение зон ускоряющегося энергопотребления), так и технические, например, цепные отказы в сетях и системные аварии.

Согласно эволюционной экономике и теории кривых обучения, динамика цен на технологии подчиняется степенному закону (Hoekstra, Berg, et. al., 2025; Carlino, Creutzig, Vuuren, 2025; Hulst, Berg, Steubing, 2025; Wright, 1936; Rubin, Azevedo, et. al., 2015). Кумулятивный объем выпуска и коэффициент обучения формируют траекторию снижения издержек. Именно это обстоятельство объясняет, почему, хотя молодые технологии в данный момент стоят дороже, они в долгосрочной перспективе могут занять доминирующее положение благодаря более резкому снижению издержек и эффектам обратной связи.

В параграфе 4.2 настоящей монографии обобщена историко-методологическая эволюция подходов в прогнозировании энергетики: тренды – структурно-балансовые модели – детерминистическая оптимизация – сценарные подходы – новейшие методы, основанные на теории сложности. Каждый этап развития теории и практики прогнозирования привносил новые элементы, позволяющие отражать процессы

перспективного развития энергетики, но одновременно порождал новые ограничения и пробелы в этом знании.

Параграф 4.3 посвящен теоретическому осмыслению нелинейной динамики применительно к электроэнергетическим комплексам. В нем рассматриваются такие элементы и понятия как фазовое пространство, множественные аттракторы, показатели Ляпунова, фрактальная структура и синергетические явления, хаос (Lorenz, 1963; May, 1976; Strogatz, 2018; Kuramoto, 1984). Изменение экономических условий может привести к переходу системы от устойчивого равновесия через периодические колебания к хаотическому режиму функционирования (Yang, Wang, Luh, 2005; Unsihuay-Vila, Marangon-Lima, Souza, 2010).

4.2. Генезис методологических концепций прогнозирования в энергетике: от линейных экстраполяций к нелинейной динамике

В условиях энергетического перехода, когда происходит формирование новых технологических траекторий развития электроэнергетических систем, актуальность прогнозирования и моделирования резко возрастает. Это обстоятельство подталкивает к глубокому анализу истоков методологических концепций, лежащих в основе прогнозирования в сфере электроэнергетики. Современные вызовы, обусловленные множеством неопределенностей, нелинейными обратными связями, масштабным внедрением распределенной генерации и возобновляемых источников энергии, выходят за рамки возможностей традиционных линейных и статических подходов в энергетике (World…, 2025; International, 2021; Ember, 2025). В этом разделе мы исследуем эволюцию методологических подходов в энергетическом прогнозировании, анализируем их ограничения и пробелы. На основе этого анализа обосновывается необходимость перехода к новой парадигме, основанной на принципах сложности, которая включает в себя инструментарий нелинейной динамики, теории хаоса и стохастического моделирования (Lorenz, 1963; May, 1976; Strogatz, 2018; Haken, 2004).

В конце XX века, в эпоху стремительной электрификации городов Европы и Северной Америки, инженеры и архитекторы столкнулись с растущей потребностью в прогнозировании энергетических потребностей. Для обеспечения масштабного развития электроэнергетики были необходимы точные прогнозы будущей нагрузки на объекты электростанций и распределительных сетей. Первоначальные прогнозы осно-

вывались на простых технико-хозяйственных расчетах, которые предполагали прямую зависимость между ростом населения, развитием промышленного производства и потреблением энергии. В энергетике видели пассивную реакцию на внешний спрос, заданный извне, а основным методом предсказания служила линейная экстраполяция имеющихся тенденций. В качестве яркого примера этого периода можно привести работы британских и американских инженеров-электриков. Исходя из информации о росте количества подключений и удельного потребления, разрабатывали линейные прогнозы на 5–10 лет, предполагая неизменность темпов развития системы. Этот подход страдал методологическими недостатками, поскольку не учитывал обратные связи между развитием энергетической инфраструктуры, эволюцией экономической структуры и трансформацией потребительских привычек. Это приводило к постоянным ошибкам прогнозирования при возникновении новых внешних условий.

С 1950 по 1970 годы методология энергетического прогнозирования претерпела существенное развитие, обусловленное пониманием энергетики как сложной системы, где различные секторы экономики, типы топлива и способы преобразования энергии тесно взаимосвязаны. Внедрение структурно-балансовых моделей межотраслевого баланса, разработанных на основе подхода В. Леонтьева, открыло возможность прямого учета материальных и энергетических связей между отраслями экономики. Это позволило анализировать отдаленные последствия изменения спроса на энергию в одной отрасли для энергопотребления в других. Разработка энергетических балансов, ставшая обычной практикой национальных статистических служб, создала необходимую информационную базу для более точных прогнозов в сфере энергетики. В это время появились первые комплексные модели топливно-энергетического баланса, предназначенные для изучения конкуренции между разными видами топлива в разных отраслях потребления. Эти модели позволяли предсказывать, как изменение цен на топливо повлияет на структуру энергопотребления. Тем не менее методология того времени сохраняла статическую основу, опираясь на анализ равновесия и предполагая наличие единственного наилучшего распределения ресурсов. Она не принимала во внимание динамические эффекты, вызванные инвестиционными циклами, технологическими инновациями и накоплением опыта. Нефтяной кризис 1973 года, сопровождавшийся резким скачком цен на нефть и глубокими изменениями в структуре мировой энергетики, выявил несостоятельность статических балансовых

моделей. Это событие послужило мощным толчком к переходу на динамические оптимизационные подходы.

В период с 1970-х по конец 1990-х годов наблюдался расцвет детерминистической оптимизации в энергетическом прогнозировании. Этот этап был обусловлен ростом вычислительных возможностей и совершенствованием методов математического программирования, что позволило решать сложные задачи оптимального развития энергетических систем, включающие большое количество переменных и ограничений. В 1976 году Международное энергетическое агентство запустило Программу анализа энергетических технологических систем, в ходе которой была создана модель *MARKAL*, предназначенная для моделирования электроэнергетических систем. *MARKAL*, основанная на линейном программировании, позволяет вычислить оптимальную стратегию развития энергосистемы. Цель модели – минимизировать общие дисконтированные затраты на энергетическое обеспечение при условии соблюдения ограничений по ресурсам, технологическим возможностям и выбросам загрязняющих веществ. Разработанная группой ученых под руководством Л. Фишбоне в Брукхейвенской национальной лаборатории США, модель *MARKAL* представляет энергосистему как сетевой граф. Этот граф связывает первичные источники энергии с конечными энергетическими услугами, используя цепочки технологий, отвечающих за преобразование и транспортировку энергии. Эволюция модели *MARKAL* привела к появлению семейства *MARKAL-MACRO*, объединяющих технологически тонкую детализацию энергосистемы с макроэкономической моделью, описывающей общее равновесие. Такая интеграция позволила учесть обратные связи – как изменения цен на энергию сказываются на экономическом росте и структуре спроса. С 1996 по 2001 годы была создана более универсальная модельная платформа *TIMES* (Loulo, R., Remme, et. al., 2005), унаследовавшая сильные стороны *MARKAL*, но позволившая в большей степени гибко настраивать временную структуру модели, учитывать сезонные и суточные колебания нагрузки, а также моделировать ситуации неполной конкуренции и множественных равновесий. К середине 1990-х годов модели *MARKAL-TIMES* стали популярным инструментом в национальных энергетических агентствах многих ведущих стран, включая США, страны Евросоюза, Японию и Канаду. Их использовали для разработки долгосрочных энергетических планов и оценки влияния климатических мер. В США, наряду с прогрессом в области оптимизационных моделей, была разработана Национальная система энергетического

моделирования (*NEMS*). Эта система, состоящая из более десяти модулей, охватывающих различные секторы энергетики, предоставляет возможность проводить регулярные анализы последствий различных энергетических политик на горизонте 20–25 лет.

В СССР период детерминистической оптимизации в сфере энергетического прогнозирования длился с начала 1970-х до конца 1990-х годов. Этот период характеризовался особым подходом к планированию энергетики, где ключевую роль играли математическое моделирование и централизованное управление топливно-энергетическим комплексом. В 1975 году Госплан СССР принял «Методические положения оптимизации развития ТЭК», разработанные Академией наук, что стало важным шагом в реализации этой концепции. Начало широкого использования оптимизационных методов в энергетическом планировании было официально положено именно тогда. Разработкой соответствующей методологии занимались ведущие научные центры, среди которых выделялись ЭНИН им. Г. М. Кржижановского и ряд других академических институтов. Для проведения исследования использовались оптимизационные модели, сформулированные в виде систем математических уравнений и неравенств, которые моделируют работу электроэнергетической системы. Целью этих моделей было минимизировать затраты на топливо, строительство и обслуживание энергетических объектов. Для согласования проектных решений и формирования топливно-энергетических балансов использовался балансовый метод, заимствованный из плана ГОЭЛРО. Система была основана на детерминистском подходе, согласно которому все ее параметры либо уже известны, либо могут быть предсказаны с высокой точностью, исходя из существующих тенденций и принципов централизованного планирования.

В период с 1970 по 1990 годы в энергетическом прогнозировании СССР доминировала детерминистическая оптимизация, при которой для планирования развития энергетического сектора применялись жесткие математические модели и централизованный подход. К преимуществам данного подхода относятся системность, которая позволила координировать развитие всех регионов, математическая обоснованность принятия решений, ресурсная эффективность, особенно актуальная в условиях ограниченности капитала, долгосрочный аспект развития энергетики на десятилетний горизонт, интеграция энергетического сектора с экономикой посредством взаимосвязанных моделей и обеспечение надежности энергоснабжения за счет централизованной

оптимизации режимов работы. К недостаткам можно отнести игнорирование фактора неопределенности в прогнозах, недостаточную гибкость при адаптации к меняющимся условиям, трудности в учете всех взаимосвязей в динамично развивающейся экономике, ограниченные вычислительные ресурсы, отсутствие автоматизированных механизмов адаптации, недооценку инновационных процессов и искажение ценовых показателей.

Детерминистическая оптимизация внесла значительный вклад в развитие мощной электроэнергетической системы СССР, но с ростом сложности экономики и технологического прогресса ее недостатки стали все более заметными. Методы оптимизации, заложенные в советский период, по-прежнему лежат в основе современной методологии исследований энергетики. Вместе с тем современные подходы дополняют их стохастическими методами и сценарным анализом (Alanazi, Alharthi, et. al., 2025; Frischmuth, Hess, Härtel, 2024; Fu, Huang, Wang, 2021; Khamees, Badra, Abdelaziz, 2021), что позволяет учитывать неопределенность и эффективно реагировать на меняющиеся обстоятельства. Принятие решений основывалось на строгих математических подходах, таких как линейное и нелинейное программирование, а также динамическая оптимизация. Благодаря этому достигалась теоретическая обоснованность решений, что позволяло определять оптимальные структуры генерирующих мощностей, межсистемные взаимодействия и распределение энергоресурсов.

Главным недостатком детерминистического подхода являлось его основополагающее предположение о возможности точного предсказания будущих параметров системы. На деле же спрос на энергию, топливные цены и технические характеристики оборудования характеризуются существенной неопределенностью (Alanazi, Alharthi, et. al., 2025; Fu, Huang, Wang, 2021). Детерминистические модели игнорировали вероятностный характер этих и многих других факторов. В результате централизованная планирующая система оказалась недостаточно гибкой для адаптации к меняющейся обстановке. Детерминистические модели, лежащие в основе пятилетних планов, оказывались неэффективными при изменении внешней обстановки. Внесение изменений в эти планы осложнялось из-за существующей сложной бюрократической системы.

Современные исследования показывают, что детерминистический подход недостаточно совершенен. Его упрощенное игнорирование неопределенности, а также вероятностных аспектов спроса и технологи-

ческих показателей делает такие модели неэффективными для долгосрочного планирования в динамично меняющемся мире. С 1990-х годов в мировой энергетической практике получили распространение стохастические методы, сценарный анализ и робастное оптимизирование (Alanazi, Alharthi, Alzahrani, 2025; Frischmuth, Hess, Härtel, 2024; Wood, 2025; Bloomberg, 2025). В современных моделях неопределенность обрабатывается с помощью вероятностных распределений, многосценарного моделирования и методов машинного обучения (Yang, Wang, Liu, 2025; Qureshi, Ahamd, et. al., 2024; Hu, Wang, 2024; Islam, Rahman, Muttaqi, 2025; Campagne, Amara-Ouali, et. al., 2024; Sua, Chen, Wang, 2025). При этом наследие советской школы оптимизации не забыто. В России после распада СССР методология была трансформирована для применения в условиях рыночной экономики. Модель «Единый покупатель» представляет собой пример такого адаптивного подхода, где оптимизация режимов дополняется элементами рыночного ценообразования.

Хотя техническое совершенство оптимизационных моделей достигло значительных высот, к концу двадцатого века методология детерминистической оптимизации столкнулась с фундаментальными ограничениями, которые стали несомненно очевидными. Оптимизационные модели вначале основывались на парадигме поиска единственно верного решения, которое минимизировало бы дисконтированные затраты на электроснабжение. Эта парадигма предполагала абсолютную рациональность всех экономических субъектов, полное знание о будущих тенденциях развития технологий и цен, отсутствие институциональных ограничений и трансакционных издержек. Инвестиционные решения в действительности принимаются в обстановке значительной неопределенности, которая касается будущих технологических разработок, нормативно-правового регулирования и геополитической обстановки (Wood, 2025). При этом поведение экономических субъектов определяется ограниченной рациональностью, использованием эвристик и склонностью к инерции (Mishra., Bakke, Korpås, et. al., 2025; Alberizzi, Carlini, Luzi, 2024). В данном случае речь идет о том, как исторически сложившиеся технологии и инфраструктурные решения порождают положительные обратные связи, которые мешают переходу к другим, возможно более эффективным вариантам организации системы, даже если меняются экономические условия. Кроме того, детерминистические оптимизационные модели, как правило, исходили из предположения о гладких, непрерывных траекториях развития си-

стемы и не учитывали вероятность резких скачкообразных изменений в функционировании, которые могут возникать при достижении критических значений параметров (Saidi, Makhlouf, Khalgui, 2024; Scheffer, Carpenter, Foley, et. al., 2001).

С 1990 по 2010 годы наблюдался переход в энергетическом прогнозировании от модели детерминистической оптимизации к подходу, который учитывает множество сценариев и открыто признает неопределенность (Wood…, 2025; Bloomberg, 2025). Непредсказуемость будущего развития электроэнергетики, обусловленная многими факторами, включая темпы экономического роста, колебания цен на ископаемое топливо, прогресс в области возобновляемых источников энергии и накопителей, политику в сфере климата и геополитические изменения, привела к отказу от создания единого базового прогноза. Вместо этого предпочтение отдано разработке набора альтернативных сценариев, каждый из которых отражает различные комбинации развития ключевых факторов, определяющих будущее электроэнергетики. С 2000-х годов Российская академия наук совместно с Институтом энергетических исследований РАН занимается разработкой долгосрочных прогнозов развития энергетической сферы России и глобальных энергетических рынков. В их работе применяется сценарный подход, который рассматривает три основных варианта развития: инновационный, инерционный и энергосырьевой. Несмотря на то, что сценарный подход позволяет отразить многовариантность будущего, он все же придерживается линейно-экстраполяционной логики. В рамках этого подхода каждый сценарий является последовательной эволюцией, основанной на предположениях относительно значений ключевых параметров. Разнообразие сценариев формировалось путем варьирования этих предположений. Этот подход пренебрегает принципиальной нелинейностью электроэнергетических систем, которая характеризуется множеством равновесий при постоянных внешних условиях, высокой восприимчивостью к начальным состояниям и малым возмущениям, а также склонностью к быстрым фазовым переходам при корректировке управляющих воздействий. Энергетический переход, подразумевающий смену энергетической структуры с ушедших в прошлое ископаемых топлив на возобновляемые источники, а также снижение выбросов углекислого газа в конечном потреблении за счет электрификации транспортной и тепловой сфер и переход к распределенным системам генерации и интеллектуальным сетям, представляет собой не просто замену одних технологий другими. Это скорее ряд существен-

ных переходов, при которых энергетическая система может совершить скачкообразное изменение от одного стабильного состояния к другому, качественно новому, когда определенные критические параметры достигают своих предельных значений.

Начиная с 2010 года, мы наблюдаем формирование новой методологической парадигмы в исследовании электроэнергетических систем. Эта парадигма основана на применении инструментов теории сложных систем, нелинейной динамики, теории хаоса, бифуркационного анализа и стохастического моделирования (Lorenz, 1963; May, 1976; Strogatz, 2018; Haken, 2004; Alanazi, Alharthi, Alzahrani, 2025; Frischmuth, Hess, Härtel, 2024; . Yang, Wang, Liu, 2025; Islam, Rahman, Muttaqi, 2025; Sua, Chen, Wang, 2025; Saidi, Makhlouf, Khalgui, 2024; Rajakovic, Kuzle, Zeljko, 2025; Ceylan, Ozturk, Karakose, 2025; Prigogine, Stengers, 1984). Такой поворот в подходе обусловлен рядом причин. Внедрение масштабных возобновляемых источников энергии, обладающих стохастичностью и непредсказуемой генерацией, обусловленной погодными факторами, ставит перед нами принципиально новые задачи в управлении балансом электроэнергии. Регулирование производства и потребления энергии в такой системе требует четкого учета неопределенности и проведения вероятностного анализа рисков возникновения дефицита мощности (Fu, Huang, Wang, 2021; Yang, Wang, Liu, 2025; Rajakovic, Kuzle, Zeljko, 2025; Prigogine, Stengers, 1984). Второе важное изменение заключается в переходе к распределенной генерации и вовлечению потребителей в управление спросом, а также в агрегации распределенных энергетических ресурсов. Это трансформирует энергосистему, превращая ее из традиционной иерархической централизованной системы в сложную адаптивную структуру, состоящую из множества автономных агентов. Эти агенты принимают децентрализованные решения, основываясь на ценовых сигналах и своих индивидуальных предпочтениях. Такой подход делает неэффективным традиционное централизованное планирование (Mishra, Bakke, Korpås, 2025; Alberizzi, Carlini, Luzi, 2024; Harder, Büttner, et. al., 2025). Цифровизация энергетики, реализуемая с помощью интеллектуальных счетчиков, систем управления с искусственным интеллектом и блокчейн-платформ для P2P торговли электроэнергией, открывает новые горизонты для сбора и анализа огромных объемов высокочастотных данных. Это, в свою очередь, создает предпосылки для использования методов машинного обучения и анализа больших данных, что позволяет обнаружить скрытые закономерности и тенденции в работе энергетической системы. Четвертое об-

стоятельство – стремительное развитие технологий в энергетике, выражающееся в резком снижении цен на солнечные панели и ветровые турбины, прорывах в сфере хранения энергии и появлении инновационных концепций, включая зеленый водород и синтетическое топливо, – вносит значительную неопределенность в вопрос о будущей конкурентоспособности различных энергетических технологий. Это делает невозможным создание точных детерминистических прогнозов, основанных на экстраполяции существующих тенденций (World…, 2025; Hoekstra, Berg, Steinbuch, 2025; Carlino, Creutzig, Vuuren, 2025; Hulst, Berg, Steubing, 2025; International…, 2021; Ember, 2025).

Описание нелинейной динамики электроэнергетических систем требует комплексного междисциплинарного подхода, который синтезирует инструменты различных областей знания. Теория динамических систем предоставляет формальную математическую основу для описания эволюции многомерных систем во времени, используя системы дифференциальных или разностных уравнений. Эти уравнения устанавливают связь между скоростью изменения состояний системы, ее текущим состоянием и управляющими факторами. В основе теории лежат три ключевые концепции: фазовое пространство, траектории в фазовом пространстве и аттракторы. Фазовое пространство отображает все возможные состояния системы, траектории же в нем иллюстрируют ее динамику во времени. Аттракторы, в свою очередь, символизируют устойчивые режимы поведения, к каким системы, начальные условия которых находятся в определенной близости, стремятся притягиваться. В отличие от линейных систем, которые демонстрируют лишь одно равновесие, нелинейные системы могут иметь несколько аттракторов (May, 1976; Strogatz, 2018). К ним относятся неподвижные точки, представляющие стационарные состояния, предельные циклы, отвечающие за периодические колебания, и странные аттракторы, где наблюдается хаотическое поведение с траекториями, не подчиняющимися предсказанию и не имеющими периода. В электроэнергетических системах множественность аттракторов подразумевает, что разные структуры генерации, где соотношение угольной, газовой, ядерной и возобновляемой энергии варьируется, могут быть экономически выгодными и стабильными при одинаковых внешних условиях (Saidi, Makhlouf, Khalgui, 2024; Scheffer, Carpenter, et. al., 2001). К таким условиям относятся цены на топливо, стоимость технологических решений и регулирование. Выбор между этими конфигурациями не определяется исключительно

экономическими факторами, но зависит от исторического контекста, начальных условий и последовательности принятых инвестиционных решений.

Изучение хаоса, начатое Э. Лоренцем при исследовании конвекционных процессов в атмосфере (Lorenz, 1963) и Р. Мэем при изучении динамики популяций (May, 1976), выявило фундаментальное свойство нелинейных систем. Суть этого свойства заключается в их высокой чувствительности к начальным условиям: незначительные отклонения в исходном состоянии системы могут со временем привести к радикально разным, непредсказуемым результатам. Эта особенность ставит ограничения на детерминированную предсказуемость поведения системы, даже если мы полностью владеем уравнениями, описывающими ее движение. В качестве классического примера можно привести логистическую карту Р. Мэя (May, 1976). Это простое разностное уравнение моделирует динамику популяции, учитывая ограниченность ресурсов. Оно демонстрирует всю палитру возможных сценариев развития, начиная от устойчивого равновесия и заканчивая детерминированным хаосом, при изменении параметра роста, который приводит к последовательности бифуркаций удвоения периода. Изучение логистической карты в контексте моделирования технологических замещений в электроэнергетике выявило, что при конкретных настройках параметров, отражающих уровень конкуренции между технологиями и степень нелинейности кривых обучения, система может проявлять хаотическое поведение. В результате наблюдаются непредсказуемые колебания доли технологий в энергетическом производстве (Кожов, Кожов, 2025; Кононов, Тыртышный, 2013). Чувствительность системы к начальным условиям количественно характеризуется показателями Ляпунова, которые определяют скорость, с которой близкие траектории в фазовом пространстве расходятся экспоненциально. Положительный старший показатель Ляпунова свидетельствует о хаотичности системы. Это означает, что ошибка в начальных данных удваивается за время, обратное по значению показателю Ляпунова. Данное время определяет фундаментальный предел, ограничивающий возможность детерминированного прогнозирования, независимо от точности измерений или вычислительной мощности, которая у нас имеется (Lorenz, 1963; May, 1976; Strogatz, 2018). Анализ показателей Ляпунова в электроэнергетических системах помогает установить временные рамки, в течение которых можно с уверенностью прогнозировать детерминировано тра-

екторию развития системы. За пределами этих временных горизонтов прогнозирование требует перехода к вероятностным сценариям и ансамблевым методам (Wood…, 2025; Alanazi, Alharthi, Alzahrani, 2025; Fu, Huang, Wang, 2021; Bloomberg…, 2025; Yang, Wang, Liu, 2025).

Идеи синергетики и теории самоорганизации, предложенные Г. Хакеном (Haken, 2004) и И. Пригожиным (Prigogine, Stengers, 1984), фокусируются на коллективных явлениях, которые возникают в результате взаимодействия большого числа элементов сложной системы. Эти явления приводят к появлению упорядоченных структур и согласованного поведения, причем самоорганизация происходит без необходимости централизованного руководства. Важнейшими концепциями выступают параметры порядка, отражающие макроскопическое состояние системы и определяющие общую динамику большого числа микроскопических компонентов. Существенным является также принцип подчинения, согласно которому быстро меняющиеся переменные адаптируются к медленным параметрам порядка. Это позволяет упростить модель системы, сведя ее к замкнутой системе с уравнениями, описывающими только параметры порядка (Kuramoto, 1984; Haken, 2004). В контексте электроэнергетики синергетический подход помогает объяснить спонтанное образование промышленных кластеров вблизи объектов с доступной энергией, самоорганизацию локальных энергосистем с распределенным производством и взаимообменом электроэнергией между потребителями, цепные отказы в сетях, которые возникают при перегрузке отдельных участков и распространяются по всей системе, а также синхронизацию колебаний спроса и инвестиционных волн в разных регионах, обусловленную взаимодействием глобальных рынков энергоресурсов и технологий (Kuramoto, 1984).

Изучение качественных трансформаций в поведении динамических систем при постепенной модификации управляющих величин, разработанное А. Пуанкаре и усовершенствованное школой Андронова – Понтрягина – Хопфа, известно как бифуркационный анализ. Этот анализ раскрывает такие явления, как исчезновение или появление равновесных состояний, изменение их устойчивости, возникновение периодических колебаний или хаотичных режимов функционирования (Strogatz, 2018). Типология бифуркаций включает бифуркации коразмерности один, происходящие при варьировании одного параметра и включающие седло-узловую бифуркацию, при которой пара равновесий, устойчивое и неустойчивое, сливаются и исчезают при

достижении критического значения параметра, что означает невозможность функционирования системы в прежней конфигурации и необходимость качественного перехода, транскритическую бифуркацию, при которой два равновесия обмениваются устойчивостью при пересечении параметром критического значения, что соответствует смене доминирующей технологии в электроэнергетической системе, бифуркацию удвоения периода, при которой устойчивый предельный цикл теряет устойчивость с рождением цикла удвоенного периода, что может происходить каскадом с переходом к хаосу (May, 1976; Strogatz, 2018), и бифуркацию Хопфа, при которой устойчивое равновесие теряет устойчивость с рождением устойчивого предельного цикла малой амплитуды, соответствующего возникновению периодических колебаний в инвестиционных циклах или ценовой динамике (Kuramoto, 1984). В двумерном пространстве параметров, где пересекаются линии бифуркаций, могут возникать бифуркации коразмерности два. К ним относятся бифуркация Богданова – Такенса и бифуркация складки предельного цикла. В результате этих бифуркаций наблюдаются существенные перестройки фазовых портретов, что может привести к появлению нескольких устойчивых режимов работы системы. Использование бифуркационного анализа в электроэнергетике дает возможность выявить ключевые значения параметров, например, цены на углерод, стоимости возобновляемых источников энергии, уровня субсидирования, структуры спроса, при которых наблюдаются резкие качественные изменения в генерации электроэнергии (Saidi, Makhlouf, Khalgui, 2024; Scheffer, Carpenter, et. al, 2001). Это знание позволяет разрабатывать управленческие стратегии, направленные на предотвращение нежелательных бифуркаций или стимулирование оптимальных трансформаций в электроэнергетической системе.

Идея точек необратимости, предложенная М. Гладуэлом для социальных систем и Т. Лентоном для климатической системы Земли (Lenton, Held, et. al, 2008), фокусируется на критическом пороге параметров. При пересечении этого порога система необратимо переходит в совершенно новый качественный режим, возвращение к прежнему состоянию либо становится невозможным, либо требует колоссальных усилий из-за гистерезисных явлений и положительных обратных связей (Scheffer, Carpenter, et. al, 2001; Lenton, Held, et. al, 2008). Достижение критической доли возобновляемых источников энергии в энергопроизводстве может привести к необратимым изменениям в элек-

троэнергетических системах. После этого рубежа система неизбежно переходит в режим, где возобновляемые источники энергии играют доминирующую роль. Такой переход обусловлен рядом факторов: снижением стоимости возобновляемых технологий благодаря эффектам обучения (Hoekstra, Berg, Steinbuch, 2025; Carlino, Creutzig, Vuuren, 2025; Hulst, Berg, Steubing, 2025), усилением сетевых эффектов, делающих участие в системе более привлекательным для новых участников, а также институциональными изменениями, которые закрепляют новую конфигурацию системы посредством регуляторных механизмов и инвестиционных ожиданий. Определение момента приближения системы к точкам необратимости крайне важно для оперативного принятия управленческих решений. Такие решения могут позволить либо избежать нежелательного перехода, либо подготовиться к нему и эффективно использовать новые возможности, которые он может создать. Раннее предупреждение о приближении к критическим состояниям реализуется посредством мониторинга индикаторов, сигнализирующих о критическом замедлении динамики системы. К таким индикаторам относятся: замедление скорости возврата системы к равновесию после незначительных возмущений вблизи бифуркационной точки, рост разброса флуктуаций управляющих переменных, усиление корреляционных связей между удаленными элементами системы и появление колебаний между различными устойчивыми состояниями (Scheffer, Carpenter, et. al, 2001).

Использование стохастического моделирования и методов Монте-Карло позволяет напрямую учесть неопределенность, которая присутствует как в параметрах модели, так и во внешних воздействиях. Для этого неизвестные величины представляются как случайные переменные с заранее заданными вероятностными распределениями. Затем генерируются многочисленные реализации траекторий развития системы, что позволяет оценить вероятностные распределения возможных исходов и количественно охарактеризовать риски (Alanazi, Alharthi, Alzahrani, 2025; Frischmuth, Hess, Härtel, 2024; Fu, Huang, Wang, 2021; Khamees, Badra, Abdelaziz, 2021). Неопределенность в электроэнергетических системах обусловлена рядом факторов. К ним относятся волатильность цен на ископаемое топливо, которая связана с геополитическими событиями и колебаниями спроса и предложения на мировых рынках. Также значительную роль играют колебания цен на минеральное сырье, необходимое для производства элементов, таких

как батареи, солнечные панели и ветровые турбины. Неопределенность также связана с технологическими параметрами новых источников генерации и накопления энергии, стоимость которых динамично меняется под влиянием научно-исследовательских разработок и объемов производства. Непредсказуемые регуляторные решения и политические меры, зависящие от результатов выборов и общественного мнения, также вносят свой вклад в неопределенность. Наконец, климатическая изменчивость оказывает влияние на доступность возобновляемых источников энергии, таких как водные, ветровые и солнечные ресурсы. Оптимизационные модели, обогащенные стохастическими элементами, например, стохастическое программирование и робастная оптимизация, предоставляют возможность выявлять оптимальные стратегии управления в условиях неопределенности. Они способны минимизировать ожидаемые издержки или же максимизировать надежность энергоснабжения даже в самых неблагоприятных сценариях (Alanazi, Alharthi, Alzahrani, 2025; Frischmuth, Hess, Härtel, 2024; Fu, Huang, Wang, 2021). Байесовский подход в адаптивном управлении дает возможность динамически обновлять вероятностные оценки параметров, получая новые данные. Благодаря этому решения могут быть пересмотрены с учетом реального развития неопределенных ситуаций.

В отличие от традиционных подходов, где моделирование электроэнергетических систем строится на оптимизации работы всей системы, агентное моделирование предлагает принципиально новый взгляд. Оно фокусируется на представлении множества гетерогенных автономных агентов, каждый из которых действует независимо. К таким агентам относятся производители электроэнергии разных типов, инвесторы в энергетическую инфраструктуру, потребители с различными потребностями и чувствительностью к ценам, агрегаторы распределенных энергетических ресурсов, торговые организации и государственные регулирующие органы. Каждый агент принимает решения, основываясь на собственных целях, стратегиях и ограниченном знании о состоянии системы и действиях других агентов (Mishra, Bakke, Korpås, et. al., 2025; Alberizzi, Carlini, Luzi, 2024; Harder, Büttner, Schick et. al., 2025). Сетевые взаимодействия агентов, осуществляемые посредством рыночных механизмов, контрактных соглашений и физических связей, порождают эмерджентное поведение системы на макроуровне. Это поведение не является простым суммированием действий отдельных агентов и может радикально отличаться от результатов централи-

зованного управления. Такая разница обусловлена несовершенством конкуренции, наличием информационных асимметрий, стратегическим подходом агентов и их ограниченной рациональностью. Использование агентных моделей энергетических рынков позволяет смоделировать различные явления, характерные для этого сектора. Например, они могут воспроизвести механизм формирования рыночной цены электроэнергии, который складывается из взаимодействия предложений производителей и спроса потребителей на аукционных торгах. Модели также способны продемонстрировать возникновение рыночной власти крупных производителей в условиях ограниченных мощностей сетей. Кроме того, они могут показать, как формируются спекулятивные пузыри цен, вызванные завышенными ожиданиями относительно будущего спроса или нехваткой мощностей. Агентные модели также позволяют исследовать координационные провалы, возникающие при инвестициях в генерирующие мощности, когда избыток инвестиций со стороны множества агентов приводит к перепроизводству и последующему падению цен. Наконец, модели могут отражать каскадные явления, связанные с распространением информации о новых технологиях через социальные сети потребителей, что в свою очередь определяет динамику распространения инноваций.

Изучение эволюционной экономики и теории кривых обучения, предложенной К. Эрроу, Т. Райтом (Wright, 1936) и Л. Арготом (Rubin, Azevedo, et. al., 2015), позволяет проследить закономерности снижения издержек производства в процессе накопления производственного опыта и увеличения выпуска продукции. Это явление имеет ключевое значение для оценки конкурентоспособности инновационных технологий в сфере генерации электроэнергии на разных этапах их развития. Анализируя эмпирические данные по динамике цен на солнечные фотоэлектрические модули, ветровые турбины и литий-ионные батареи, наблюдается устойчивое соответствие степенному закону обучения (Hoekstra, Berg, Steinbuch, 2025; Carlino, Creutzig, Vuuren, 2025; Hulst, Berg, Steubing, 2025). Согласно этому закону, с каждым удвоением общего объема установленной мощности стоимость на единицу мощности снижается. Для солнечных панелей этот коэффициент составляет около 20 %, для ветровых турбин – около 12 %, а для литий-ионных батарей – около 18 %. Несмотря на то, что сейчас электроэнергия от возобновляемых источников энергии стоит дороже, чем та, которая производится из ископаемого топлива, новые технологии в этой сфере

обладают огромным потенциалом для снижения затрат. Это возможно благодаря масштабированию производства и наличию крутых кривых обучения. Эффекты положительной обратной связи между ростом рынка, падением цен и увеличением спроса могут привести к тому, что возобновляемые источники энергии в долгосрочной перспективе станут доминирующим типом генерации электроэнергии (Hoekstra, Berg, Steinbuch, 2025; Carlino, Creutzig, Vuuren, 2025; Hulst, Berg, Steubing, 2025; International..., 2021). Применение моделей конкуренции технологий, учитывающих кривые обучения, демонстрирует возможность стремительных фазовых переходов. В ходе таких переходов доля новой технологии в общем объеме производства может возрасти с нескольких процентов до доминирующего значения за 10–15 лет, что значительно быстрее, чем предполагалось ранее (несколько десятилетий) при условии неизменности относительной стоимости технологий. Исторически сложившиеся технологии, например, угольная генерация, демонстрируют зависимость от траектории развития, сохраняя значительную часть в энергетическом балансе даже при утрате экономической привлекательности. Это объясняется накопленными инвестициями в инфраструктуру добычи и транспортировки угля, подготовкой квалифицированных кадров, существованием регуляторных режимов, ориентированных на традиционную энергетику, а также мощным лоббистским давлением со стороны укоренившихся отраслевых интересов.

Объединение предложенных методологических подходов в единую концепцию сложности открывает путь к созданию нового инструментария для прогнозирования и управления энергетическим переходом. Этот инструментарий способен адекватно отражать нелинейность энергетической системы, многообразие возможных путей развития, критические переходы и точки невозврата, а также фундаментальную неопределенность долгосрочных перспектив, которая обусловлена зависимостью от технологического прогресса, комплексными эффектами и эмерджентным поведением, возникающим при взаимодействии множества независимых агентов. Использование этого инструментария для анализа современных электроэнергетических систем выявляет ряд важных закономерностей и явлений. Глобальный энергетический переход не следует рассматривать как постепенное и линейное замещение ископаемых источников энергией возобновляемых. Скорее это последовательность резких скачков, когда страны и регионы внезапно переходят от зависимости от традиционных источников к доминиро-

ванию возобновляемых. Такие переходы происходят при достижении определенных критических точек, связанных с ценой технологий, уровнем поддержки и институциональной средой (Hoekstra, Berg, Steinbuch, 2025; World…, 2025). Второе важное обстоятельство – траектория энергетического перехода сильно зависит от начальных условий и решений, принимаемых в самом начале. Это подчеркивает необходимость своевременных инвестиций в инфраструктуру и создание благоприятной правовой и институциональной базы на ранних этапах перехода. Только так можно сформировать положительные обратные связи и запустить процесс самоускоряющегося развития (Carlino, Creutzig, Vuuren, 2025; Hulst, Berg, Steubing, 2025; Scheffer, Carpenter, Foley et. al., 2001). Кроме того, энергетический переход открывает возможности возникновения уязвимостей, связанных с каскадными отказами, особенно при высокой доле непредсказуемых источников генерации и недостаточно гибкой структуре системы (Rajakovic, Kuzle, Zeljko, 2025; Ceylan, Ozturk, Karakose, 2025). Обеспечение надежности энергоснабжения во многом может зависеть от перспективного развития технологий в области накопления энергии, управления ее потреблением и межсетевых коммуникаций. Четвертое, энергетический переход тесно переплетается с другими глобальными процессами, такими как цифровизация, декарбонизация транспорта, урбанизация и климатические изменения (Lenton, Held, Kriegler, Hall, et. al., 2008; International…, 2025; Mirshekali, Dashti, Keshavarz, et. al., 2025). Это взаимодействие порождает сложные синергетические эффекты и цепные реакции, которые могут как ускорять, так и замедлять динамику перехода, в зависимости от конкретных обстоятельств.

Развитие методологических концепций прогнозирования в энергетике представляет собой эволюционный путь, начавшийся с простых линейных экстраполяций. Затем последовала эра структурных балансовых моделей и детерминистической оптимизации. Далее прогнозирование шагнуло в сценарный подход, а сегодня мы наблюдаем современную концепцию, которая объединяет нелинейную динамику, теорию хаоса, бифуркационный анализ, стохастическое моделирование, агентное моделирование и эволюционную экономику. Развитие методологии шло поэтапно, с каждым этапом внося новые элементы точности в описание электроэнергетических систем. Однако каждый этап неизбежно порождал новые ограничения и пробелы, которые преодолевались на последующих этапах. В настоящее время методологи-

ческая рамка сложности выступает как незаменимый инструмент для понимания и управления энергетическим переходом в эпоху XXI века, когда мировая энергетика переживает глубокую неопределенность, нелинейность и критические явления.

4.3. Теоретический аппарат нелинейной динамики в приложении к электроэнергетическим системам: фазовое пространство, аттракторы, хаотическая динамика и синергетические эффекты

Современная электроэнергетика — это сложная система с нелинейным характером, поведение которой выходит за рамки описания линейными моделями. Для ее адекватного моделирования необходим математический инструментарий теории динамических систем. Электроэнергетические системы демонстрируют нелинейность на разных уровнях. Это проявляется в физических процессах, связанных с генерацией и преобразованием энергии (Rajakovic, Kuzle, Zeljko, 2025), а также в экономической сфере, где нелинейно складываются динамика ценообразования и инвестиционные решения (Yang, Wang, Luh, 2005; Unsihuay-Vila, Marangon-Lima, Souza, 2010). Нелинейность наблюдается и в технологическом развитии, где конкуренция сопровождается эффектами обучения и сетевыми экстерналиями (Hoekstra, Berg, Steinbuch, et.al., 2025; Carlino, Creutzig, Vuuren, 2025; Hulst, Berg, Steubing, 2025), а также в институциональной и социальной сферах, определяющих регуляторную среду и потребительские предпочтения. В данном разделе последовательно развивается теоретическая основа нелинейной динамики, адаптированная для электроэнергетических комплексов. Вводятся ключевые понятия фазового пространства, аттракторов, показателей Ляпунова, хаотической динамики и синергетических явлений, а также демонстрируется их использование для интерпретации сложных динамических процессов в электроэнергетических системах на фоне глобального энергетического перехода (World…, 2025; International…, 2021; Ember, 2025).

Электроэнергетическая система описывается фазовым пространством, которое является многомерным математическим пространством. Каждая точка в этом пространстве однозначно отображает текущее состояние системы, используя значения всех ключевых переменных, таких как генерация, потребление, цены, инвестиции и технологические характеристики (Strogatz, 2018). Для электроэнергетической

системы естественными координатами фазового пространства служат установленные мощности различных типов генерации: угольная генерация, газовая генерация с различными технологиями, включая парогазовые установки комбинированного цикла, ядерная генерация, гидроэлектростанции различных типов, солнечная фотоэлектрическая генерация, наземная ветровая генерация, морская ветровая генерация, биоэнергетика и геотермальная генерация, суммарное потребление электроэнергии с разбивкой по секторам промышленности, жилищного сектора, коммерческого сектора и транспорта, мощности накопления энергии различных типов, включая гидроаккумулирующие станции, литий-ионные батареи, проточные батареи и водородные накопители, пропускные способности межсистемных связей между регионами, средние цены электроэнергии на оптовом рынке и для конечных потребителей различных категорий, объемы инвестиций в различные типы генерации и сетевую инфраструктуру, технологические параметры, характеризующие эффективность преобразования энергии и удельные капитальные затраты на единицу мощности для каждой технологии, запасы ископаемых топлив и их цены на глобальных рынках, регуляторные параметры, включая цены углерода, субсидии возобновляемой энергетике и нормативы по выбросам (Yang, Wang, Liu, 2025; Qureshi, Ahamd, et. al., 2024; Hu, Wang, Tao, 2024). Объем фазового пространства определяется количеством независимых динамических параметров, которые описывают систему. В случае реалистичных моделей энергосистем макрорегионального масштаба, учитывающих пространственную структуру, временную детализацию и разнообразие технологий, это число может исчисляться сотнями или даже тысячами измерений.

Эволюцию электроэнергетической системы можно описать как путь в фазовом пространстве, где каждое положение на этом пути отображает состояние системы в конкретный момент времени, начиная с ее исходного состояния (Strogatz, 2018). Эта траектория отображает последовательность состояний, через которые система проходит под влиянием динамических закономерностей. Форму этой траектории определяют уравнения, связывающие темпы изменения параметров состояния с их текущими значениями и управляющими факторами системы. Для электроэнергетических систем динамические уравнения включают уравнения баланса установленной мощности, отражающие прирост мощности различных типов генерации через инвестиции и выбытие мощности через физический износ и экономическое устаревание (Frischmuth, Hess, Härtel, 2024; Rubin, Azevedo, Jaramillo, et.al.,

2015), уравнения динамики спроса на электроэнергию, связывающие изменение потребления с экономическим ростом, структурными сдвигами в экономике, энергоэффективностью оборудования и ценами на энергию (Yang, Wang, Liu, 2025; Qureshi, Ahamd, et. al., 2024), уравнения ценообразования на оптовом рынке электроэнергии, определяющие равновесные цены через взаимодействие предложения со стороны производителей и спроса со стороны потребителей с учетом ограничений на пропускную способность сетей (Mishra, Bakke, Korpås, et.al., 2025; Alberizzi, Carlini, Luzi, 2024; Harder, Büttner, Schick, et.al., 2025), уравнения инвестиционных решений, моделирующие распределение инвестиций между различными технологиями на основе ожидаемой доходности проектов, восприятия рисков и доступности финансирования (Hulst, Berg, Steubing, 2025; Alanazi, Alharthi, Alzahrani, 2025), уравнения технологического обучения, описывающие снижение удельных затрат технологий по мере роста кумулятивного объема установленной мощности согласно степенным законам обучения (Wright, 1936; Hoekstra, Berg, Steinbuch, et.al., 2025; Carlino, Creutzig, Vuuren, 2025; Hulst, Berg, Steubing, 2025; Rubin, Azevedo, Jaramillo, et.al., 2015), уравнения динамики цен на ископаемое топливо, отражающие баланс глобального спроса и предложения с учетом геополитических факторов и истощения месторождений, и уравнения эволюции регуляторной среды, моделирующие изменение политик в ответ на экологические вызовы, технологические возможности и общественные предпочтения (World…, 2025; McKinsey, 2025).

В теории динамических систем ключевым понятием выступает аттрактор. Аттрактор – это множество точек в фазовом пространстве, куда стремятся траектории системы, начинающиеся в определенной ее окрестности, известной как бассейн притяжения аттрактора (May, 1974; Strogatz, 2018). Аттрактор в физическом смысле представляет собой асимптотическое состояние системы, к которому она стремится после завершения переходных процессов. Это устойчивое состояние определяет долговременную динамику системы, независимо от того, с какого начального состояния в пределах своего бассейна притяжения она начинала движение. В рамках типологии аттракторов обнаруживаются различные типы динамических режимов. К ним относятся неподвижные точки, представляющие собой стационарные состояния, где все переменные системы достигают постоянных значений и их изменения прекращаются. Далее предельные циклы характеризуются периодическими

колебаниями переменных системы с постоянной амплитудой и периодом. Торы же отображают квазипериодические движения, где компоненты имеют несоизмеримые частоты. Наконец, странные аттракторы соответствуют хаотическому поведению, проявляющемуся в апериодических непредсказуемых траекториях с фрактальной структурой.

В электроэнергетических системах неподвижная точка фазового пространства показывает стационарное равновесие. В таком состоянии генерирующая мощность, распределенная по видам источников, уровень потребления электроэнергии, цены на электроэнергию и топливо, инвестиционные темпы и технологические характеристики стабилизируются и сохраняют постоянные значения при неизменности внешних факторов (Saidi, Makhlouf, Khalgui, 2024; Scheffer, Carpenter, Foley, et. al., 2001). Устойчивость равновесной точки системы можно оценить по ее реакции на небольшие отклонения от равновесия. Если небольшие возмущения приводят к затуханию и возвращению системы в исходное состояние, то точка считается устойчивой и соответствует стабильному режиму работы энергосистемы. В противном случае, если возмущения усиливаются, и система все больше отдаляется от равновесия, то точка является неустойчивой и не может быть использована как долговременный режим функционирования. Анализ устойчивости равновесного состояния проводится путем изучения собственных значений матрицы Якоби, полученной линеаризацией системы вблизи неподвижной точки. Равновесие считается асимптотически устойчивым лишь в том случае, если все действительные части соответствующих собственных значений якобиана строго отрицательны. Напротив, наличие хотя бы одного собственного значения с положительной действительной частью указывает на неустойчивость равновесия (Strogatz, 2018).

В отличие от линейных систем, нелинейные системы обладают ключевым свойством – возможностью существования нескольких устойчивых равновесий при неизменных значениях внешних воздействий (May, 1974; Strogatz, 2018; Saidi, Makhlouf, Khalgui, 2024; Scheffer, Carpenter, Foley, et. al., 2001). Это подразумевает, что электроэнергетическая система может существовать в нескольких устойчивых и экономически оправданных конфигурациях, отличающихся по структуре генерации. Каждая из этих конфигураций может быть оптимальной при определенных ценах на топливо, технологических показателях и регулирующих нормах. Выбор же между ними будет зависеть от начального состояния системы и ее исторического развития. В зависимости от соотношения цен на природный газ и уголь, стоимости технологий и уровня

цены на углерод, энергетическая система может демонстрировать три устойчивых состояния. Первое состояние – доминирование угольной генерации, обеспечивающее наименьшую себестоимость электроэнергии за счет использования доступного угля, но при этом сопровождающееся значительными выбросами CO_2. Альтернативой является доминирование газовой генерации, представляющее собой компромиссный вариант по затратам и объему выбросов. Третье состояние – это доминирование возобновляемых источников энергии, которое сопряжено с более высокими затратами на производство электроэнергии, но при этом ведет к снижению выбросов и уменьшению стоимости технологий благодаря накопленному опыту. Траектория развития системы будет стремиться к тому равновесию, которое соответствует начальному состоянию системы в рамках его области влияния.

Существование множественных устойчивых равновесий играет ключевую роль в понимании влияния траектории технологического прогресса на развитие электроэнергетических систем (Hoekstra, Berg, Steinbuch, 2025; Carlino, Creutzig, Vuuren, 2025). Если существующая структура энергетической генерации сформировалась на базе преобладания традиционных ископаемых источников, то система будет сама по себе поддерживать этот порядок вещей благодаря положительным обратным связям. К ним относятся накопленные инвестиции в инфраструктуру, связанную с добычей, транспортировкой и переработкой ископаемого топлива, квалифицированный персонал и отраслевые экспертизы, ориентированные на технологии традиционной энергетики. Также сюда входят регуляторные механизмы и тарифные системы, разработанные для централизованной генерации на крупных тепловых электростанциях, лоббистская активность укоренившихся отраслевых игроков, формирующих политическую обстановку, благоприятную для сохранения сложившегося порядка, а также психологическая инерция и сопротивление изменениям со стороны руководителей и потребителей, привыкших к существующей системе. Положительные обратные связи препятствуют переходу к новому равновесию, где возобновляемая энергетика станет доминирующей, даже если экономические условия станут благоприятными для конкурентоспособности новых технологий. Для преодоления технологических барьеров и перенаправления системы на новую траекторию развития необходимы конкретные политические решения (World…, 2025; International…, 2021; Ember, 2025; McKinsey, 2025).

Периодические колебания переменных в электроэнергетической системе, вызванные задержками в принятии решений и осуществле-

нии проектов, отображаются в виде аттрактора предельного цикла (Kuramoto, 1984). В качестве классического примера можно привести инвестиционные циклы в сфере электроэнергетики, которые характеризуются чередованием фаз: сначала происходит избыточное инвестирование, что приводит к перепроизводству электроэнергетических мощностей и снижению цен на электроэнергию. Затем наступает период недостаточного инвестирования, результатом которого становится дефицит мощностей и повышение цен. Возникновение колебаний обусловлено временным лагом между принятием инвестиционных решений, основанных на текущей рыночной ситуации и ценах, и фактическим вводом новых мощностей в эксплуатацию. Этот лаг может составлять от двух до пяти лет для тепловых электростанций и от пяти до десяти лет для гидро- и атомных. В периоды, когда цены на электроэнергию растут из-за нехватки мощности, большое количество инвесторов одновременно решают строить новые станции, рассчитывая на получение высокой прибыли от таких проектов. Ввод этих мощностей в эксплуатацию приводит к тому, что общее предложение оказывается превышающим спрос. Это, в свою очередь, вызывает обвал цен и убытки инвесторов, которые в результате отказываются вкладывать новые средства. Через некоторое время возникает дефицит мощностей, и начинается новый цикл (Kuramoto, 1984). Наличие устойчивого предельного цикла свидетельствует о том, что колебания в системе не ослабевают со временем, а образуют естественный ритм ее работы при заданных параметрах задержек и эластичности спроса и предложения.

Нелинейные системы, демонстрирующие странные аттракторы и хаотическую динамику, представляют собой наиболее сложный класс, чье поведение характеризуется апериодическими, непредсказуемыми траекториями с фрактальной структурой. Ключевой особенностью таких систем является критическая чувствительность к начальным условиям (Lorenz, 1963; May, 1974). В электроэнергетических системах хаотическое поведение может возникать в результате сильной нелинейности обратных связей, возникающих в результате взаимодействия технологической конкуренции, ценообразования и инвестиционных решений (Yang, Wang, Luh, 2005; Unsihuay-Vila, Marangon-Lima, Souza, 2010). В качестве классического примера системы, где наблюдается переход к хаосу, выступает логистическая карта. Она представляет собой одномерное разностное уравнение следующего вида:

$$x(t + 1) = r * x(t) * (1 - x(t)), \qquad (4.1)$$

где $x(t)$ – доля определенной технологии в структуре генерации в момент времени t, выраженную в долях от 0 до 1; r – управляющий параметр, характеризующий интенсивность конкуренции и нелинейность процессов замещения (May, 1974). При низких значениях r система стремится к устойчивому равновесию, при котором доля данной технологии в структуре генерации остается постоянной. По мере роста r система последовательно проходит через ряд бифуркаций удвоения периода. В ходе этих бифуркаций устойчивое равновесие утрачивает свою устойчивость, уступая место устойчивому циклу с периодом два. Затем цикл периода два становится неустойчивым, порождая цикл с периодом четыре, затем – с периодом восемь и так далее. В конечном итоге при достижении критического значения r, система переходит в хаотический режим, характеризующийся апериодическими траекториями (May, 1974; Strogatz, 2018). В хаотическом режиме вклад технологии в процесс генерации неустойчив и не подчиняется никакой закономерности. Из-за экспоненциального расхождения близких путей развития предсказание на долгосрочную перспективу становится невозможным.

Хаотичность системы и ее чувствительность к начальным условиям можно количественно оценить с помощью показателей Ляпунова. Эти показатели определяют средние скорости, с которой близкие траектории в фазовом пространстве расходятся или сближаются в разных направлениях (Lorenz, 1963; Strogatz, 2018). Для каждой динамической системы фазовое пространство характеризуется набором показателей Ляпунова, которые обычно упорядочиваются по убыванию их величин. Старший показатель Ляпунова (λ_1) описывает динамику системы в направлении, где фазовый объем растягивается максимально быстро. Этот показатель отражает качественное поведение динамической системы. Если его значение указывает на экспоненциальную сходимость близких траекторий, это свидетельствует о наличии устойчивого стационарного режима или устойчивого предельного цикла. В случае линейного роста расстояний между траекториями система демонстрирует нейтральную устойчивость. Либо экспоненциальная дивергенция траекторий с определенным временем расхождения является количественной мерой хаотической динамики. Положительный старший показатель Ляпунова ($\lambda_1 > 0$) накладывает фундаментальное ограничение на способность предсказывать поведение системы в будущем. Увеличение погрешности в заданных начальных условиях приводит к удвое-

нию этой погрешности с течением времени. Именно поэтому горизонт предсказуемости, определяемый как максимальное время, в течение которого детерминированный прогноз остается достоверным, имеет конечный характер (Lorenz, 1963; Strogatz, 2018).

Использование показателей Ляпунова в электроэнергетических системах позволяет количественно определять пределы предсказуемости динамики развития систем. С их помощью можно выделить режимы, где детерминированное прогнозирование становится невозможным, и где требуется перейти к прогнозированию на основе вероятностных сценариев (Wood…, 2025; Bloomberg, 2025; Yang, Wang, Liu, 2025; Alanazi, Alharthi, Alzahrani, 2025; Khamees, Badra, Abdelaziz, 2021). Анализ эмпирических данных о ценовой динамике электроэнергии на рынках с либерализованной конкуренцией показывает положительные показатели Ляпунова, что свидетельствует о хаотическом характере ценовых колебаний. Такой хаос позволяет предсказывать цены лишь на горизонте нескольких дней или недель (Yang, Wang, Luh, 2005; Unsihuay-Vila, Marangon-Lima, Souza, 2010). Из-за непредсказуемости долгосрочных факторов, определяющих цены, долгосрочные детерминированные прогнозы цен оказываются невозможными. Для получения адекватного результата необходимо строить вероятностные распределения возможных сценариев развития цен, учитывая неопределенность параметров модели и воздействие внешних шоков (Fu, Huang, Wang, 2021; Frischmuth, Hess, Härtel, 2024; Alanazi, Alharthi, Alzahrani, 2025).

Странные аттракторы обладают фрактальной структурой, которая проявляется в повторяющихся паттернах поведения системы на разных временных уровнях (Lorenz, 1963; May, 1974). Увеличение масштаба участка траектории на странном аттракторе демонстрирует структуру, статистически идентичную исходной траектории. Независимо от временного масштаба, будь то суточные, недельные, месячные или годовые данные, флуктуации цен на электроэнергию, инвестиционные потоки и доли технологических компаний обладают схожими статистическими свойствами. Это проявляется в сходстве распределений амплитуд колебаний и корреляционных функций. Такая особенность отмечена (Bollerslev, Chou, Kroner, 1992). Фрактальная природа электроэнергетических систем имеет существенные практические последствия для управления рисками и разработки надежных систем, способных противостоять экстремальным событиям. Фрактальные распределения, в отличие от нормальных, демонстрируют более выраженные

«хвосты», что указывает на повышенную вероятность экстремальных отклонений в ценах или объемах энергопотребления. Такие отклонения могут быть значительно выше, чем предсказывают стандартные гауссовы модели, которые часто применяются в финансовых расчетах.

В электроэнергетических системах синергетические эффекты появляются вследствие взаимодействия большого числа элементов. Это взаимодействие приводит к самоорганизованному возникновению упорядоченных макроскопических структур и согласованному коллективному поведению, при этом отсутствует централизованное управление (Kuramoto, 1984; Haken, 2004; Prigogine, Stengers, 1984). Разработанный Г. Хакеном (Haken, 2004) синергетический подход использует концепцию параметров порядка – медленных макроскопических переменных, которые характеризуют общую структуру и состояние системы. Этот подход опирается на принцип подчинения, согласно которому динамика быстрых микроскопических компонентов системы подчиняется и корректируется параметрами порядка. Благодаря этому можно упростить модель, сведя ее к замкнутой системе с уравнениями, описывающими только параметры порядка. В контексте электроэнергетических систем параметрами порядка могут выступать агрегированные показатели доли разных типов генерации в общей энергетической базе, средние ценовые индикаторы электроэнергии на макрорегиональном уровне, степень централизации или децентрализации, определяемая распределением мощностей между станциями различного масштаба, а также уровень интеграции возобновляемых источников энергии.

В электроэнергетических системах самоорганизация может проявляться по-разному (Kuramoto, 1984; Haken, 2004). Формирование промышленных кластеров вблизи источников дешевой энергии происходит спонтанно, без какого-либо централизованного управления. Этот процесс стимулируется положительной обратной связью: развитая энергетическая инфраструктура притягивает энергоемкие производства. Рост спроса со стороны этих производств, в свою очередь, ведет к дальнейшему развитию генерирующих мощностей и снижению цен на энергию за счет масштабных эффектов, что привлекает еще больше предприятий. Децентрализованные сети, основанные на взаимодействии множества небольших производителей и потребителей энергии, способны самоорганизовываться в локальные энергетические комплексы с распределенной генерацией и P2P торговлей электроэнергией. Такая организация достигается без необходимости централизованного управления за счет применения цифровых платформ

и смарт-контрактов (International…, 2025; Mirshekali, Dashti, Keshavarz et. al., 109). Глобальные рынки оборудования и технологий выступают катализатором синхронизации инвестиционных циклов в разных регионах. Если стоимость какого-либо технологического решения, например, солнечных панелей, снижается в одном регионе вследствие масштабирования производства и накопления опыта, это повышает ее конкурентоспособность и в других регионах. В свою очередь, это стимулирует волну инвестиций, которая распространяется по всему миру и приводит к синхронизации темпов развития возобновляемой энергетики на глобальном уровне.

Синергетические эффекты в электрических сетях могут проявляться в виде каскадных отказов. Отключение одного узла из-за перегрузки или поломки приводит к изменению распределения мощности и перегрузке соседних элементов. Это, в свою очередь, вызывает отключение еще большего числа элементов, создавая цепную реакцию, которая распространяется по всей сети и может закончиться масштабным блэкаутом (Rajakovic, Kuzle, Zeljko, 2025; Ceylan, Ozturk, Karakose, 2025). Изучение каскадных отказов с помощью теории сложных сетей и моделирования потокораспределения выявило, что сеть становится все более уязвимой к масштабным сбоям при росте средней нагрузки на ее элементы и уменьшении избыточности связей. При этом наблюдается нелинейная зависимость: существуют критические пороги для этих параметров, превышение которых приводит к резкому увеличению вероятности возникновения крупных блэкаутов (Fu, Huang, Wang, 2021; Ceylan, Ozturk, Karakose, 2025). Рост доли стохастических возобновляемых источников энергии в энергосистеме повышает вероятность каскадных отказов. Это связано с увеличением изменчивости мощности и необходимостью оперативного перераспределения нагрузки между источниками в ответ на колебания ветровых и солнечных ресурсов. Для обеспечения надежности работы системы требуется развитие технологий накопления энергии, внедрение гибких и быстродействующих резервных источников мощности, а также интеллектуальных систем управления спросом.

По мере приближения к бифуркационной точке в системе наблюдается явление критического замедления, которое предшествует качественным изменениям. Это проявляется в том, что время релаксации системы после незначительных возмущений существенно увеличивается. Такое поведение обусловлено физическими причинами: вблизи бифуркации собственное значение, отвечающее за скорость возвра-

щения системы к равновесию в направлении, критически важном для фазового пространства, стремится к нулю. В результате динамика восстановления системы замедляется. К эмпирическим признакам критического замедления относятся рост дисперсии колебаний переменных состояния системы, усиление временных корреляций, то есть возрастающая зависимость значений переменных от их прошлых значений, увеличение пространственных корреляций между отдаленными частями системы и возникновение мерцания, которое характеризуется спонтанными переходами между различными устойчивыми состояниями с последующим возвратом в исходное состояние. Отслеживание индикаторов критического замедления в энергосистемах дает возможность выявлять приближение к опасным переменам, например, к точке, где возобновляемые источники энергии возьмут верх, или к пороговому значению, за которым могут наступить масштабные каскадные отказы. Это позволяет принять своевременные управленческие решения для предотвращения нежелательных сценариев развития событий или для подготовки к их потенциальным последствиям (McKinsey, 2025; Scheffer, Carpenter, Foley, et. al., 2001; Lenton, Held, Kriegler, et. al., 2008).

Использование инструментов нелинейной динамики в электроэнергетике кардинально меняет наше представление о работе этих систем и подходы к их прогнозированию (Lorenz, 1963; May, 1974; Strogatz, 2018; Yang, Wang, Liu, 2025; Qureshi, Ahamd, et. al., 2024; Hu, Wang, Tao, 2024). Понимание того, что существуют множественные устойчивые состояния равновесия и что реализуемая траектория зависит от начальных условий, заставляет отказаться от поиска единственно верного сценария развития и перейти к изучению множества возможных конфигураций системы и обстоятельств, при которых они могут реализоваться (Wood…, 2025; Bloomberg, 2025; Saidi, Makhlouf, Khalgui, 2024; Scheffer, Carpenter, Foley, et. al., 2001; Frischmuth, Hess, Härtel, 2024; Alanazi, Alharthi, Alzahrani, 2025). Изучение хаотического поведения и вычисление показателей Ляпунова помогают установить границы детерминированной предсказуемости и обоснованно перейти к прогнозированию на основе вероятностей за их пределами (Lorenz, 1963; May, 1974; Yang, Wang, Luh, 2005; Unsihuay-Vila, Marangon-Lima, Souza, 2010; Fu, Huang, Wang, 2021; Alanazi, Alharthi, Alzahrani, 2025). Бифуркационный анализ предоставляет возможность выявлять критические значения параметров, определяющие качественные изменения в динамике системы, а также разрабатывать стратегии управления этими критическими переходами (Strogatz, 2018; Saidi, Makhlouf, Khalgui, 2024;

Scheffer, Carpenter, Foley, et. al., 2001). Синергетика исследует процессы самоорганизации и коллективного поведения, позволяя объяснить эмерджентность – появление новых свойств из взаимодействия множества компонентов системы (Kuramoto, 1984; Haken, 2004; Prigogine, Stengers, 1984). Объединение этих идей формирует всеобъемлющую теоретическую основу для понимания сложной нелинейной динамики электроэнергетических систем в условиях глобального энергетического перехода, что открывает путь к разработке эффективных методов прогнозирования и управления ими (World…, 2025; International…, 2021; Wood…, 2025; Ember, 2025; Bloomberg, 2025; McKinsey, 2025).

ГЛАВА 5. РАЗВИТИЕ МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ПРЕДПРОЕКТНОЙ ОЦЕНКИ НОВЫХ ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ ДЛЯ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ

5.1. Методологические аспекты отбора сопряженных промышленно-инфраструктурных инвестиционных проектов в электроэнергетике [45]

Постановка проблемы.

Современная российская электроэнергетика обнаруживает характерный парадокс. Статистически выработка электроэнергии остается устойчивой, но за этим агрегированным показателем накапливаются процессы, природа которых принципиально иная. Производственные активы стареют физически и морально, причем второе нередко опережает первое. Генерирующий баланс неуклонно смещается в сторону газовых и атомных мощностей. Зависимость инфраструктурного воспроизводства от отечественного промышленного сектора нарастала постепенно, почти незаметно, пока введение санкционных ограничений не придало ей качественно иной масштаб и остроту. Это структурное противоречие между инерционной логикой существующего генерирующего комплекса и теми требованиями технологического обновления, которые объективно уже нельзя откладывать.

Регуляторная архитектура отрасли воспроизводит исторически сложившееся разграничение между двумя объектами, которые по своей технологической природе образуют единую систему, хотя это единство в нормотворческой практике зачастую игнорируется. Первый объект – электроэнергетическая инфраструктура во всей ее полноте: генерирующие объекты всех типов, магистральные и распределительные сети, подстанционное хозяйство, накопители энергии, цифровые диспетчерские комплексы. Второй объект – это производственно-технологическая база энергомашиностроения: газовые и паровые турбины, электрические генераторы, силовые трансформаторы, коммутационная аппаратура высокого и сверхвысокого напряжения, силовая электроника, интегрированные системы автоматического управления.

[45] *Автор: А. Ю. Домников*

В действующих стратегических документах и программах импортозамещения оба контура планируются раздельно с несовпадающими показателями результативности и разнесенными горизонтами прогнозирования. На уровне инвестиционного программирования такое разграничение порождает рассогласование, последствия которого могут недооцениваться. Так, темпы развертывания инфраструктурных мощностей и темпы формирования соответствующей промышленной базы движутся по несинхронизированным траекториям, поэтому в существующей системе планирования формальный механизм их стыковки не предусмотрен.

Специфика проблемы задается прежде всего временными параметрами технологического цикла в энергомашиностроении. Полный цикл от начала проектно-конструкторских работ до серийного производства, сертификации и развертывания сервисной инфраструктуры для газовых турбин мощностью свыше 100 МВт, силовых трансформаторов высших классов напряжения и высоковольтной коммутационной аппаратуры составляет от нескольких лет до полутора-двух десятилетий. Причем это не техническая деталь, а аналитически значимое обстоятельство. Оно означает, что решения о выводе из эксплуатации устаревшего оборудования и замещении мощностей должны приниматься в связке с планами развития машиностроительной базы задолго до возникновения реального дефицита. Поэтому управленческое сопряжение двух контуров – это не методологическое решение, а условие инвестиционной состоятельности долгосрочных программ.

Именно здесь обнаруживается методологический пробел, который настоящее исследование стремится заполнить. Классическая постановка задачи отбора эффективных инвестиционных проектов ориентирована на оценку изолированных альтернатив (Markowitz H., 1952). Предлагаемый инструментарий переходит к содержательно иной проблеме, посвященной формированию согласованных инвестиционных каскадов. Понятие технологической сопряженности в этом контексте не является описательным для обозначения межпроектных связей. Оно фиксирует формализованную процедуру выделения кластеров взаимообусловленных проектов, при которой совокупный технологический и экономический эффект их совместной реализации структурно превышает сумму индивидуальных результатов. Источник этого превышения представляет собой технологические комплементарности и институциональные синергии, которые возникают исключительно при скоординированном инвестировании в оба контура единой произ-

водственно-инфраструктурной системы и принципиально не улавливаются раздельным проектным анализом.

Классификация технологий: секторальные энергетические кластеры.

Для структурирования массива рассматриваемых технологий и инвестиционных проектов в основу методического подхода положен принцип относительной замкнутости технологического контура, то есть степени, в которой технологии одной группы конкурируют, дополняют друг друга и задают общие параметры развития внутри обособленного сегмента энергетической системы. Результатом стало выделение пяти секторальных энергетических кластеров (СЭК):

СЭК-1 – охватывает тепловую генерацию на органическом топливе: парогазовые установки, газовые и паровые турбины различных мощностей, угольную генерацию, технологии улавливания и захоронения углерода. Именно в этом кластере сосредоточена основная продукция «Силовых машин» и Уральского турбинного завода.

СЭК-2 – объединяет атомную энергетику, в том числе малые модульные реакторы и замкнутый ядерный топливный цикл.

СЭК-3 – включает возобновляемые источники энергии.

СЭК-4 – посвящен электросетевому комплексу и цифровизации, включая Smart Grid и цифровые подстанции.

СЭК-5 – объединяет водородную энергетику, электрохимические накопители и распределенную генерацию.

Логика предложенного методического подхода заключается в едином конструктивном принципе, связанном с последовательным сужением аналитической неопределенности. Так, на входе имеется широкое структурное описание технологических взаимосвязей, а на выходе получаем верифицированный на устойчивость инвестиционный портфель. Между этими этапами находится цепочка шагов, каждый из которых содержательно опирается на результаты предыдущего. Пропуск любого звена не просто снижает точность расчетов, он деформирует саму аналитическую логику процедуры исследования.

Исходная задача состоит в следующем. Требуется из множества проектов-кандидатов $P = \{p_1 ' p_2 ' \ldots ' p_n\}$, включающего как инфраструктурные проекты в электроэнергетике, так и сопряженные с ними промышленные проекты в энергомашиностроении, отобрать такое подмножество $P^* \subset P$, которое при соблюдении ресурсных и технологических ограничений обеспечивало бы максимальный совокупный эффект с учетом синергии между проектами, управленческой гибкости и устойчивости к изменению внешних условий (Dixit A.K., Pindyck R.S.,

1994). Принципиально, что проекты не независимы: инфраструктурный объект и обеспечивающее его машиностроительное производство связаны отношением взаимной обусловленности, которое нельзя ни проигнорировать, ни учесть в рамках стандартных методов дисконтированных денежных потоков.

Предложенный методический подход включает шесть этапов. Первый этап структурный. Строится матрица технологической сопряженности, формализующая связи между технологиями и промышленными проектами. Второй этап оценочный, где каждый проект характеризуется по восьми критериям, отражающим как его индивидуальные свойства, так и место в системе межпроектных зависимостей. Третий этап ранжирующий. С помощью метода *PROMETHEE* II (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations*) вычисляются потоки предпочтений и строится полное линейное упорядочение проектов-кандидатов (Brans J.-P., Mareschal B., 2005). Этот метод многокритериального анализа и поддержки принятия решений может использоваться для оценки, сравнения и полного ранжирования набора альтернативных вариантов. В его основе лежит парное сравнение альтернатив по заданному набору критериев как количественных, так и качественных. Четвертый этап динамический и предназначен для ведущих претендентов – оценивается стоимость управленческой гибкости через аппарат реальных, в том числе составных, опционов. Пятый этап оптимизационный, в нем формулируется и решается задача бинарного целочисленного программирования, интегрирующая результаты всех предшествующих этапов. Шестой этап верификационный, где полученный портфель проверяется на устойчивость посредством сценарного анализа.

Следует отметить одно методологическое обстоятельство, нередко упускаемое в прикладных работах по портфельному управлению. Предлагаемая методика не является полностью автоматизированной процедурой, дающей однозначный ответ независимо от суждений аналитика. Она организована как структурированный диалог между формальным аппаратом и экспертным знанием. На первом и третьем этапах экспертные суждения переводятся в числа через процедуру *AHP,* представляющую собой метод анализа иерархий (*Analytic Hierarchy Process*) (Saaty T.L., 1980), на четвертом – параметры волатильности калибруются по наблюдаемым данным, на шестом – сами сценарии задаются исследователем. Формальный аппарат при этом выполняет незаменимую роль: он устраняет недостатки агрегирования, делает до-

пущения явными и обеспечивает воспроизводимость результатов. Но содержательное наполнение методики остается зависимым от качества экспертных оценок и обоснованности сценарных предположений.

Каждый из шести этапов описывается по единой схеме. Сначала формулируется задача этапа и объясняется его место в общей логике методики, затем излагается формальный аппарат со всеми необходимыми формулами, наконец, указываются источники данных и практические ориентиры для настройки параметров.

Этап 1. Построение матрицы технологической сопряженности.

Первым и основополагающим шагом является построение матрицы технологической сопряженности, связывающей технологии из различных СЭК с промышленными возможностями. Именно на данном этапе формируется формализованная карта взаимозависимостей, без которой дальнейшие расчеты лишены содержательной основы.

Формальная постановка задачи. Пусть $T = \{t_1, t_2, \ldots, t_m\}$ – множество технологий, распределенных по пяти СЭК, а $J = \{j_1, j_2, \ldots, j_q\}$ – множество промышленных проектов-кандидатов. Матрица сопряженности C размерности $m \times q$ определяется следующим образом: элемент c_{il} принимает значения из отрезка [0, 1], где 0 – полное отсутствие функциональной связи между технологией t_i и промышленным проектом j_l, а 1 – полная функциональная зависимость, при которой реализация инфраструктурного проекта невозможна без мощностей, создаваемых проектом j_l.

Для декомпозиции связей по типам целесообразно различать три их типа. Первый тип представляет собой прямую производственную зависимость, то есть инфраструктурный проект непосредственно потребляет продукцию промышленного проекта. Коэффициент сопряженности для таких пар, как правило, составляет 0,7–1,0. Второй тип характеризует технологическую комплементарность, когда проекты используют смежные производственные компетенции, создается экономия на НИОКР и унификации стандартов (значения элементов матрицы технологической сопряженности (c_{il}) обычно составляют 0,3–0,7). Третий тип описывает институциональную синергию: проекты реализуются в рамках общей регуляторной или инфраструктурной среды; значения c_{il} не превышают 0,3.

Процедура экспертной оценки на основе *AHP*. Построение матрицы C опирается на метод аналитических иерархий, предложенный Томасом Саати (Saaty T.L., 1980; Saaty T.L., 1990). Для каждой технологии t_i формируется отдельная матрица попарных сравнений $A^{(i)}$ размерности

$q \times q$, где элемент $a_{lk}^{(i)}$ отражает суждение о том, насколько промышленный проект j_l более тесно сопряжен с технологией t_i, чем проект j_k. Шкала Саати предполагает: 1 – равная сопряженность, 3 – слабое преимущество, 5 – существенное, 7 – явное, 9 – абсолютное. Матрица $A^{(i)}$ является обратно-симметричной: если $a_{lk}^{(i)} = v$, то $a_{kl}^{(i)} = 1/v$.

Нормализованный вектор приоритетов $w^{(i)}$ находится как главный собственный вектор матрицы $A^{(i)}$, соответствующий максимальному собственному значению $\lambda_{\max}^{(i)}$. В практических расчетах приближенное значение компоненты вектора вычисляется по формуле геометрического среднего строки:

$$w_l^{(i)} \approx \frac{\left(\prod_{k=1}^{q} a_{lk}^{(i)}\right)^{1/q}}{\sum_{l=1}^{q}\left(\prod_{k=1}^{q} a_{lk}^{(i)}\right)^{1/q}}, \qquad (5.1)$$

Компоненты вектора $w^{(i)}$ непосредственно формируют i-ю строку матрицы сопряженности: $c_{il} = w_l^{(i)}$. Элемент c_{il} показывает степень функциональной связи между технологией (из множества технологий, распределенных по пяти СЭК) и промышленным проектом-кандидатом.

Значение принимается из отрезка [0,1]:

- 0 означает полное отсутствие функциональной связи: технология t_i никак не зависит от мощностей, создаваемых проектом j_l;
- 1 показывает полную функциональную зависимость: реализация инфраструктурного проекта невозможна без мощностей проекта j_l.

Значения c_{il} вычисляются через процедуру *AHP*: компоненты нормализованного вектора приоритетов $w^{(i)}$ непосредственно формируют строку матрицы, то есть $c_{il} = w_l^{(i)}$.

Проверка согласованности (качество экспертных суждений) контролируется через индекс согласованности:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}, \qquad (5.2)$$

Отношение согласованности $CR = CI/RI$ должно быть менее 0,1 для приемлемости оценок, где RI – случайный индекс согласованности, зависящий от порядка матрицы (например, для $n = 5$: $RI = 1{,}12$; для $n = 7$: $RI = 1{,}32$; для $n = 9$: $RI = 1{,}45$) (Saaty T.L., 1990). При нарушении критерия экспертная группа возвращается к пересмотру конкретных попарных суждений.

Агрегирование мнений нескольких экспертов. При привлечении группы из E экспертов применяется метод геометрического среднего элементов – единственный способ, сохраняющий обратную симметрию агрегированной матрицы (Saaty T.L., 1990):

$$a_{lk}^{(i),\text{agg}} = \left(\prod_{e=1}^{E} a_{lk}^{(i \cdot e)} \right)^{1/E}, \tag{5.3}$$

При существенном расхождении мнений применяется взвешенное агрегирование с весами, отражающими квалификацию и отраслевой опыт каждого эксперта. Структура экспертной группы должна включать три категории участников: специалисты энергетических компаний с опытом формирования инвестиционных программ, технические специалисты энергомашиностроительных предприятий, понимающие производственные ограничения, и представители профильных НИИ, владеющие информацией о технологической зрелости разрабатываемых решений.

Аналитические возможности матрицы. По завершении построения матрица C позволяет идентифицировать «узловые» промышленные проекты с высокими значениями c_{il} сразу для нескольких технологий, нереализация которых блокирует целые технологические направления. Одновременно выявляются технологически изолированные проекты, не имеющие существенных связей с промышленной базой, что само по себе является сигналом об импортозависимости.

Этап 2. Многокритериальная оценка проектов-кандидатов (критерии K1–K8).

Каждый проект-кандидат p_i оценивается по восьми критериям, образующим две группы. Первая группа адаптирует стандартные критерии оценки технологий к специфике отраслевого инвестиционного анализа. Вторая группа вводит оригинальные критерии сопряженности, отражающие межпроектные зависимости, что принципиально отличает данную методику от стандартных подходов (Brans J.-P., Mareschal B., 2005). Все восемь критериев приводятся к единой шкале [0, 1] как предварительное условие корректного применения метода *PROMETHEE*.

Критерий K1: уровень технологической готовности.

Данный критерий отражает степень зрелости ключевой технологии проекта по девятиуровневой шкале *TRL* (*Technology Readiness Level*), разработанной *NASA* в 1970–1980-е годы. Уровни *TRL* 1–4 соответствуют концептуальному и лабораторному обоснованию технологии. Уров-

ни *TRL* 5–7 описывают разработку полнофункциональных прототипов и их испытание в условиях, приближенных к реальным. Уровни *TRL* 8–9 означают завершенность разработки и готовность к промышленному применению. Переход от *TRL* 4 к *TRL* 7 нередко называют «долиной смерти», требующей значительных инвестиций и участия государства.

Нормализованная оценка рассчитывается по формуле:

$$K_1(p_i) = \frac{TRL_i - TRL_{\min}}{TRL_{\max} - TRL_{\min}}, \quad (5.4)$$

где $TRL_{min} = 1$, $TRL_{max} = 9$. Следует учитывать, что при агрегировании вес w_1 должен калиброваться с учетом стратегического горизонта программы: высокое значение *TRL* обеспечивает предсказуемость, но не формирует задел перспективных компетенций.

Критерий К2: уровень промышленной локализации.

Критерий характеризует долю компонентов, производимых на отечественных предприятиях, в полной стоимости оборудования. Показательно, что требования к уровню локализации турбин по программе КОММод (конкурентный отбор проектов модернизации) установлены на уровне не менее 90 %, что на практике сталкивается с трудностями в части специальных поковок и литья. Нормализованная оценка:

$$K_2(p_i) = \frac{LOC_i - LOC_{\min}}{LOC_{\max} - LOC_{\min}}, \quad (5.5)$$

где LOC_i – доля локализации проекта в долях единицы. Практически значимым пороговым значением считается $LOC_i \geqslant 0{,}70$, при котором проект квалифицируется как стратегически значимый с позиций технологического суверенитета.

Критерий К3: технологическая масштабируемость.

Критерий оценивает, допускает ли ключевая технология тиражирование без принципиального изменения производственного процесса. Масштабируемость определяет потенциал загрузки промышленных мощностей, создаваемых сопряженными проектами, и тем самым влияет на экономику всего инвестиционного каскада. Оценка выполняется по четырехбалльной шкале: 0 – технология уникальна для единичного применения; 1 – ограниченное тиражирование (2–5 объектов); 2 – серийное применение при незначительных доработках; 3 – платформенная технология, допускающая массовое тиражирование. Нормализованная оценка: $K_3(p_i) = Score_i/3$.

Критерий К4: экономическая конкурентоспособность.

Критерий измеряется через нормированную стоимость выработ-

ки электроэнергии (*Levelized Cost of Electricity*, *LCOE*) – среднюю расчетную себестоимость производства электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла энергоустановки (Acevedo Arenas A.C.Y. et al., 2024):

$$LCOE_i = \frac{\sum_{t=1}^{T} \frac{Cap_t + OM_t + F_t + Carb_t + D_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{T} \frac{MWh_t}{(1+r)^t}}, \quad (5.6)$$

где Cap_t – капитальные затраты в году t; OM_t – операционные затраты; F_t – затраты на топливо; $Carb_t$ – затраты на выбросы; D_t – затраты на вывод из эксплуатации; MWh_t – производство электроэнергии; r – ставка дисконтирования. *LCOE* является сводной оценкой общей конкурентоспособности технологии, позволяя инвесторам и регуляторам сопоставлять разнородные генерирующие технологии (Acevedo Arenas A.C.Y. et al., 2024).

Нормализованный критерий рассчитывается по формуле:

$$K_4(p_i) = 1 - \frac{LCOE_i}{\overline{LCOE}_{k(i)}} \cdot \min\left(1, \frac{LCOE_i}{\overline{LCOE}_{k(i)}}\right), \quad (5.7)$$

где $LCOE_{k(i)}$ – среднее значение *LCOE* по кластеру k, к которому относится проект p_i. Формулировка обеспечивает монотонное убывание критерия при росте относительных затрат и позволяет корректно сравнивать технологии внутри одного СЭК.

Критерий К5: стратегическая значимость.

Критерий формализует приоритеты государственной технологической политики. Высокая стратегическая значимость соответствует явной представленности технологического направления в Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики, программах импортозамещения и федеральных проектах технологического суверенитета. Оценка выполняется по пятибалльной шкале Лайкерта с последующей нормировкой $K_5(p_i) = Score_i / 4$. Данный критерий является единственным, непосредственно отражающим институциональные и политические факторы, что требует особой осторожности при интерпретации.

Критерий К6: промышленная реализуемость.

Критерий измеряет готовность отечественной промышленной базы к производству необходимого оборудования. Включает два компонента. Первый – коэффициент производственной готовности α_i: отношение фактически доступных производственных мощностей к потребным. Второй – коэффициент компетентностной готовности β_i: наличие разработанной конструкторской документации, результатов стендовых испытаний, обученного инженерного персонала.

$$K_6(p_i) = \alpha_i^{\gamma} \cdot \beta_i^{(1-\gamma)}, \quad (5.8)$$

где $\gamma \in (0{,}5;\ 1{,}0)$ – настроечный параметр. При краткосрочном горизонте планирования (3–5 лет) целесообразно $\gamma \approx 0{,}7$, придавая больший вес производственным мощностям; при горизонте 10–15 лет разумно снижать γ до 0,5–0,6, уравновешивая значимость компетентностной готовности.

Критерий К7: временная синхронизация.

Этот критерий является, пожалуй, наиболее оригинальным в предлагаемой системе. Он измеряет степень совпадения момента ввода в эксплуатацию инфраструктурного объекта с моментом готовности промышленного производства соответствующего оборудования (Dixit A.K., Pindyck R.S., 1994):

$$K_7(p_i) = 1 - \frac{|T_{\text{infra}}(p_i) - T_{\text{ind}}(p_i)|}{\Delta T_{\max}}, \quad (5.9)$$

где $T_{\text{infra}}(\rho_i)$ – плановый год ввода инфраструктурного объекта, $T_{\text{ind}}(\rho_i)$ – плановый год готовности промышленного производства, $\Delta T_{\max}$ – максимально допустимое рассогласование, принимаемое равным 5 годам. Если промышленный проект опережает инфраструктурный более чем на 5 лет, создаются незагруженные производственные мощности и нарастают финансовые потери. Если запаздывает, то возникает вынужденная импортозависимость или задержка реализации. При $|T_{\text{infra}} - T_{\text{ind}}| \geqslant \Delta T_{\max}$ критерий обнуляется. На практике рекомендуется задавать не точечные, а интервальные оценки T на основе статистики задержек сопоставимых проектов.

Критерий К8: устойчивость к технологическому замыканию.

Технологическое замыкание (*technological lock-in*) описывает ситуацию, когда принятые инвестиционные решения настолько жестко фиксируют технологическую траекторию, что последующая смена направления становится экономически или институционально невозможной даже при появлении превосходящих альтернатив (David P.A., 1985; Markard E. et al., 2023). В контексте долгосрочного развития электроэнергетики этот риск особенно значим: жизненный цикл инфраструктурных объектов нередко превышает 30–40 лет, за которые технологический ландшафт может радикально измениться.

Высокое значение К8 присваивается проектам, отвечающим трем признакам: технологическая платформа совместима с несколькими конкурирующими решениями следующего поколения; капитальные

затраты в значительной мере обратимы (реальный опцион на отказ) (Trigeorgis L., 1996); производственные компетенции применимы в смежных технологических направлениях. Оценка выполняется экспертным методом по трехкомпонентной балльной системе с последующей нормировкой.

Итогом второго этапа является матрица значений критериев K_{ic} размерности $n \times 8$, служащая исходными данными для ранжирования по методу *PROMETHEE* II.

Этап 3. Ранжирование проектов на основе модифицированного PROMETHEE II.

Ранжирование по методу *PROMETHEE* II является третьим, интегрирующим этапом методики. Именно здесь разнородная информация о восьми критериях, собранная на предыдущем этапе, преобразуется в единую числовую меру сравнительной предпочтительности каждого проекта. Метод предложен Ж.-П. Брансом и Б. Маресхалом в 1980-е годы и с тех пор получил широкое применение в задачах многокритериального ранжирования инвестиционных альтернатив (Brans J.-P., Vincke Ph., Mareschal B., 1986; Brans J.-P., Mareschal B., 2005). Принципиальное достоинство метода в том, что он не агрегирует критерии в единый балл через произвольные веса, а строит попарные отношения доминирования между проектами, что позволяет выявлять конфликты между критериями и оценивать их интенсивность.

Статическое ранжирование дополняется оценкой реальных опционов для проектов из верхней части рейтинга. Для сопряженных пар вводится составной опцион: промышленный проект рассматривается как опцион первой ступени, открывающий опцион второй ступени (строительство инфраструктурного объекта). Разность между опционной стоимостью и статическим *NPV* дает стоимость гибкости, тем большую, чем выше технологическая неопределенность.

Завершающий этап – портфельная оптимизация. Задача формулируется как задача целочисленного программирования, целевая функция которой содержит три слагаемых: суммарный чистый поток *PROMETHEE* выбранных проектов, синергетические эффекты от совместной реализации и премию за гибкость. Задача дополняется бюджетным ограничением, ограничениями на производственные мощности по каждой СЭК, ограничениями сопряженности, временной синхронизации и диверсификации по кластерам. Ввиду трудности задачи при большом числе проектов для практических расчетов рекомендуются метаэвристические алгоритмы – генетические алгоритмы.

Полученный портфель проверяется на устойчивость через сценарный анализ по трем сценариям: консервативному, инерционному и инновационному. Портфель признается устойчивым при индексе $R(P^*) \geqslant 0{,}85$, что соответствует обеспечению не менее 85 % от оптимума в каждом сценарии. Проекты с высоким индексом сценарной волатильности V_i являются «качающимися» элементами и при недостаточной устойчивости портфеля подлежат замене на более робастные альтернативы.

Процедура 3 этапа разворачивается в шесть последовательных шагов: задание функций предпочтения для каждого критерия, калибровка пороговых параметров, определение весов критериев через метод аналитических иерархий – *AHP*, вычисление агрегированных индексов предпочтения для всех пар проектов, расчет потоков предпочтений и содержательная интерпретация полученного ранжирования.

Практические приложения метода в энергетическом секторе подтверждают его пригодность именно для задач сравнительной оценки технологических стратегий (Bertoncini M. et al., 2022). Процедура третьего этапа разворачивается в шесть последовательных шагов: задание функций предпочтения для каждого критерия, калибровка пороговых параметров, определение весов критериев через *AHP* (Saaty T.L., 1980), вычисление агрегированных индексов предпочтения для всех пар проектов, расчет потоков предпочтений и содержательная интерпретация полученного ранжирования.

Шаг 3.1. Задание функций предпочтения. Для каждого критерия K_c (c = 1,...,8) задается функция предпочтения $P_c(p_i, p_j)$, аргументом которой является разность оценок двух проектов по данному критерию:

$$d_c\left(p_i, p_j\right) = K_c\left(p_i\right) - K_c\left(p_j\right), \tag{5.10}$$

Функция предпочтения принимает значения в [0, 1], нулевое значение означает безразличие, единица – полное предпочтение p_i перед p_j по данному критерию. Всего в рамках *PROMETHEE* определены шесть стандартных типов функций предпочтения. Для критериев рассматриваемой задачи рекомендуются следующие типы.

Для количественных критериев $K1$ (*TRL*), $K4$ (*LCOE*), $K6$ (промышленная реализуемость) и $K7$ (временная синхронизация) применяется V-образная функция с линейным участком (тип III по классификации *PROMETHEE*) с двумя параметрами – порогом безразличия q и порогом строгого предпочтения p:

$$P_c(p_i, p_j) = \begin{cases} 0, & d_c \le q \\ \frac{d_c - q}{p - q}, & q < d_c \le p, \\ 1, & d_c > p \end{cases} \quad (5.11)$$

Для порядковых критериев *K*2 (локализация), *K*3 (масштабируемость) и *K*5 (стратегическая значимость), оцениваемых по дискретной шкале, подходит ступенчатая функция (тип II) с единственным параметром q:

$$P_c(p_i, p_j) = \begin{cases} 0, & d_c \le q \\ 0{,}5, & q < d_c \le q, \\ 1, & d_c > q \end{cases} \quad (5.12)$$

Для критерия *K*8 (устойчивость к технологическому замыканию), значения которого содержат систематическую неопределенность экспертной оценки, рекомендуется гауссова функция предпочтения (тип VI):

$$P_c(p_i, p_j) = \begin{cases} 0, & d_c \le 0 \\ 1 - e^{-d_c^2/(2\sigma_c^2)}, & d_c > 0 \end{cases}, \quad (5.13)$$

где σ_c – параметр, соответствующий среднеквадратическому отклонению экспертных оценок по критерию с. Гауссова функция не устанавливает жестких пороговых значений: предпочтение нарастает постепенно по мере увеличения разрыва между проектами, что адекватнее отражает природу суждений с размытыми границами (Brans J.-P., Mareschal B., 2005).

Шаг 3.2. Калибровка пороговых параметров. Правильная настройка параметров q и p критически важна. Порог безразличия q интерпретируется как минимальная содержательно значимая разница между оценками двух проектов: разности меньше q следует считать погрешностью измерения, а не реальным различием. Порог строгого предпочтения p задает разницу, при достижении которой один проект однозначно доминирует другой. Рекомендуемые диапазоны: для К1 – q = 0,11 (один уровень TRL), p = 0,33 (три уровня TRL); для К7 – q = 0,1 (рассогласование менее 0,5 года), p = 0,4 (рассогласование более 2 лет). Конкретные значения уточняются через анализ чувствительности – пошаговое изменение q и p с проверкой стабильности итогового ранжирования.

Шаг 3.3. Определение весов критериев через AHP. Веса критериев w_c не задаются произвольно, а определяются через процедуру AHP (Saaty T.L., 1980; Saaty T.L., 1990) аналогично тому, как на первом этапе строилась матрица сопряженности. Эксперты проводят попарные

сравнения восьми критериев в пространстве «значимость для задачи отбора сопряженных проектов», формируя матрицу 8 × 8. По результатам нахождения главного собственного вектора получается вектор весов (w_1, ...,w_8) при условии $\sum_{c=1}^{8} w_c = 1$. Согласованность суждений проверяется через $CR < 0{,}10$.

Шаг 3.4. Расчет агрегированных индексов предпочтения. Для каждой упорядоченной пары проектов (p_i, p_j) агрегированный индекс предпочтения $\pi(p_i, p_j)$ вычисляется как взвешенная сумма поединичных функций предпочтения (Brans J.-P., Vincke Ph., Mareschal B., 1986):

$$\pi(p_i, p_j) = \sum_{c=1}^{8} w_c \cdot P_c(p_i, p_j), \quad (5.14)$$

Значение $\pi(p_i, p_j) \in [0, 1]$ показывает, насколько в целом (по всем критериям) p_i предпочтительнее p_j. Важно отметить, что $\pi(p_i, p_j) + \pi(p_j, p_i) \leqslant 1$, причем равенство достигается лишь в вырожденном случае полного доминирования одного проекта. Если оба значения близки к нулю, проекты практически неразличимы по системе критериев.

Шаг 3.5. Вычисление потоков предпочтений. Положительный поток $\Phi^+(p_i)$ характеризует «силу» проекта p_i – его превосходство над всей совокупностью остальных альтернатив:

$$\Phi^+(p_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j \neq i} \pi(p_i, p_j), \quad (5.15)$$

Отрицательный поток $\Phi^-(p_i)$ характеризует «слабость» проекта – суммарное превосходство остальных альтернатив над ним:

$$\Phi^-(p_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j \neq i} \pi(p_j, p_i), \quad (5.16)$$

Чистый поток *PROMETHEE* II:

$$\Phi(p_i) = \Phi^+(p_i) - \Phi^-(p_i), \quad (5.17)$$

обеспечивает полное линейное упорядочение: p_i предпочтительнее p_j тогда и только тогда, когда $\Phi(p_i) > \Phi(p_j)$. Значение Φ лежит в интервале [-1, 1]: положительное значение означает, что проект в среднем предпочтительнее своих конкурентов по всей системе критериев, отрицательное уступает им.

Шаг 3.6. Анализ потоков и интерпретация ранжирования. Чистый поток полезно дополнять совместным анализом Φ^+ и Φ^-. Проект с высоким Φ^+ и высоким Φ^- – это «острый» проект: по одним критериям он предпочтителен, по другим явно проигрывает. Проект с умеренными значениями обоих потоков – «мягкий» компромиссный вариант. Именно «острые» проекты требуют отдельного обсуждения с лицами, прини-

мающими решения: включение их в портфель может быть оправдано стратегическими соображениями, не вполне улавливаемыми формальной системой критериев (Brans J.-P., Mareschal B., 2005). Диаграммы *GAIA* (*Graphical Analysis for Interactive Aid*) позволяют визуализировать эти конфликты в двумерном пространстве главных компонент критериального пространства, однако их построение представляет самостоятельный аналитический инструмент, выходящий за рамки настоящего раздела.

Этап 4. Оценка опционной стоимости гибкости.

Ранжирование по *PROMETHEE* II формирует статичную картину предпочтений в предположении о фиксированных параметрах среды. Между тем инвестиционные решения в электроэнергетике принимаются в условиях принципиальной неопределенности: динамика спроса на мощность, траектория технологических издержек, сроки появления конкурирующих решений, регуляторные изменения – все эти факторы не допускают надежного прогнозирования на горизонте 10–20 лет. В этих условиях стандартное *NPV* мышление, приравнивающее ценность проекта к дисконтированному потоку будущих доходов за вычетом затрат, систематически занижает стоимость проектов с высокой неопределенностью, поскольку не учитывает ценность управленческой гибкости: права отложить инвестирование, расширить масштаб при благоприятном развитии событий или отказаться от проекта при неблагоприятном (Myers S.C., 1977; Dixit A.K., Pindyck R.S., 1994; Trigeorgis L., 1996).

Метод реальных опционов, восходящий к работам Стюарта Майерса 1977 г. (Myers S.C., 1977) и биномиальной модели Кокса–Росса–Рубинштейна 1979 г. (Cox J.C., Ross S.A., Rubinstein M., 1979), позволяет явным образом включить стоимость гибкости в оценку проекта. На данном этапе метод применяется к отобранным в верхней части ранжирования проектам – условно к верхнему квинтилю ранжирования, для которых расчетные трудозатраты оправданы степенью приоритетности.

Шаг 4.1. Моделирование базового актива – спроса на мощность. Неопределенность проекта задается через динамику базового актива, в качестве которого принимается приведенная стоимость денежных потоков от ввода мощности. В непрерывном времени этот показатель моделируется геометрическим броуновским движением (*Geometric Brownian motion*, *GBM*):

$$dV = \mu V\, dt + \sigma V\, dW, \tag{5.18}$$

где μ – параметр дрифта (ожидаемый темп роста стоимости проекта); σ – волатильность; dW – приращение стандартного винеровского процесса. Из дискретного аналога *GBM* следует соотношение для одного шага:

$$V_{t+\Delta t} = V_t \cdot \exp\left[\left(\mu - \frac{1}{2}\sigma^2\right)\Delta t + \sigma\sqrt{\Delta t}\cdot\varepsilon\right], \tag{5.19}$$

где $\varepsilon \sim \mathcal{N}(0,1)$. Параметр волатильности σ калибруется по историческим данным о флуктуациях спроса на электроэнергию и цен на мощность на оптовом рынке. В российских условиях дополнительным источником данных служат результаты отборов мощности (КОМ), содержащие многолетние ряды ценовых котировок. Параметр дрифта μ в риск-нейтральной оценке заменяется безрисковой ставкой r, определяемой по доходности ОФЗ сопоставимой дюрации.

Шаг 4.2. Построение биномиальной решетки. Переход от непрерывного *GBM* к биномиальной решетке обеспечивается схемой Кокса – Росса – Рубинштейна (Cox J.C., Ross S.A., Rubinstein M., 1979). На каждом шаге Δt стоимость базового актива может увеличиться в u раз или уменьшиться в d раз:

$$u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}},\ d = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}} = \frac{1}{u}, \tag{5.20}$$

Значение в узле (i, j) решетки (момент $i \cdot \Delta t$, j положительных приращений) равно:

$$V_{i,j} = V_0 \cdot u^j \cdot d^{i-j}, \tag{5.21}$$

Риск-нейтральная вероятность восходящего движения:

$$p_u = \frac{e^{r\Delta t} - d}{u - d},\ p_d = 1 - p_u, \tag{5.22}$$

Для состоятельности биномиальной аппроксимации необходимо, чтобы $d < e^{r\Delta t} < u$, что при разумных параметрах всегда выполняется.

Шаг 4.3. Оценка опциона на отсрочку (*timing option*). Опцион на отсрочку – право инвестора реализовать проект с капитальными затратами I не сейчас, а в течение горизонта T при наступлении благоприятных условий (Dixit A.K., Pindyck R.S., 1994). Расчет ведется методом обратной индукции. В терминальных узлах ($i = T/\Delta t$):

$$F_{T,j} = \max(V_{T,j} - I, 0), \tag{5.23}$$

В промежуточных узлах:

$$F_{t,j} = \max\ (V_{t,j} - I,\ e^{-r\Delta t}\left[p_u \cdot F_{t+1,j+1} + p_d \cdot F_{t+1,j}\right]), \qquad (5.24)$$

Первый аргумент max – стоимость немедленной реализации проекта (исполнения опциона). Второй аргумент – продолженная стоимость ожидания: дисконтированное математическое ожидание стоимости опциона на следующем шаге. Инвестирование оправдано, когда немедленная реализация дает больше, чем ожидание. Стоимость опциона в нулевом узле $F_{0,0}$ и есть расширенная стоимость проекта, учитывающая гибкость. Стоимость гибкости отсрочки тем выше, чем больше волатильность σ и чем длиннее горизонт T:

$$ROV_{\text{delay}} = F_{0,0} - \max(V_0 - I,\ 0), \qquad (5.25)$$

Шаг 4.4. Опцион на расширение *(expansion option)*. При реализации крупных программных инвестиций нередко появляется возможность расширить масштаб проекта, заплатив дополнительные инвестиции I_e, и получить дополнительный денежный поток с коэффициентом расширения $\kappa > 1$. Стоимость проекта с опционом на расширение (Trigeorgis L., 1996):

$$F_{t,j}^{\text{exp}} = \max\ \left(V_{t,j}, \kappa \cdot V_{t,j} - I_e\right), \qquad (5.26)$$

то есть в каждый момент выбирается лучшее из двух решений: продолжать базовый проект или расширить его. Суммарная расширенная стоимость:

$$F_{0,0}^{\text{exp}} = \text{результат обратной индукции по решётке с узловыми значениями } F_{t,j}^{\text{exp}}). \qquad (5.27)$$

Шаг 4.5. Составной опцион для сопряженных пар. Данный шаг является наиболее оригинальным в контексте настоящей методики. Для сопряженных пар «промышленный проект – инфраструктурный проект» вводится структура составного опциона (*compound option*), впервые формализованная Геске (Geske R., 1979) в 1979 г. Экономическая логика такова: промышленный проект (например, создание отечественного производства турбин) представляет собой опцион первой ступени, реализация которого открывает право на осуществление инфраструктурных проектов (строительство электростанций) – опцион второй ступени. Если промышленный проект не реализован, инфраструктурные проекты, зависящие от него, вынуждены использовать импортное оборудование или откладываться.

Формально, стоимость составного опциона:

$$F_{\text{comp}} = F_1[F_2\ (V_{\text{infra}}, I_{\text{infra}}), I_{\text{ind}}, T_1, T_2], \qquad (5.28)$$

где $F_2(V_{\text{infra}}, I_{\text{infra}})$ – стоимость опциона второй ступени (на реализацию

инфраструктурных проектов) при условии, что первая ступень исполнена; I_{ind} – инвестиции в промышленный проект; $T_1 < T_2$ – соответственно даты исполнения первого и второго опционов. Вычисление производится последовательно: сначала методом обратной индукции оценивается опцион F_2 на горизонте $[T_1, T_2]$, затем его нулевая стоимость используется как базовый актив для опциона F_1 на горизонте $[0, T_1]$. Разность:

$$ROV_{comp} = F_{comp} - [\max(V_{infra} - I_{infra}, 0) + \max(V_{ind} - I_{ind}, 0)], \quad (5.29)$$

измеряет дополнительную стоимость гибкости, генерируемую именно технологическим сопряжением: она существенно превышает сумму опционных стоимостей по каждому проекту в отдельности, что количественно подтверждает целесообразность инвестирования в создание промышленного задела.

Шаг 4.6. Включение опционной стоимости в рейтинг. По результатам расчетов для каждого проекта верхнего квинтиля ранжирования определяется расширенный показатель инвестиционной привлекательности (Trigeorgis L., 1996):

$$NPV^* = NPV + ROV, \quad (5.30)$$

где $NPV = V_0 - I$ – статическая чистая приведенная стоимость; ROV – суммарная стоимость реальных опционов. Проекты с $NPV < 0$ при $NPV^* > 0$ переходят из категории «отклонить» в категорию «рассмотреть», что меняет итоговый состав претендентов на включение в портфель.

Этап 5. Портфельная оптимизация с учетом межпроектных зависимостей.

Ранжирование по *PROMETHEE* II и опционная оценка позволяют упорядочить проекты по привлекательности. Однако формирование портфеля не сводится к простому отбору топ-N проектов: ресурсные ограничения, зависимости сопряженности и необходимость диверсификации делают задачу существенно сложнее (Markowitz H., 1952). Она формализуется как задача бинарного целочисленного программирования с квадратичными членами в целевой функции.

Шаг 5.1. Переменные принятия решений и целевая функция. Введем бинарную переменную $x_i \in \{0, 1\}$, принимающую значение 1, если проект p_i включается в портфель, и 0 в противном случае (Brans J.-P., Mareschal B., 2005). Целевая функция содержит три слагаемых:

$$\max Z = \underbrace{\sum_{i=1}^{n} \Phi(p_i) \cdot x_i}_{\text{I}} + \underbrace{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j>i}^{n} S_{ij} \cdot x_i \cdot x_j}_{\text{II}} + \underbrace{\gamma \sum_{i=1}^{n} ROV_i \cdot x_i}_{\text{III}}, \quad (5.31)$$

Первое слагаемое представляет собой суммарный чистый поток *PROMETHEE* II включенных проектов. Второе слагаемое описывает синергетические эффекты от совместной реализации пар проектов. Коэффициент синергии:

$$S_{ij} = \delta \cdot c_{il_j} \cdot K_7(p_i, p_j), \tag{5.32}$$

где c_{ilj} – элемент матрицы сопряженности, связывающий технологию проекта p_i с промышленным проектом p_j, $K_7(p_i, p_j)$ – оценка временной синхронизации пары, δ – масштабирующий коэффициент. Третье слагаемое с параметром $\gamma \in [0,1]$ вносит в целевую функцию премию за управленческую гибкость.

Шаг 5.2. Бюджетное ограничение. Суммарные капитальные затраты включенных проектов не должны превышать доступного инвестиционного бюджета B:

$$\sum_{i=1}^{n} I_i \cdot x_i \le B, \tag{5.33}$$

При многопериодном горизонте планирования ограничение конкретизируется по временным периодам:

$$\sum_{i:\ T_{\text{start}}(p_i) \in [t,\ t+1)} I_i^{(t)} \cdot x_i \le B^{(t)},\ t = 0,1,\ldots,T-1, \tag{5.34}$$

где $I_i^{(t)}$ – капитальные затраты проекта p_i, приходящиеся на период t, а $B^{(t)}$ – инвестиционный бюджет периода.

Шаг 5.3. Ограничение на производственные мощности. Совокупная потребность в промышленном производстве по каждому СЭК-k не должна превышать доступных производственных мощностей:

$$\sum_{i \in \text{СЭК}_k} Q_i \cdot x_i \le Cap_k,\ k = 1,2,3,4,5\ , \tag{5.35}$$

где Q_i – требуемый объем промышленного производства (в натуральных единицах – штуках оборудования, МВт установленной мощности) для реализации проекта p_i, Cap_k – производственная мощность предприятий по k-й СЭК. Это ограничение фиксирует производственный предел, за которым одновременная реализация нескольких инфраструктурных проектов становится физически невозможной без соответствующего расширения машиностроительных мощностей.

Шаг 5.4. Ограничения сопряженности. Если инфраструктурный проект технологически зависит от промышленного проекта p_j (то есть $c_{ilj} \geqslant \theta$, где θ – пороговое значение существенности, например 0,6), включение p_i в портфель обусловлено включением p_j:

$$x_i \le x_j, \forall (i, j) : c_{il_j} \ge \theta, \tag{5.36}$$

Данное ограничение в линейной форме фиксирует отношение

предшествования: реализация инфраструктурного объекта предполагает наличие соответствующей производственной базы.

Шаг 5.5. Ограничения временной синхронизации. Для каждой сопряженной пары (*i, j*) момент готовности промышленного проекта $T_{\text{ready}}(p_j)$ и момент начала строительства инфраструктурного объекта $T_{\text{start}}(p_i)$ должны быть согласованы:

$$\left|T_{\text{start}}(p_i) - T_{\text{ready}}(p_j)\right| \le \Delta T_{\max} \cdot \left(x_i + x_j - 1\right), \ \forall (i,j) \in \text{сопряжённые пары}, \quad (5.37)$$

Правая часть обращается в нуль при $x_i = 0$ или $x_j = 0$, то есть ограничение активно лишь тогда, когда оба проекта включены в портфель.

Шаг 5.6. Ограничения диверсификации. Во избежание концентрации портфеля в единственном технологическом направлении (технологического замыкания) устанавливается верхняя граница числа проектов из одного кластера (David P.A., 1985; Markard E. et al., 2023):

$$\sum_{i \in \text{СЭК}_k} x_i \le N_k^{\max}, \ k = 1,2,3,4,5. \quad (5.38)$$

Значения $N_k^{\max}$ определяются исходя из стратегических соображений о допустимой концентрации технологического риска и согласуются с критерием *К*8 (устойчивость к замыканию).

Шаг 5.7. Решение задачи оптимизации. Задача в сформулированном виде является задачей квадратичного бинарного целочисленного программирования (*QBIP*). При числе проектов $n \leqslant 30$ она может быть решена точными методами ветвей и границ средствами коммерческих или открытых решателей (*CPLEX, GLPK*). При $n > 30$ точное решение становится вычислительно дорогостоящим, и для практических расчетов рекомендуются метаэвристические алгоритмы. Генетический алгоритм в данном контексте кодирует портфель как двоичную хромосому длины n, применяет операторы скрещивания и мутации, контролируя выполнение ограничений через штрафные функции. Алгоритм итеративно исследует пространство допустимых портфелей, принимая ухудшающие решения с вероятностью $e^{-\Delta Z / T_{\text{ann}}}$, где T_{ann} — это числовой параметр, который определяет, с какой вероятностью алгоритм может принять «худшее» решение или совершить резкую случайную мутацию. Оба метода позволяют находить решения, практически неотличимые от глобального оптимума, при сопоставимых вычислительных затратах.

Этап 6. Сценарный анализ устойчивости портфеля.

Полученный оптимальный портфель *P** не является окончатель-

ным ответом: он оптимален относительно базового сценария, принятого при постановке задачи, но не обязательно сохраняет свою ценность при иных предположениях о развитии энергосистемы, технологиях и институциональной среде (Dixit A.K., Pindyck R.S., 1994). Для проверки устойчивости используется сценарный анализ, реализующий логику робастной оптимизации.

Шаг 6.1. Построение сценарной матрицы. Формируется набор из S сценариев, охватывающих основные источники неопределённости. Каждый сценарий s задается вектором параметров $\theta_s = (\mu_s, \sigma_s, D_s, \text{политика}_s)$, где μ_s — темп роста спроса, θ_s — волатильность, D_s — вектор динамики технологических затрат, а «политика» определяет изменения регуляторной среды. Минимально достаточный набор включает три сценария: консервативный (замедленный рост спроса, сохранение импортозависимости, умеренный темп технологического обновления), инерционный (базовый сценарий по показателям Генеральной схемы) и инновационный (ускоренное технологическое обновление, высокий темп локализации, активная государственная поддержка). При наличии ресурсов рекомендуется расширять сценарную матрицу до 5–7 сценариев, в том числе включая стрессовые сценарии (жесткие санкционные ограничения, резкое падение цен на ОРЭМ).

Шаг 6.2. Переоценка портфеля в каждом сценарии. Для каждого сценария пересчитываются параметры всех восьми критериев для каждого проекта-кандидата: значения *TRL* корректируются с учетом сценарного темпа технологического развития, *LCOE* пересчитывается при изменении цен на топливо и капитальных затратах, параметры биномиальной решетки переопределяются при новых значениях μ_s и σ_s. Затем для каждого сценария s отдельно решается задача портфельной оптимизации, получая «идеальный» портфель P_s^* со значением целевой функции Z_s^*. Параллельно вычисляется значение целевой функции для исходного портфеля P^* в сценарии s: $Z_s(P^*)$.

Шаг 6.3. Индекс устойчивости портфеля. Мера устойчивости портфеля P* по отношению к сценарной неопределенности:

$$R(P^*) = \frac{1}{S}\sum_{s=1}^{S} \frac{Z_s(P^*)}{Z_s^*}, \qquad (5.39)$$

показывает, какую долю от сценарного оптимума в среднем обеспечивает выбранный портфель. Портфель признается устойчивым при $R(P^*)$

⩾ 0,85 (Dixit A.K., Pindyck R.S., 1994), то есть при условии, что ни в одном сценарии потери относительно оптимума не превышают 15 %.

Шаг 6.4. Матрица сожаления. Для более детального понимания потерь вычисляется матрица $\mathcal{R}$ потерь размерности $S \times |\mathcal{P}|$, где $|\mathcal{P}|$ – число анализируемых портфелей-кандидатов (не только P^*, но и ближайших к нему альтернатив из решателя):

$$\mathcal{R}_{sk} = Z_s^* - Z_s(P_k), \tag{5.40}$$

Минимаксный критерий сожаления предписывает выбирать портфель, минимизирующий максимальные потери по всем сценариям:

$$P^{**} = \arg\min_{P_k} \max_s \mathcal{R}_{sk}, \tag{5.41}$$

Если $P^{**} \neq P^*$, это является сигналом к пересмотру: базовый оптимальный портфель концентрирует риск в одном сценарии, тогда как минимаксный вариант более сбалансирован.

Шаг 6.5. Индекс сценарной волатильности проектов. Для идентификации отдельных «качающихся» проектов вычисляется индекс сценарной волатильности:

$$V_i = \sqrt{\frac{1}{S-1}\sum_{s=1}^{S}\left(\Phi_s(p_i) - \bar{\Phi}(p_i)\right)^2}, \tag{5.42}$$

где $\Phi_s(p_i)$ – чистый поток проекта p_i по результатам ранжирования *PROMETHEE* в сценарии s, $\bar{\Phi}(p_i) = \frac{1}{S}\sum_s \Phi_s(p_i)$ – среднее значение. Высокое V_i означает, что проект оказывается в числе приоритетных в одних сценариях и аутсайдером – в других. Такие проекты подлежат особому анализу: их включение в портфель оправдано только при уверенности в реализации соответствующих сценариев или при наличии дополнительных стратегических аргументов.

Шаг 6.6. Итерационная корректировка портфеля. Если $R(P^*) < 0{,}85$, запускается процедура корректировки. Проекты с наибольшим V_i, включенные в P^*, последовательно заменяются на ближайших по рангу конкурентов с меньшей волатильностью. После каждой замены пересчитываются $R(P^*)$ и все ограничения задачи оптимизации. Итерации продолжаются до достижения $R \geqslant 0{,}85$ или до исчерпания допустимых замен. Результатом является финальный робастный портфель $\tilde{P}$, отвечающий условию устойчивости при умеренной потере целевой функции относительно исходного оптимума.

Задача отбора сопряженных промышленно-инфраструктурных

проектов в электроэнергетике не представляет собой технического усложнения стандартной портфельной проблемы (Markowitz H., 1952). Это качественно иная исследовательская постановка. Объектом управления здесь выступает не отдельный проект и не их механическая совокупность, а технологический каскад – это временное сопряжение взаимообусловленных решений, связывающих генерирующий комплекс с производственной базой энергомашиностроения. Именно эта особенность определяет научную новизну предложенного инструментария и его прикладную значимость.

Центральным теоретическим результатом раздела является шестиэтапная методика, объединяющая три методологических направления, которые в научной литературе традиционно существуют обособленно. Первое – структурный анализ межотраслевых технологических взаимодействий, реализованный через матрицу сопряженности на основе метода аналитических иерархий (Saaty T.L., 1980; Saaty T.L., 1990). Второе – многокритериальное ранжирование по методу *PROMETHEE* II с включением в систему критериев показателей промышленной готовности и временной синхронизации (Brans J.-P., Vincke Ph., Mareschal B., 1986; Brans J.-P., Mareschal B., 2005). Третье – динамическая оценка управленческой гибкости посредством аппарата реальных опционов, включая составные, отражающие двухуровневую природу сопряженных пар (Myers S.C., 1977; Cox J.C., Ross S.A., Rubinstein M., 1979; Geske R., 1979; Trigeorgis L., 1996).

Ключевая методологическая новизна состоит во введении понятия технологической сопряженности как самостоятельной аналитической категории с операциональным содержанием. Взаимозависимость инфраструктурных и промышленных проектов до сих пор признавалась лишь на качественном уровне. Механизмы ее формализации в инвестиционном анализе оставались непроработанными. Предложенная матрица сопряженности устраняет этот пробел. Она переводит межпроектные связи из плоскости деклараций в плоскость количественных ограничений портфельной задачи.

Самостоятельным теоретическим вкладом является концепция составного реального опциона для сопряженных пар. Промышленный проект трактуется как опцион первой ступени, реализация которого открывает право на осуществление инфраструктурных проектов, опционов второй ступени. Стоимость этой двухуровневой структуры превышает сумму опционных стоимостей каждого проекта в отдельности (Geske R., 1979). Следует отметить, что этот прирост количественно

выражает ценность технологического суверенитета в условиях санкционного давления и рыночной неопределенности, поэтому данный результат имеет непосредственное прикладное значение. Он позволяет обосновать государственное участие в финансировании промышленных проектов, прямая доходность которых уступает рыночному порогу, тогда как опционная стоимость существенно выше (Myers S.C., 1977; Dixit A.K., Pindyck R.S., 1994).

Вместе с тем необходимо четко обозначить ограничения методики. Качество матрицы сопряженности определяется компетентностью и независимостью привлекаемых экспертов. При малой выборке или систематических корпоративных смещениях суждений результаты первого этапа теряют достоверность. Оценка реальных опционов чувствительна к параметру волатильности: российский рынок мощности располагает ограниченной наблюдаемой историей, и калибровка по имеющимся данным сопряжена с погрешностями, нарастающими по мере увеличения прогнозного горизонта. Наконец, портфельная задача в квадратичной постановке при значительном числе проектов-кандидатов допускает лишь приближенное решение метаэвристическими методами (Saaty T.L., 1990; Cox J.C., Ross S.A., Rubinstein M., 1979). Перечисленные ограничения не дискредитируют аналитический инструментарий, а определяют условия его корректного применения и формируют повестку дальнейших исследований.

Выполненные теоретические построения образуют основу для следующего этапа работы эмпирической апробации методики на реальном массиве инвестиционных проектов российского генерирующего комплекса и энергомашиностроения. В ходе апробации будут уточнены параметрические настройки, верифицирована чувствительность результатов к вариациям экспертных оценок и накоплен практический опыт применения в конкретных институциональных условиях. Методический подход рассчитан прежде всего на использование в системе программно-проектного управления отраслью при формировании Генеральной схемы размещения объектов электроэнергетики и долгосрочных инвестиционных программ. Вместе с тем ее предметная область не ограничена электроэнергетикой. Логика технологической сопряженности инфраструктурных и промышленных инвестиций воспроизводима в любой капиталоемкой отрасли с длинными производ-

ственными циклами, например, в нефтегазовом комплексе, транспортной инфраструктуре, атомной и водородной энергетике.

5.2. Сравнительная эффективность типов электрогенерирующих источников с применением многомерного вероятностного анализа[46]

Сопряженность инвестиционных проектов сооружения генерирующих мощностей различных типов с проектами создания новой техники для этих целей, рассмотренная в разделе 1.3, может выступать дополнительным фактором усиления ценности тех или иных вариантов обосновываемого типа генерирующей мощности по виду первичного энергоносителя. Так, приоритет суверенного технологического развития придает дополнительный интерес разработке и ограниченному применению фотоэлектрических элементов в качестве источника электрической энергии, который в ряде случаев может перекрывать прямой экономический эффект при традиционном, по существу, однокритериальном экономическом обосновании выбора типа преобразования первичной энергии в конечную.

Вообще же необходимо отметить важность возрождения и дальнейшего развития культуры сравнительного анализа при экономических обоснованиях системных решений. Если ставится стратегическая задача возобновления наращивания генерирующих мощностей, не стоит препятствовать ее решению акцентуации медленной окупаемости в рамках логики коммерческой или финансовой эффективности, то есть абсолютной эффективности с позиции конкретного инвестора или дохода, извлекаемого при коммерческой эксплуатации обосновываемого объекта. Гораздо важнее посмотреть более широкий круг альтернатив и оценить их системное влияние на ресурсно-технологический потенциал большой системы и народного хозяйства. Такое системное влияние – это и есть проявление обратной связи инфраструктурной системы на производственно-технологические комплексы страны. Естественно, что эти комплексы не обязательно локализуются в регионах размещения объектов инфраструктурных систем, в данном случае размещения электрогенерирующего объекта.

Как отмечается в разделе 5.1, одним из критериев многокритериальной оценки проектов-кандидатов является критерий К4 (экономическая конкурентоспособность). Этим критерием является LCOE –

[46] *Авторы: К. Б. Кожов, П. Е. Мезенцев, И. К. Кожов.*

средняя расчетная себестоимость производства электроэнергии на протяжении всего жизненного цикла энергоустановки. LCOE позволяется сравнивать различные технологии производства электроэнергии на электростанциях разных типов. В частотности с использованием критерия LCOE можно сравнивать газовые и солнечные электростанции и выбирать наилучший вариант.

Как уже не раз отмечалось, «четвертый энергетический переход в электроэнергетике, обусловленный сменой генераций, произойдет при достижении сетевого паритета в мировом энергобалансе, или когда стоимость производства электроэнергии из ВИЭ окажется равна или даже меньше стоимости энергии, получаемой из ископаемого топлива» (Газман, 2026, с. 224). В настоящее время себестоимость электроэнергии от ВИЭ значительно сокращается благодаря применению относительно недорогих и долговечных новых материалов, росту увеличения эффективности работы энергоустановок. На основе критерия LCOE проиллюстрирована сравнительная эффективность альтернатив выбора первичного энергоносителя. В частности, показана зона преимущества по себестоимости производства электроэнергии на фотоэлектрических элементах по сравнению с электростанциями той же установленной мощности на природном газе. Релевантность такого сравнения подтверждается тем, что среди применяемых активно видов органического топлива в сравнение в ВИЭ взято наиболее экономичное в локальном отношении получение электроэнергии на природном газе, а также тем, что солнечные станции доминируют среди ВИЭ по темпам роста вводимой мощности.

С учетом этого в данном разделе проводится сравнение солнечной и газовой генерации также по критерию экономической конкурентоспособности, который основан на определении экономической эффективности сравниваемых электростанций и аналогичен методу LCOE. Но отличие этого подхода заключается в том, что применена методология сравнительного анализа на базе многомерного вероятностного моделирования в условиях неопределенности исходной информации.

Социально-экономическое развитие регионов определяется совокупностью факторов, среди которых важное место занимают как деятельность предприятий различных отраслей, так и наличие трудовых ресурсов, и инвестиционная привлекательность территорий. Существенную роль играет и уровень развития инфраструктуры, создающей условия для устойчивого экономического роста. Особое значение

имеет энергетическая инфраструктура, обеспечивающая стабильную работу промышленности, социальной сферы и бытового сектора. Без современной системы энергоснабжения невозможно реализовать масштабные проекты, привлекать инвестиции и повышать качество жизни населения. Таким образом, именно наличие качественной энергетической базы становится одним из ключевых драйверов прогрессивного развития территорий. Поэтому развитие инфраструктурных систем и повышение связанности территории России относятся к числу приоритетных направлений государственной политики (Большие…, 2023; Наумов, Никулина, 2024).

Современные тенденции роста экономики сопровождаются увеличением потребления энергии, что усиливает антропогенное воздействие на окружающую среду и приводит к ускоренному исчерпанию природных ресурсов. Это вызывает удорожание топливно-энергетических ресурсов, включая электроэнергию (Стребков, 2019), и формирует необходимость перехода к технологиям генерации, не использующим ископаемое топливо и минимизирующим экологический ущерб.

В этих условиях требуется глубокая модернизация энергетической инфраструктуры и расширение использования перспективных источников энергии, работающих на первичных природных ресурсах – энергии Солнца, ветра, воды, геотермальных процессах и др. (Hingorani, Gyugyi, 2020).

Анализ структуры электроэнергетики показывает, что основную долю мировой генерации обеспечивают тепловые электростанции (ТЭС), обладающие существенными экологическими недостатками. Высокотехнологичная генерация на основе атомных электростанций (АЭС) развивается более медленно из-за значительных капитальных затрат. В России все большее внимание уделяется развитию альтернативных способов получения электроэнергии на базе возобновляемых источников (ВИЭ). Широкое внедрение цифровизации, автоматизации и технологий искусственного интеллекта в энергосистемы способствует повышению темпов развития и внедрения низкоуглеродного производства электроэнергии (НПЭ) на базе ВИЭ и, в частности, солнечных электростанций (СЭС).

Мировая практика демонстрирует активный рост солнечной энергетики. В 2023 году установленная мощность СЭС Китая достигла величины около 500 ГВт, что составляет около 40 % мировой солнечной генерации. США занимают второе место со 145 ГВт. По данным Госу-

дарственного энергетического управления Китая (NEA), в первом полугодии 2023 года вложения в строительство СЭС составили 134,9 млрд юаней ($15,8 млрд), что в 3,4 раза превышает инвестиции в тепловую энергетику. Параллельно развивается строительство гидроаккумулирующих станций, мощность которых планируется увеличить до 64 ГВт к 2025–2026 годах (49 ГВт в 2023 г.) (Chien, Lior, 2011; Pitz-Paal, Krüger, Hinsch, 2022). В России, по данным системного оператора, установленная мощность 70 действующих СЭС составляет около 2,1 ГВт (0,85 % общей мощности), а к 2025 году прогнозировалось увеличение до 2,56 ГВт.

Электроэнергетическая сфера на территории РФ по степени централизации энергоснабжения делится на зоны централизованного и децентрализованного электроснабжения (Стенников, Славин, 2015; Суржикова, 2012). В Схеме и программе развития электроэнергетики России на 2025–2030 гг. приведены границы таких систем и направления их модернизации.

Зона централизованного электроснабжения охватывает регионы страны в сфере действия Единой энергетической системы России (ЕЭС России). ЕЭС состоит из совокупности объединенных энергетических систем (ОЭС) макрорегионов. В частности, на Большом Урале, включая автономные округа севера УрФО, абсолютно преобладают территории, включенные в ОЭС Урала, и их энергетика работает в зоне централизованного электроснабжения. В этих энергосистемах для решения проблем негативного влияния потребления органического топлива при производстве электроэнергии создаются перспективные многокомпонентные солнечно-энергетические комплексы (Большой…, 2024).

Зона децентрализованного электроснабжения страны включает зону функционирования технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем (ТИТЭС) Сибири и Дальнего Востока и зону функционирования небольших изолированных энергоузлов. Эти изолированные энергоузлы размещены на территориях преимущественно сельских населенных пунктов, не охваченных централизованным электроснабжением, удалены от топливных баз, имеют сложные и затратные схемы доставки топлива и используют дизельные электростанции (ДЭС) в качестве генераторов электроэнергии. В таких условиях внедрение СЭС на этих территориях создает возможность перехода к солнечно-дизельным комплексам с накопителями энергии (Тремясов, Зограф, Кривенко, 2021). Рассматриваемый в работе комплекс СЭС Камчатского края относится именно к ТИТЭС децентрализованной зоны.

Анализируя солнечные электростанции, работающие в различных зонах (централизованное и децентрализованное электроснабжение), и проводя их сравнение по технико-экономическим показателям (экономический критерий), заданным диапазонами неопределенности, можно оценить эффективность и целесообразность их сооружения в различных регионах России с учетом сложившихся пропорций между затратами на сооружение электростанций такого типа и тарифной политикой, проводимой в регионе.

В отличие от стран Запада, Россия располагает значительными запасами органического топлива, что позволяет размещать угольные станции вдали от крупных городов и меньше зависит от развития ВИЭ. Однако дальнейшее развитие солнечной энергетики в РФ необходимо, но требует дополнительных инвестиций на развитие новых технологических решений, направленных на снижение себестоимости вырабатываемой СЭС электроэнергии, повышение энергоэффективности и укрепление технологического суверенитета в условиях санкций. В арктической зоне внедрение СЭС способствует сокращению северного завоза топлива, снижению нагрузки на дизельные электростанции и последующему переводу их в резервный режим. Применение фотоэлектрических преобразователей в сочетании с аккумуляторными системами позволяет значительно уменьшить топливную составляющую в себестоимости электроэнергии. Наиболее распространенные в России кремниевые солнечные батареи используются в труднодоступных населенных пунктах и гибридных энергосистемах. Для повышения эффективности солнечной генерации необходимы современные накопители, концентраторы энергии и материалы с улучшенными характеристиками и повышенным КПД (Бушуев, Новиков, 2020).

В современных условиях научное сообщество уделяет значительное внимание развитию инфраструктурных систем, включая альтернативные источники энергии. Особый интерес вызывают солнечная энергетика и другие технологии возобновляемой энергетики (ВИЭ). Наблюдаемая трансформация мировой энергетической системы направлена на постепенный отказ от использования ископаемого топлива и переход к экологически безопасным технологиям. Солнечная энергетика, являющаяся одной из наиболее перспективных отраслей, демонстрирует устойчивый рост, что обусловлено удешевлением фотоэлектрических модулей и развитием технологий накопления энергии. Количество научных исследований, посвященных повышению эффек-

тивности солнечных панелей, увеличению срока их службы и адаптации к различным климатическим условиям, постоянно растет. Параллельно совершенствуется инфраструктура интеграции солнечной генерации в существующие электросети, что способствует повышению надежности и доступности электроэнергии.

Оптимальной моделью организации региональной электроэнергетики рассматривается гибридный подход, сочетающий системные и территориальные принципы управления. Данная модель предполагает создание энергокомплексов с широким диапазоном генерирующих мощностей. Развитие энергетического сектора предполагает постепенное внедрение мер — от относительно простых решений по управлению спросом до комплексной модернизации инфраструктуры, включая обновление угольных ТЭС и строительство объектов малой распределенной генерации, основанных на ВИЭ и оборудованных системами накопления энергии. Такие решения повышают устойчивость энергосистем и снижают зависимость от централизованных источников. ВИЭ, включая солнечные станции, не создают выбросов парниковых газов или токсичных веществ, однако их работа зависит от природных факторов, что снижает способность обеспечивать базовую нагрузку. Для покрытия пиковых нагрузок в объединенной энергосистеме России применяются газотурбинные установки, которые в перспективе планируется заменить гидроаккумулирующими станциями и крупными накопителями энергии исходя из опыта Китая. В условиях значительных запасов ископаемого топлива и большой территории тепловые электростанции продолжают занимать важное место в российском энергобалансе, что замедляет темпы энергетического перехода в РФ. Тем не менее развитие отечественных технологий ВИЭ, включая солнечную энергетику, является ключом к снижению стоимости генерации и расширению экспортного потенциала страны.

Необходимо отметить, что электроэнергетические системы включают два сегмента. Первый — системная (сетевая) энергетика, обеспечивающая основной объем выработки электроэнергии. Второй — распределенная энергетика, представлена источниками, функционирующими вне общей сетевой инфраструктуры и производящими меньшие объемы электроэнергии, но демонстрирующими тенденцию к росту. В изолированных энергоузлах России активно используется распределенная энергетика, основанная на НПЭ (Белов, Федоров, 2022). Так, в Средне-Камчатском энергоузле высокая стоимость электроэнергии

обусловлена использованием дизельных электростанций, работающих на дорогом привозном топливе. Внедрение автономных объектов генерации на базе ВИЭ (ветровых и солнечных электростанций) позволит снизить расход ископаемого топлива и уменьшить тарифы на электроэнергию. Для повышения надежности электроснабжения в таких зонах целесообразно использование дизель-солнечных комплексов или СЭС в сочетании с промышленными накопителями энергии большой мощности.

Другим примером развития региональной энергетики на основе НПЭ является строительство солнечных электростанций в Свердловской области в рамках федеральной программы развития ВИЭ и инвестиционной программы компании «Т Плюс». В течение пяти лет в регионе планируется построить 28 солнечных электростанций общей мощностью 137 МВт. Первая введенная в эксплуатацию СЭС (Артинский район) уже демонстрирует экологический эффект: ежегодная выработка около 40 млн кВт·ч позволяет сократить выбросы на 14 тыс. тонн. На станции используются гетероструктурные фотоэлектрические модули отечественного производства, адаптированные к низким зимним температурам. Уровень инсоляции на площадке Артинской СЭС составляет около 1 033 кВт·ч на 1 кВт установленной мощности, что сопоставимо с показателями Германии — одного из мировых лидеров в области «зеленой» энергетики. Однако близость данного значения к минимальному порогу эффективности (1 000 кВт·ч/м^2) делает необходимым более тщательное исследование потенциала солнечных станций в данном и других российских регионах. Тем не менее такие энергоисточники могут эффективно работать как кратковременные установки, функционирующие 1 000 – 2 500 часов в год, и выступать дополнением к централизованному энергоснабжению. В сочетании с накопителями энергии их применение может быть расширено для нужд агросектора и коммунально-бытовой сферы.

В имеющихся научных работах недостаточно рассмотрен вопрос эффективности функционирования региональных солнечных электростанций в условиях различной степени централизации энергоснабжения. Переход к новым технологическим решениям в солнечной энергетике остается актуальной задачей, требующей значительных инвестиций. В этой связи необходима разработка моделей, позволяющих оценить экономическую эффективность СЭС с учетом технологических особенностей и степени централизации энергосистем в местах их раз-

мещения. Такие модели обеспечат объективную оценку целесообразности дальнейшего развития солнечной энергетики в России.

С учетом изложенных положений для оценки эффективности строительства возобновляемых источников энергии, в частности солнечных электростанций, в качестве альтернативных вариантов электроснабжения может быть применена методология сравнительного анализа на базе многомерного вероятностного моделирования в условиях неопределенности исходной информации. Такой подход позволяет разделить обучающую выборку на два кластера — эффективные и неэффективные варианты СЭС. На основе данных кластеров формируется уравнение разделяющей гиперплоскости, с помощью которого анализируемая солнечная электростанция может быть отнесена к одному из кластеров, что позволяет сделать вывод о степени ее эффективности при заданных входных параметрах (Мезенцев, Костин, Ананичева, 2017). Далее данная методика подробно рассматривается применительно к оценке эффективности солнечных электростанций, функционирующих в региональных энергосистемах РФ с различной степенью централизации электроснабжения.

Предлагаемый метод моделирования основывается на оценке экономической эффективности через сравнение затрат и получаемого эффекта за расчетный период эксплуатации. В рамках подхода определяется разница между дисконтированными затратами на покупку электроэнергии из существующей региональной системы генерации и получением ее от собственной СЭС. Существующая система генерации характеризуется действующей отпускной ценой за киловатт-час в рассматриваемом субъекте РФ.

В качестве критерия экономической эффективности солнечных электростанций используются дисконтированные затраты за весь расчетный период. Для проведения вычислений применяется четырнадцать параметров (табл. 5.1), которые логически разделены на две группы: а) внешние переменные, описывающие условия функционирования СЭС; б) внутренние переменные, характеризующие параметры самой электростанции, капвложений, доли собственных нужд, численности обслуживающего персонала и др.

Таблица 5.1

Переменные для определения экономической эффективности СЭС

№	Наименование	Обозначение
	Внешние переменные	
1	Цена внешней электроэнергии, руб./кВт.час	z_1
2	Ставка налога на прибыль, %	z_2
3	Ставка совокупных отчислений на ФОТ, %	z_3
4	Налог на имущество, %	z_4
5	Коэффициент дисконтирования, %	z_5
6	Ставка НДС, %	z_6
	Внутренние переменные	
1	Установленная мощность станции, МВт	w_1
2	Коэффициент использования установленной мощности, %	w_2
3	Потребление электроэнергии на собственные нужды, %	w_3
4	Удельные капитальные вложения, тыс. руб./кВт	w_4
5	Срок эксплуатации, лет	w_5
6	Численность персонала, чел.	w_6
7	Средняя заработная плата, тыс. руб.	w_7
8	Продолжительность строительства, лет	w_8

Исследования по оценке эффективности солнечных электростанций в различных зонах централизации электроснабжения проводятся в два этапа. На первом этапе оценивается эффективность СЭС, расположенных в зоне централизованного электроснабжения. В качестве примера используется Артинская СЭС в Свердловской области, входящая в объединенную энергосистему Урала. На втором этапе анализируются солнечные электростанции в условиях децентрализованной энергосистемы — на примере комплекса СЭС Камчатского края (Мезенцев, Кожов, Кожов, 2025). При выполнении расчетов учитывается значительная неопределенность технических характеристик оборудования и внешних условий его эксплуатации. Она обусловлена как широким диапазоном тарифов на электроэнергию в регионах России, так

и разнообразием применяемых технологий и типов оборудования, что приводит к вариативности технико-экономических показателей. Капитальные затраты на строительство СЭС определяются исходя из удельных капитальных вложений и проектной мощности станции. Расходы на оплату труда вычисляются как произведение средней заработной платы в отрасли на количество работников. Изменение себестоимости выработки электроэнергии, в свою очередь, влияет на величину прибыли, что учитывается в модели через произведение ставки налога на прибыль и разницы между затратами на покупку электроэнергии в энергосистеме и производство электроэнергии на солнечной электростанции. Аналогичным образом учитываются изменения по налогу на добавленную стоимость (НДС): для каждого года определяется разница между затратами на приобретение товаров и услуг, после чего она умножается на ставку налога. Налог на имущество рассчитывается исходя из остаточной стоимости основных фондов при сроке их службы 25 лет (амортизация — 4 % в год).

Учет неопределенности в методике реализуется через выполнение многовариантных расчетов и построение регрессионной модели критерия экономической эффективности. Такая модель отражает зависимость эффективности от внешних условий и внутренних технико-экономических характеристик станции и позволяет определить диапазоны значений, при которых применение СЭС является экономически оправданным. В основу моделирования положены принципы полного факторного эксперимента (Планирование…, 1980). Выборка, формируемая на его основе, обладает свойством ортогональности независимых переменных, что повышает точность регрессионной модели и уменьшает доверительные интервалы коэффициентов.

При реализации полного факторного эксперимента каждая независимая переменная изменяется на требуемом числе уровней, а для всех возможных их комбинаций вычисляется значение зависимой переменной (отклика). Таким образом формируется выборка для численного эксперимента в рамках имитационного моделирования. На основании полученных данных определяется характер влияния каждой переменной на отклик. Так, анализ графиков отклика при варьировании отдельных факторов позволяет установить тип зависимости. В ходе исследования выявлено, что отклик имеет линейную зависимость от всех переменных, кроме коэффициента дисконтирования, который оказывает обратно пропорциональное влияние на эффективность использования СЭС. После этого, приравнивая отклик к нулю, формиру-

ют уравнение разделяющей поверхности в пространстве независимых переменных.

Для иллюстрации сказанного показана малоразмерная задача, демонстрирующая проведение полного факторного эксперимента для трех независимых переменных x_1, x_2 и x_3, которые варьируются на трех уровнях, и получаемого отклика y (табл. 5.2).

Таблица 5.2

План-матрица полного факторного эксперимента демонстрационной задачи

Номер плана	x_1	x_2	x_3	y
1	1	1	1	19
2	2	1	1	25
3	3	1	1	35
4	1	2	1	32
5	2	2	1	38
6	3	2	1	48
7	1	3	1	45
8	2	3	1	51
9	3	3	1	61
10	1	1	2	15
11	2	1	2	21
12	3	1	2	31
13	1	2	2	28
14	2	2	2	34
15	3	2	2	44
16	1	3	2	41
17	2	3	2	47
18	3	3	2	57
19	1	1	3	11
20	2	1	3	17
21	3	1	3	27
22	1	2	3	24
23	2	2	3	30
24	3	2	3	40
25	1	3	3	37
26	2	3	3	43
27	3	3	3	53

На основе таблицы 5.2 средствами Excel получена корреляционная матрица, подтверждающая тезис об отсутствии связей между независимыми переменными при реализации идеи полного факторного эксперимента. Корреляционная матрица представлена в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Корреляционная матрица демонстрационной задачи

Переменная	x_1	x_2	x_3	y
x_1	1			
x_2	0	1		
x_3	0	0	1	
y	0,506979	0,823842	-0,25349	1

Также средствами Excel выполнен регрессионный анализ, оценки полученных коэффициентов представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4

Оценка коэффициентов демонстрационной задачи

Переменная	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение
y-пересечение	0	-	-	-
x_1	8	4,06347E-16	1,96876E+16	0
x_2	13	4,06347E-16	3,19923E+16	0
x_3	-4	4,06347E-16	-9,8438E+15	0

Кроме этого, для линейной модели получена оценка адекватности в виде значения критерия Фишера $F=2,7\cdot10^{33}$, и коэффициент множественной детерминации $R^2=1$. Значения этих оценок и приведенных в таблице 5.4 доверительных интервалов коэффициентов показывают высокое качество моделирования.

Разработанные методы имитационного моделирования и построения разделяющей поверхности применены для оценки эффективности солнечных электростанций, функционирующих в условиях централизованного (Артинская СЭС) и децентрализованного (Камчатские СЭС) электроснабжения. Апробация моделей осуществлялась на указанных объектах. Как отмечалось в методической части, оценка эффективно-

сти СЭС при различной степени централизации энергоснабжения проводилась поэтапно.

В соответствии с методикой полного факторного эксперимента при варьировании семи независимых переменных на пяти уровнях выполнено 78125 (5^7) расчетов накопленного эффекта (NV). Это позволило получить коэффициенты регрессионной модели с высокой степенью достоверности средствами MS Excel. Результаты моделирования представлены формулой:

$$Э = 0{,}3254z_1 - 0{,}0471w_1 + 0{,}0781w_2 - 0{,}0217w_3 - 0{,}0209w_4 - 0{,}0103w_6 - -0{,}0029w_7 - 0{,}3022, \quad (5.43)$$

Обозначения переменных соответствуют таблице 5.1. Остальные использованные в расчетах переменные считаются условно постоянными и принимают значения: z_2=*20 %;* z_3=*27,1 %;* z_4=*2,2 %;* z_5=*8 %;* z_6=*18 %;* w_5=*20 лет;* w_8=*1 год*.

По диапазону исходных значений накопленный эффект за 20-летний период изменяется от −6,437 до 3,628. На основе этих 78 125 наблюдений сформирована кривая распределения (рис. 5.1). Согласно полученным результатам, обе СЭС демонстрируют положительную эффективность: Артинская СЭС имеет координату на рисунке (0,1; 69 650), Камчатские СЭС — (1,6; 77 096), что отражает соответствующие накопленные эффекты — 0,1 млрд руб. и 1,6 млрд руб. Как показали расчеты, срок окупаемости составляет 8 лет для Артинской СЭС и 15 лет для Камчатских СЭС. Таким образом, предполагаемая неэффективность СЭС в зоне централизованного электроснабжения не подтвердилась, и на примере Артинской СЭС продемонстрирован положительный, хотя и близкий к разделяющей поверхности, эффект. Для децентрализованной зоны (Камчатские СЭС) ее эффективность подтверждена модельными исследованиями.

Таким образом, развитие солнечной энергетики в России является необходимым направлением, однако требует дальнейшего совершенствования технологий, оптимизации экономических механизмов и адаптации решений к региональным условиям. Это имеет стратегическое значение для роста технологического лидерства РФ и повышения уровня жизни населения, укрепления национальной безопасности, осуществления стабильного развития экономики в условиях технологических вызовов и экологических ограничений.

Таким образом, проведен комплексный анализ перспектив применения солнечных электростанций (СЭС) в различных зонах электро-

снабжения Российской Федерации на основе современных методологических подходов, включающих имитационное моделирование, многомерный вероятностный анализ и построение разделяющей гиперплоскости для классификации вариантов по степени эффективности. Исследование охватывало как централизованную, так и децентрализованную зоны энергоснабжения и позволило получить ряд значимых научно-практических результатов по оценке эффективности внедрения СЭС в различных субъектах РФ с учетом факторов неопределенности.

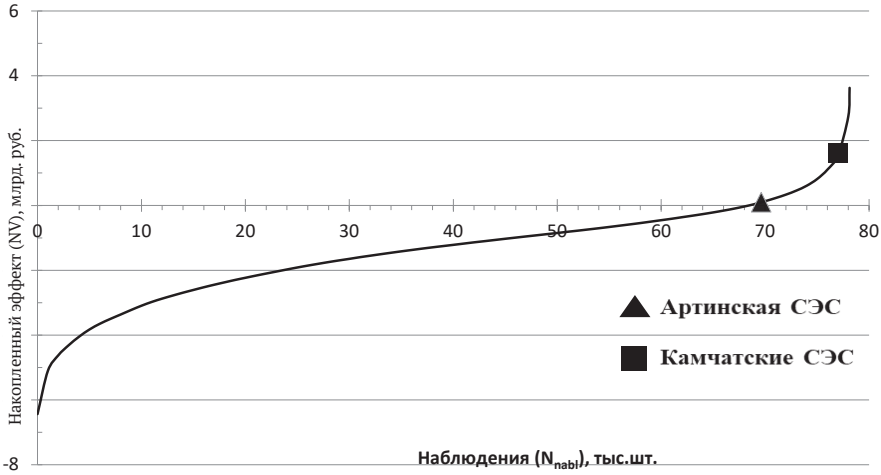


Рис. 5.1. *Определение зависимости NV = f(N_{nabl})*

Проведенный анализ подтвердил актуальность развития солнечной энергетики в современных условиях развития энергетических систем страны и потребности в снижении углеродной нагрузки. Установлено, что СЭС обладают достаточно существенным потенциалом для повышения эффективности энергоснабжения, особенно в изолированных и децентрализованных регионах. Построенные модели позволили количественно оценить накопленный дисконтированный эффект от внедрения Артинской СЭС (централизованная зона) и комплекса Камчатских СЭС (децентрализованная зона). Полученные результаты показывают положительную экономическую эффективность обоих объектов, хотя в случае централизованной зоны эффект невысокий и находится вблизи разделяющей поверхности. Показано преимущество

СЭС в децентрализованных энергосистемах как инструмента снижения расходов на топливо и повышения экологической эффективности.

Оценивая полноту решаемых задач, можно отметить, что в работе были проанализированы мировые и российские тенденции развития солнечной энергетики, построены модели оценки эффективности СЭС с учетом неопределенности исходных данных, проведен полный факторный эксперимент для формирования выборки имитационных данных, выполнена классификация вариантов СЭС по критерию эффективности и проверено влияние степени централизации электроснабжения на эффективность СЭС.

Полученные результаты могут служить основой для разработки региональных программ внедрения СЭС в децентрализованных зонах электроснабжения, подготовки технико-экономических обоснований новых объектов распределенной генерации, оптимизации инвестиционной политики при сооружении объектов ВИЭ, формирования требований к параметрам оборудования (удельные капитальные вложения, коэффициент использования мощности, характеристики накопителей) и выбора оптимальных регионов для строительства СЭС на основе данных об инсоляции, ценовых показателей по топливу, используемому для энергетических объектов.

Разработанная методика может быть использована в будущих исследованиях, при оценке перспективного развития СЭС в субъектах РФ, а также при подготовке региональных программ развития низкоуглеродной энергетики.

Оценка сравнительной эффективности газовой и солнечной электростанций

В продолжение вышеизложенной методики моделирования критерия экономической эффективности на базе многомерного моделирования представляется интересным сравнить газовую и солнечную генерацию. Для решения такой задачи необходимо расширить перечень исходных данных характеристиками второй электростанции, а сравнение провести путем оценки разности накопленных экономических эффектов за период эксплуатации.

Важным и необходимым условием корректности результатов является равенство технических эффектов сравниваемых по экономическим показателям вариантов. Предлагается «выравнивать» варианты по годовой выработке электроэнергии. Основным отличием газовой и солнечной электростанций является коэффициент использования

установленной мощности (КИУМ). Таким образом, необходимо сравнивать станции с различной мощностью. Дискретность мощности солнечных электростанций можно считать незначительной, так как она набирается из фотоэлектрических панелей малой единичной мощности, а мощность выпускаемых промышленностью газовых установок определяется сравнительно большими мощностями блоков. При этом логично рассматривать значения мощности солнечных станций, связанные с мощностью вариантов газовых станций через соотношение коэффициентов использования установленной мощности. Предлагаемая формула связи мощностей солнечной и газовой станций выглядит так:

$$N_{\text{СЭС}} = N_{\text{ГАЗ}} \frac{\text{КИУМ}_{\text{ГАЗ}}}{\text{КИУМ}_{\text{СЭС}}}. \qquad (5.44)$$

где $N_{СЭС}$, $КИУМ_{СЭС}$, $N_{ГАЗ}$, $КИУМ_{ГАЗ}$ – установленная мощность и коэффициент использования установленной мощности солнечной и газовой станций соответственно.

Также электростанции разных типов могут отличаться использованием (или неиспользованием) топлива. Поэтому в расчетах необходимо использовать переменные, характеризующие удельный расход, калорийность и цену топлива.

В итоге расчеты проводятся с использованием двадцати переменных вместо четырнадцати, использованных выше при оценке эффективности солнечной электростанции. Состав переменных представлен в таблице 5.5.

Таблица 5.5

Переменные для сравнения газовой и солнечной электростанций

№	Наименование переменной	Обозначение	Интервал изменения
1	Цена внешней электроэнергии, руб./кВт.час	x_1	6–15
2	Мощность газовой станции, МВт	x_2	5–10
3	Коэффициент использования установленной мощности газовой станции, %	x_3	70–90
4	Потребление электроэнергии на собственные нужды, %	x_4	5–10
5	Удельные капвложения газовой станции, тыс. руб./кВт	x_5	40–80

6	Цена приобретения газа, руб./м3	x_6	7–40
7	Теплотворная способность газа, 100 ккал/ м^3	x_7	80–81
8	Удельный расход топлива газовой станции, 10 г. у. т./кВт час	x_8	25–40
9	Ставка налога на прибыль, %	x_9	20–25
10	Расчетный срок эксплуатации, лет	x_{10}	20–25
11	Численность персонала, чел.	x_{11}	10–125
12	Средняя зарплата, тыс. руб.	x_{12}	80–120
13	Ставка суммарных отчислений на ФОТ, %	x_{13}	30–32
14	Ставка налога на имущество, %	x_{14}	2,2–2,4
15	Коэффициент дисконтирования, %	x_{15}	8–20
16	Ставка НДС, %	x_{16}	18–22
17	Срок сооружения, лет	x_{17}	2–4
18	Коэффициент использования установленной мощности солнечной электростанции, %	x_{18}	11–20
19	Удельные капвложения солнечной станции, тыс. руб./кВт	x_{19}	60–120
20	Удельный расход топлива солнечной станции, 10 г. у. т./кВт час	x_{20}	0
	Конечный эффект, млрд руб.	**y**	-

Так же в таблице 5.5 представлены обозначения переменных и интервалы их изменения для проведения первой итерации моделирования на основе полного факторного эксперимента. На этой итерации предлагается использовать девятнадцать переменных, изменяемых на двух уровнях каждая. Двадцатая переменная для солнечной электростанции имеет детерминированное нулевое значение.

В этом расчете матрица полного факторного эксперимента состоит из 524 288 (2^{19}) планов. По этим планам рассчитаны разницы между экономическими эффектами газовой и солнечной станций (*y*). По этой выборке рассчитана корреляционная матрица. Выше было показано, что при полном факторном эксперименте корреляции между независимыми переменными отсутствуют. Поэтому нет необходимости приводить всю матрицу. В таблице 5.6 приведена строка корреляций *y* со всеми переменными.

Таблица 5.6

Значения корреляций переменных и отклика y

№ переменной	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*	*6*	*7*	*8*	*9*	*10*
Коэффициент корреляции	0,000	0,309	0,140	0,000	-0,063	-0,380	0,003	-0,113	0,008	-0,002

№ переменной	*11*	*12*	*13*	*14*	*15*	*16*	*17*	*18*	*19*	
Коэффициент корреляции	0,000	0,000	0,000	0,005	0,168	0,009	-0,041	-0,467	0,536	

По значениям этих корреляций можно сказать, что переменные с номерами 1, 4, 11, 12 и 13 не влияют на разницу экономической эффективности газовой и солнечной станций. Поэтому в дальнейшем моделировании их следует считать условно постоянными и использовать в расчетах как константы. Далее эти условно постоянные переменные имеют следующие значения: x_1=8; x_4=5; x_{11}=12; x_{12}=90; x_{13}=30,2.

Проведена вторая итерация моделирования разности эффектов при сооружении газовой и солнечной станций, на которой варьировалось 14 переменных на двух уровнях. Матрица состоит из 16 384 строк. По ней выполнен регрессионный анализ и определены значения коэффициентов линейной модели и их значимость, представленные в таблице 5.7.

Таблица 5.7

Коэффициенты линейной модели

Номер переменной	Коэффициенты	P-значение
y-пересечение	0	-
2	0,259146	0
3	0,029216	0
5	-0,00665	3,5E-77
6	-0,04551	0
7	-0,01343	1,26E-05
8	-0,03155	6,3E-235
9	0,006708	0,018243
10	-0,00224	0,430428
14	0,081106	0,249593
15	0,058605	0

16	0,016414	0,020011
17	-0,08584	2,14E-33
18	-0,21724	0
19	0,037394	0

Коэффициенты при десятой и четырнадцатой переменных имеют высокие оценки Р-значения, что говорит о невозможности отрицать нулевую гипотезу о их величине. Эти переменные также необходимо признать условно постоянными и не использовать в модели. В исследовании им присвоены значения: $x_{10}=20$; $x_{14}=2{,}2$. Для следующей итерации остается 12 переменных. Для такого количества переменных алгоритм исследования позволяет варьировать переменные на трех уровнях и повысить качество моделирования. В этом случае будет создана матрица полного факторного эксперимента из 531 441 (3^{12}) плана.

Полученная регрессионная модель имеет вид:

$$y = 0{,}254x_2 + 0{,}029x_3 - 0{,}007x_5 - 0{,}042x_6 - 0{,}012x_7 - 0{,}029x_8 + 0{,}006x_9 + 0{,}057x_{15} + 0{,}015x_{16} - 0{,}077x_{17} - 0{,}215x_{18} + 0{,}035x_{19} \quad (5.45)$$

Коэффициент детерминации (R^2) этой модели имеет значение 0,942 против 0,899 в модели, представленной в таблице 5.7.

Используя модельную зависимость 3.44, возможно быстро ответить на вопрос о предпочтительности солнечной генерации по сравнению с газовой. Например, если:

- газовая станция имеет мощность 10 МВт (x_2), КИУМ 70 % (x_3), удельные капвложения 60 руб./кВт (x_5), удельный расход топлива 300 г у.т./кВт.час (x_8), срок сооружения 2 года (x_{17});
- солнечная станция будет характеризоваться КИУМ 20 % (x_{18}) и удельными капвложениями 90 руб./кВт (x_{19});
- природный газ будет иметь калорийность 8 000 ккал/ м^3 (x_7) и цену 16 руб./м^3 (x_6);
- ставки налога на прибыль 20 % (x_9), на добавленную стоимость 22 % (x_{16});
- применен коэффициент дисконтирования 20 % (x_{15}),

то разность между экономическими эффектами от сооружения газовой и солнечной станции будет составлять 1,934 млрд руб. Положительные значения оценки свидетельствуют о том, что при заданных условиях (значениях переменных) газовые электростанции предпочтительнее. При отрицательных оценках предпочтительнее солнечные. Если значение близко к нулю, то сооружение солнечных и газовых электростанций экономически равнозначно.

Представляет интерес определение граничного значения цены газа, при которой солнечные электростанции сравняются по экономической эффективности с газовыми электростанциями. На основе предложенных алгоритмов получены зависимости разности экономических эффектов газовой и солнечной выработки электроэнергии для нескольких значений мощности сравниваемых станций. На рисунке 5.2 представлены такие зависимости для трех значений мощности газовой станции.

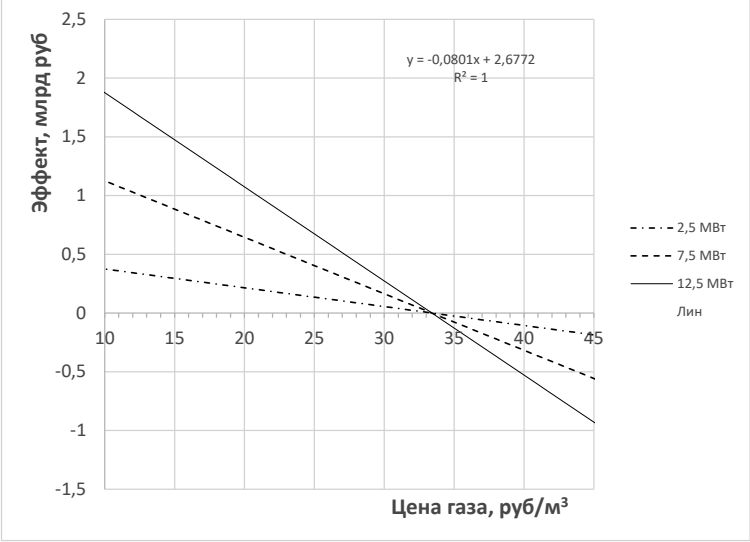


Рис. 5.2. Зависимости разности эффективности газовых и солнечных электростанций.

Граничное значение цены газа равно 33,4 руб./м^3. Этот результат соответствует существующим на сегодняшний день экономическим условиям, а также значениям КИУМ в 20 % для солнечной электростанции и 60 % – для газовой.

Таким образом, многомерный вероятностный анализ посредством полного факторного эксперимента позволяет формировать выборки для оценки функциональных зависимостей и пороговых значений, что расширяет инструментарий сравнительных экономических оценок при выборе типа генерирующего источника при различных исходных данных.

ГЛАВА 6. СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И ЭЛЕМЕНТЫ ФОРМАЛИЗАЦИИ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ПАРАМЕТРОВ ЭКОНОМИКИ РЕГИОНА И ЕГО ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРНОЙ СИСТЕМЫ

6.1. Влияние транспорта на развитие промышленности и экономический рост в российских регионах[47]

Важная роль транспорта заключается в реализации транспортно-экономических связей между хозяйствующими субъектами и территориями, обеспечении национальной безопасности и связанности территорий, повышении эффективности экономической деятельности и качества жизни населения. Как часть инфраструктурного комплекса региона транспортная инфраструктура через реализацию своих важнейших функций играет системообразующую роль по отношению к экономике региона в целом. Именно поэтому особую актуальность приобретает региональный аспект исследования характера и меры ее влияния на экономический рост и индустриальное развитие.

Ряд аспектов влияния транспортной инфраструктуры на экономический рост и промышленное развитие нашли отражение в отечественных и зарубежных исследованиях. Так, Ю. Ю. Пономарев показывает, что развитие транспортной инфраструктуры стимулирует агломерационные эффекты и соответственно рост факторной производительности, хотя это влияние дифференцировано в зависимости от размеров территорий (Пономарев, 2022). О. Ю. Патракеева и В. В. Кулыгин на основе пространственного анализа влияния транспортной и телекоммуникационной инфраструктуры на среднедушевой ВРП и производительность труда в промышленности выявляют, в частности, значимое положительное влияние косвенных эффектов индекса развития железных дорог и телекоммуникационных услуг на экономику и отрицательное влияние прямых эффектов железнодорожной инфраструктуры на промышленное развитие (Патракеева, Кулыгин, 2024). D. Dimitriou и др. исследуют взаимосвязь прямого, косвенного и индуцированного воздействия транспортной инфраструктуры на отраслевое развитие, доходы и занятость (на примере сети автомагистралей и порта) с использованием методологии, основанной на сочетании анализа «затраты –вы-

[47] *Авторы: Е. Д. Игнатьева, А. Е. Серкова.*

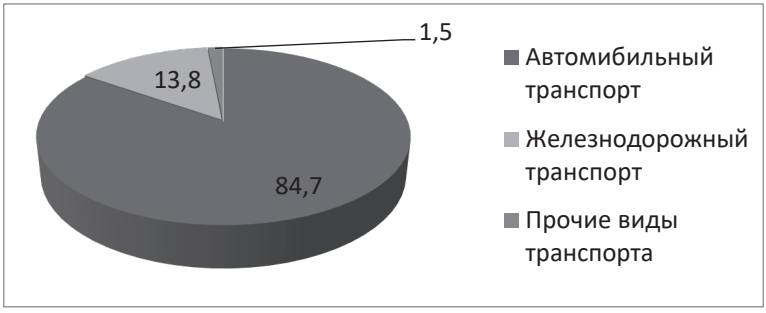
пуск» с ключевыми показателями эффективности территориального и секторального развития (Dimitriou, Sartzetaki, Karagkouni, 2026). I. Park и D. Yi на примере 51 региона США обосновали вывод о непосредственном влиянии транспортной инфраструктуры на экономический рост посредством увеличения инфраструктурного капитала и за счет косвенного воздействия на производительность труда, доступность рынка и объем перевозок (Park, Yi, 2026).

В части исследований уделено внимание рассмотрению транспортной инфраструктуры как одного из видов инфраструктурного капитала и его влияния на развитие региональной и национальной экономики. И. Н. Макаров исследует направления привлечения инвестиций для развития транспортно-энергетической инфраструктуры периферийных и неурбанизированных территорий и предлагает в качестве эффективного механизма систему комплексного долгосрочного развития территорий с применением инструментов государственно-частного партнерства в форме крупных инфраструктурных проектов (Макаров, 2025). J. Albin и др. оценили положительное влияние инвестиций в общественный транспорт на рост экономической активности как на агрегированном уровне (увеличение валового внутреннего продукта), так и на уровне домохозяйств (увеличение дохода) (Albin, Alhassan, Anciaes, 2026). G. Thuku и др., исследуя зависимость между транспортной инфраструктурой и экономическим ростом с использованием метода оценки с распределенным лагом авторегрессии, установили, что инвестиции в автомобильный и железнодорожный транспорт оказывают значительное положительное влияние на ВВП в краткосрочной перспективе, а накопление капитала вместе с трудовыми ресурсами и структурными преобразованиями способствуют поддержанию экономического роста (Thuku, Chakamera, Noleen, 2026). S. Alotaibi и др. по результатам моделирования на основе статических и динамических панельных данных также выявили статистически значимое положительное влияние инвестиций в транспорт с годичным лагом в региональный ВВП (Alotaibi, Quddus, Craig, et.al., 2022).

На необходимость реализации транспортного потенциала России через опережающее развитие транспортного комплекса указывается в Транспортной стратегии РФ на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года, а в качестве стратегической цели развития транспорта в Стратегии определено «удовлетворение потребностей инновационного социально ориентированного развития экономики и общества в качественных транспортных услугах, конкурентоспособных по сравнению

с лучшими мировыми аналогами»[48]. Необходимость создания условий для реализации намеченной цели определяет актуальность задачи опережающего развития транспортной инфраструктуры по отношению к промышленному комплексу и экономике в целом на современном этапе постиндустриального развития. Положение о том, что опережающее развитие транспортной инфраструктуры может стимулировать развитие других видов деятельности, но оказывать сдерживающее воздействие при отставании, послужило исходной гипотезой исследования, что, соответственно, инициировало ряд новых аспектов исследования. Тестирование гипотезы определило необходимость анализа факторов, связанных с развитием и функционированием транспорта, а также источников и ограничений развития промышленного комплекса и экономического роста в российских регионах, обусловленных действием данных факторов (Игнатьева, Серкова, 2025, с. 1802–1803).

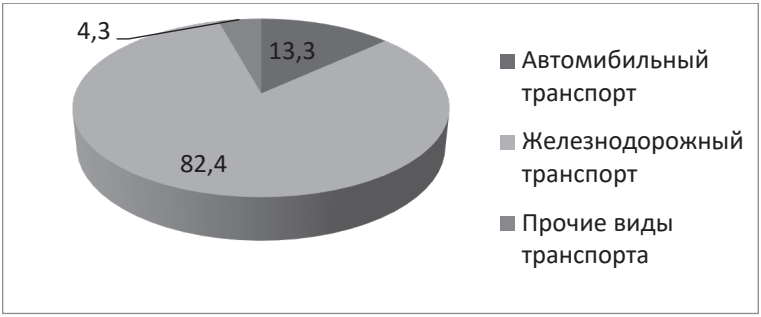
На рисунках 6.1 и 6.2 показана структура грузоперевозок и грузооборота по видам транспорта (без учета трубопроводного транспорта) в целом по России в 2025 году. На автомобильный транспорт приходится около 85 % общего объема грузоперевозок благодаря более высокой оперативности доставки грузов по сравнению с железнодорожным и другими видами транспорта. Наибольший же удельный вес железнодорожного транспорта в общем объеме грузооборота объясняется его главным предназначением для обеспечения доставки грузов по маршрутам дальнего следования как по России, так и для осуществления экспортных поставок. Доли прочих видов транспорта – внутренний водный, морской и воздушный транспорт (транспортная авиация) – в структуре грузоперевозок и грузооборота относительно невелики.



Источник: составлено авторами по данным официального сайта Росстата: Росстат: Официальная статистика – транспорт, 2025 г.

Рис. 6.1. Структура грузоперевозок разными видами транспорта в РФ, в %.

[48] *Транспортная стратегия РФ на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года.*



Источник: составлено авторами по данным официального сайта Росстата: Росстат: Официальная статистика – транспорт, 2025 г.

Рис. 6.2. Структура грузооборота разных видов транспорта в РФ, в %.

Из рассмотрения сравнительной динамики объемов промышленного производства, ВРП и показателей работы автомобильного и железнодорожного транспорта в России можно сделать ряд выводов (табл. 6.1). В целом за рассмотренный период с 2015 по 2023 годы, как видно из значений цепных индексов, рост грузооборота автомобильного транспорта превысил рост обрабатывающих производств и добычи полезных ископаемых, хотя по отдельным годам этого периода наблюдались отставания динамики грузооборота от динамики показателей промышленного развития. Темпы роста перевозок автомобильным транспортом в целом за рассмотренный период значительно отстали от роста обрабатывающих производств. Функционирование железнодорожного транспорта отставало от динамики добычи полезных ископаемых и обрабатывающих производств.

Таблица 6.1

Показатели динамики ВРП, промышленного производства и работы транспорта за период 2015–2023 гг. (индексы физического объема, цепные индексы в %)

Годы	ВРП	Обрабатывающие производства	Добыча полезных ископаемых	Перевозка грузов автотранспортом	Грузооборот автотранспорта	Отправление грузов железнодорожным транспортом
2015	99,4	99,9	101,3	98,9	100,1	96,6
2016	100,8	101,1	102,6	100,7	100,5	99,7
2017	101,9	105,7	101,9	100,1	102,5	104,5
2018	102,8	103,6	103,8	102,6	101,8	101,9

2019	101,6	103,6	103,4	103,4	106,3	99,1
2020	97,8	101,3	93,5	94,2	98,7	97,1
2021	107,3	107,4	104,2	103,3	109,1	103,3
2022	100,3	100,3	101,3	111,3	105,8	96,3
2023	104,7	108,7	99,0	104,5	115,4	99,9
2015–2023	**117,5**	**135,9**	**111,1**	**119,9**	**146,8**	**98,1**

Источник: Регионы России: социально-экономические показатели. 2024: Стат. сб./ Росстат. – М. 2024. Данные офиц. сайта Росстата, в том числе: Официальная статистика, региональная статистика, транспорт; оперативные данные.

Автомобильный транспорт по отношению к росту ВРП за указанный период, как показывает сравнение соответствующих цепных индексов, функционировал с опережением, а железнодорожный транспорт – с отставанием. Важно отметить также, что рост грузооборота автомобильного транспорта за указанный период был значительно выше, чем рост грузоперевозок.

В качества инструментария для тестирования исходной гипотезы были выбраны эконометрические модели, отражающие влияние транспортной инфраструктуры (на примере автомобильного транспорта) на развитие промышленности как важнейшего потребителя услуг транспортной отрасли и на экономический рост в российских регионах. В соответствии с этим строились варианты моделей для двух зависимых переменных, а именно – объема промышленного производства (объем отгруженной продукции собственного производства, выполненных работ и услуг собственными силами) и ВРП на душу населения. Объясняющими переменными в каждом из вариантов послужили индикаторы, характеризующие уровни обеспеченности российских регионов транспортной инфраструктурой и услугами автомобильного транспорта, а также объем инвестиций в основной капитал на душу населения и объем телекоммуникационных услуг – также на душу населения. Выбор автомобильного транспорта как важнейшей составляющей транспортного комплекса российских регионов для построения моделей определялся его особо важным местом в структуре транспортных услуг, как было показано выше.

Из ряда построенных в процессе исследования эконометрических моделей по лучшим значениям статистических критериев были выбраны четыре модели, основанные на следующих методах: 1) метод оценки средней по совокупности – Population-Averaged Estimator (**PA**);

2) метод оценки с фиксированными эффектами – Fixed Effects or Within Estimator (**FE**); 3) метод оценки первых разностей – First-Differences Estimator (**DiD**); 4) метод оценки со случайными эффектами – Random Effects Estimator (**RE**). Модели строились на основе панельных данных по 83 регионам – субъектам РФ за период 2012–2024 годы.[49] Результаты моделирования послужили основой для оценки меры и направленности влияния автомобильного транспорта на развитие промышленного комплекса и экономический рост в российских регионах.

Как видно из таблицы 6.2, по всем четырем моделям показатель перевозки грузов автомобильным транспортом оценивается как статистически значимая переменная со знаком «минус», что подтверждает отрицательное воздействие данного фактора на промышленное производство. Отставание динамики перевозки грузов автомобильным транспортом от динамики обрабатывающих производств за ряд лет уже отмечалось выше (табл. 6.1). Поскольку индустриальное развитие связано, прежде всего, с развитием обрабатывающих производств, то отмеченное отставание может рассматриваться как возможное ограничение для данного развития.

Таблица 6.2

Оценка влияния автомобильного транспорта и телекоммуникаций на промышленное производство в российских регионах

Переменные	**Модели**			
Зависимая переменная:	PA	FE	DiD	RE
Логарифм объема промышленного производства				
Независимые переменные:				
Логарифм перевозок грузов автотранспортом, млн т	-0,182***	-0,176***	-0,0931***	-0,179***
Стандартная ошибка	0,0224	0,0222	0,0179	0,0227

[49] *Источники информации: Регионы России: социально-экономические показатели. 2025: Стат. сб./ Росстат. – М. 2025. Источники информации: Регионы России: социально-экономические показатели. 2024: Стат. сб./ Росстат. – М. 2024. Регионы России: социально-экономические показатели: Стат. сборники/Росстат за 2012–2023 гг. Данные офиц. сайта Росстата, в том числе: Официальная статистика, транспорт; информация для ведения мониторинга социально-экономического положения субъектов Российской Федерации.*

Логарифм грузооборота автотранспорта, млн тонно-км	0,137***	0,124***	0,0930***	0,157***
Стандартная ошибка	0,0208	0,0204	0,018	0,0212
Логарифм плотности автодорог общего пользования с твердым покрытием, км путей на 1000 км^2 территории	0,362***	0,548***	0,129***	0,198***
Стандартная ошибка	0,0377	0,0437	0,0431	0,0313
Логарифм инвестиций на душу населения, руб.	0,539***	0,498***	0,236***	0,582***
Стандартная ошибка	0,0234	0,0234	0,0232	0,0236
Логарифм объема телекоммуникационных услуг на душу населения, *руб.*	0,725***	0,697***	0,706***	0,739***
Стандартная ошибка	0,0411	0,0408	0,0387	0,0418
Константа	-0,494**	-1,042***		-0,0816
Стандартная ошибка	0,214	0,198		0,179
Число регионов	83	83	83	83
Уровни значимости переменных: *** p <0.01, ** p <0.05, * p <0.1				

Источник: результаты эконометрического моделирования, проведенного авторами.

В отличие от показателя грузоперевозок, показатель грузооборота автомобильного транспорта, оценивается как статистически значимый фактор со знаком «плюс», что характеризует его положительное влияние на промышленный комплекс. Поскольку данный показатель отражает не только объем грузоперевозок, но и расстояния их перемещения, то его положительное влияние можно объяснить в значительной мере расширением товарообмена между территориями как одного из важных приоритетов экономического развития на современном этапе. Плотность автомобильных дорог с твердым покрытием как важный фактор в обеспечении перевозок промышленных грузов также оценивается как статистически значимый показатель по всем четырем построенным моделям.

Перевозки грузов автомобильным транспортом оказали статистически значимое, но отрицательное воздействие не только на промышленное производство, но и на экономический рост в целом (табл. 6.3). При отрицательном воздействии на среднедушевой ВРП данный фактор может рассматриваться как возможное ограничение экономического роста, в то время как значимое со знаком «плюс» влияние гру-

зооборота автотранспорта на среднедушевой ВРП позволяет рассматривать данный фактор в качестве возможного источника. Показатель логарифма плотности автодорог с твердым покрытием, как и в случае влияния на промышленное производство, оказался положительным статистически значимым фактором – с однопроцентным уровнем значимости по моделям **PA**, **FE** и **DiD**, с пятипроцентным – по модели **RE**.

Таблица 6.3

Оценка влияния автомобильного транспорта и телекоммуникаций на экономический рост в российских регионах

Переменные	**Модели**			
Зависимая переменная:	**PA**	**FE**	**DiD**	**RE**
Логарифм среднедушевого ВРП				
Независимые переменные:				
Логарифм перевозок грузов автотранспортом, млн т	-0,261***	-0,248***	-0,0983***	-0,246***
Стандартная ошибка	0,0189	0,0191	0,014	0,0184
Логарифм грузооборота автотранспорта, млн тонно-км	0,189***	0,181***	0,100***	0,216***
Стандартная ошибка	0,0178	0,0178	0,0141	0,0181
Логарифм плотности автодорог общего пользования с твердым покрытием, км путей на 1000 км2 территории	0,438***	0,660***	0,228***	0,0342**
Стандартная ошибка	0,032	0,0382	0,0339	0,0155
Логарифм инвестиций на душу населения, руб.	0,578***	0,534***	0,253***	0,695***
Стандартная ошибка	0,02	0,0203	0,0179	0,0194
Логарифм объема телекоммуникационных услуг на душу населения, руб.	0,400***	0,358***	0,115***	0,426***
Стандартная ошибка	0,0352	0,0355	0,0303	0,0345
Константа	6,768***	6,016***		7,882***
Стандартная ошибка	0,18	0,172		0,113
Число регионов	83	83	83	83
Уровни значимости переменных: *** p <0.01, ** p <0.05, * p <0.1				

Источник: результаты эконометрического моделирования, проведенного авторами.

По результатам эконометрического анализа в числе факторов с высокой статистической значимостью, оказавших положительное влияние как на среднедушевой ВРП, так и на промышленное развитие, – объем телекоммуникационных услуг на душу населения. Положительное влияние телекоммуникаций на среднедушевой ВРП и производительность труда в промышленности О. Ю. Патракеева и В. В. Кулыгин объясняют «…высокой эффективностью сектора «деятельность в области информации и связи» (код ОКВЭД 2 – J) относительно сектора «транспортировки и хранения» (код ОКВЭД 2 – H)», отмечая при этом, что прямые эффекты от телекоммуникационных услуг выше для промышленности, чем в целом для экономики страны (Патракеева, Кулыгин, 2024, с. 649). В то же время следует отметить более высокую степень износа основных фондов в области информации и связи (57,3 %) по сравнению с транспортировкой и хранением (37,9 %)[50]. Обновление основных фондов – необходимое условие обеспечения устойчивости и повышения эффективности функционирования данного сектора в перспективе. Одна из основных причин положительного влияния телекоммуникаций на экономику страны и ее регионов заключается в том, что они являются необходимым условием для индустриального развития за счет внедрения цифровых технологий, улучшающих взаимодействие потребителей услуг транспорта и повышающих эффективность функционирования транспортной отрасли.

Статистически значимым фактором, оказывающим положительное влияние на промышленное развитие и экономический рост по всем выбранным моделям, выступают инвестиции в основной капитал. Повышение эффективности функционирования транспорта предполагает обновление основных фондов, сокращение межрегиональных диспропорций в развитии транспортной инфраструктуры и обеспеченности услугами транспортной отрасли, что может быть достигнуто посредством привлечения инвестиций для реализации крупномасштабных инфраструктурных проектов.

Результаты проведенного исследования подтверждают тот факт, что оценки влияния показателей обеспеченности регионов услугами транспорта и уровней развития транспортной инфраструктуры на промышленный комплекс и экономический рост в российских регионах согласуются с рассмотрением динамики указанных показателей за период

[50] *Регионы России: социально-экономические показатели. 2025: Стат. сб./ Росстат. – М. 2025. С. 479.*

времени с 2015 по 2023 годы. В целом, в соответствии с ранее сформулированными исходными положениями, можно сделать вывод о том, что полученные в результате эконометрического моделирования (на примере автомобильного транспорта) положительные оценки влияния инфраструктурных факторов, отражающие источники индустриального развития и экономического роста, и отрицательные, отражающие соответствующие ограничения, сказываются и на динамике экономического развития.

Следует также отметить, что развитие и функционирование транспортной инфраструктуры, в свою очередь, подчинено влиянию различного рода факторов. В ряде публикаций в числе этих факторов выделяются пространственные и природные факторы, близость к центрам индустрии, экономическая специализация, транзитное и пограничное расположение, плотность и мобильность населения, качество транспортных коммуникаций, природно-климатические условия, расширение межотраслевых связей и экспорта и другие факторы (Фаткуллин, Трофимов, 2010, с. 268; Сандакова, 2014, с. 21–22; Xun, Chase, Peng, 2021). В числе данных факторов необходимо выделить также уровень технологического развития транспортной инфраструктуры, внедрение инноваций и инвестиционную активность, интенсивность грузопотоков, обусловленных экономической деятельностью.

6.2. Региональная промышленность под влиянием сырьевых рынков: изменяющаяся во времени реакция объема выпуска обрабатывающего сектора Свердловской области на мировые ценовые шоки [51]

Введением дополнительных внешних факторов формирования ситуации в региональном производственном комплексе в данном случае делается попытка разнообразить эконометрический инструментарий моделирования зависимостей.

Свердловская область традиционно является одним из ключевых индустриальных центров России, где обрабатывающая промышленность играет системообразующую роль в региональной экономике. Будучи тесно связанной с металлургическим комплексом, обрабатывающая промышленность испытывает значительное влияние со стороны сырьевых рынков, поскольку металлы (прежде всего медь и сталь) выступают важнейшими материальными ресурсами для машиностро-

[51] *Автор: Л. А. Серков.*

ения, металлообработки и других секторов. В условиях глобальной волатильности сырьевых цен, геополитической нестабильности и структурных сдвигов в мировой экономике понимание того, как внешние ценовые шоки транслируются в динамику регионального обрабатывающего производства, становится критически важным для обоснования промышленной политики на уровне субъекта Российской Федерации.

Особый интерес представляет анализ трансмиссионных механизмов, связывающих мировые цены на ключевые промышленные металлы (медь и сталь), фондовый индекс металлургических компаний и объем выпуска в обрабатывающей промышленности Свердловской области. Цены на медь и сталь, котируемые на Лондонской бирже металлов, выступают внешними шоками предложения, которые непосредственно определяют издержки и инвестиционные возможности предприятий обрабатывающего сектора. Индекс Мосбиржи металлов и добычи (MOEXMM), в свою очередь, отражает агрегированные ожидания рынка относительно будущих денежных потоков металлургических компаний, реагируя на изменение сырьевых цен мгновенно — опережая реальные производственные решения. Наконец, объемы производства в обрабатывающей промышленности позволяют оценить, как ценовые и финансовые импульсы в конечном счете преобразуются в динамику реального сектора региональной экономики.

Традиционные эконометрические подходы, такие как классическая векторная авторегрессия (VAR) с постоянными параметрами, предполагают неизменность структуры взаимосвязей между ценами на сырье, финансовыми индикаторами и выпуском промышленности во времени. Однако экономическая реальность последних полутора десятилетий – глобальный финансовый кризис 2008–2009 гг., падение цен на сырье в 2014–2016 гг., пандемия COVID-19, санкционное давление и логистическая перестройка 2022–2023 гг. – демонстрирует, что параметры этих взаимосвязей могут существенно изменяться. Игнорирование временной изменчивости приводит к смещенным оценкам и неверным выводам о силе и направленности эффектов. В связи с этим возникает необходимость использования моделей, способных улавливать временную изменчивость как коэффициентов регрессии, так и волатильности случайных шоков.

Цель исследования заключается в количественной оценке, изменяющейся во времени реакции, обрабатывающей промышленности Свердловской области на шоки мировых цен на медь и сталь с учетом

финансового канала (индекса металлов и добычи) на основе модели векторной авторегрессии с изменяющимися параметрами и стохастической дисперсией (TVP-VAR-SV модели).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Построить TVP-VAR-SV модель для трех переменных (цена на металл → индекс металлов и добычи → выпуск в обрабатывающей промышленности) с рекурсивной идентификацией структурных шоков.

2. Проанализировать временную динамику импульсных откликов (IRF) выпуска обрабатывающей промышленности на положительные шоки цен на медь и сталь, выявив периоды усиления и ослабления трансмиссии.

3. Сравнить чувствительность обрабатывающей промышленности к шокам цен на медь и на сталь, определив, какой из ценовых факторов оказывает более сильное и устойчивое влияние.

4. Выявить периоды нарушения трансмиссионного канала (цена → индекс металлов → выпуск) и определить их связь с периодами турбулентности в мировой и отечественной экономике (кризисы, пандемия, санкции).

5. На основе разложения дисперсии ошибок прогноза (FEVD) оценить относительный вклад каждого структурного шока (ценовой, финансовый, собственно промышленный) в объяснение колебаний выпуска обрабатывающей промышленности.

Логично исходить из гипотезы о том, что реакция обрабатывающей промышленности Свердловской области на шоки мировых цен на медь и сталь не является постоянной во времени, а ее сила и направленность существенно изменяются под воздействием внешних экономических и геополитических факторов. При этом предполагается, что: а) шоки цен на медь оказывают более сильное влияние на региональный обрабатывающий сектор по сравнению с шоками цен на сталь; б) фондовый индекс металлов и добычи выступает значимым опережающим каналом трансмиссии ценовых импульсов; в) существуют периоды (например, в условиях пандемии COVID-19), когда традиционные каналы передачи шоков временно нарушаются.

Объектом исследования выступает обрабатывающая промышленность Свердловской области. Предметом исследования являются количественные характеристики и временная изменчивость реакции обрабатывающего сектора на ценовые шоки металлов, опосредованные финансовым каналом (индекс металлов и добычи).

Основным инструментом исследования является TVP-VAR-SV модель, позволяющая оценивать изменяющиеся во времени коэффициенты и стохастическую волатильность. Идентификация структурных шоков осуществляется рекурсивно с упорядочением переменных от наиболее экзогенных к наиболее эндогенным: цена на металл → индекс металлов и добычи → выпуск обрабатывающей промышленности.

Фундаментальной работой, заложившей основу для моделей с изменяющимися во времени параметрами и стохастической волатильностью, является статья Г. Примицери (Primiceri, 2005). В этом исследовании автор моделирует денежно-кредитную политику и поведение частного сектора экономики США как структурную VAR с изменяющимися во времени коэффициентами и ковариационной матрицей инноваций, предлагая эффективный байесовский алгоритм для оценивания. Примечательно, что автор приходит к выводу о незначительном влиянии систематических изменений в монетарной политике на реальный сектор, тогда как экзогенные шоки играют более важную роль в объяснении эпизодов высокой инфляции и безработицы.

Существенный вклад в распространение и популяризацию методологии TVP-VAR-SV внесла работа Й. Накайима (Nakajima, 2011), в которой представлен всесторонний обзор методов оценивания моделей и эмпирических приложений этого подхода. Автор демонстрирует, что включение стохастической волатильности значительно улучшает точность оценивания моделей по сравнению с оценками, предполагающими гомоскедастичность, и на примере японских макроэкономических данных показывает способность модели улавливать структурные изменения в динамических взаимосвязях.

В серии работ (Koop & Potte, 2007; Koop et al., 2009), посвященных байесовскому оцениванию VAR с изменяющимися параметрами, уделено особое внимание проблеме избыточной параметризации и методам ее преодоления. В работах (Lubik & Schorfheide, 2004; Lubik & Matthes, 2015) предложено пошаговое руководство по спецификации и оцениванию TVP-VAR с использованием байесовских методов Гиббса.

Методы байесовского сравнения моделей для TVP-VAR-SV на основе интегрированного правдоподобия и информационного критерия Deviance Information Criterion (DIC) предложены в работе (Chan & Eisenstat, 2018). Их эмпирический анализ на данных США и Австралии показал, что основное преимущество TVP-VAR-SV перед стандартной VAR с постоянными коэффициентами обеспечивается именно учетом стохастической волатильности, а не изменчивостью коэффициентов как

таковой. В продолжении этой работы эти же авторы предложили класс «гибридных» TVP-VAR-SV, в которых некоторые уравнения имеют изменяющиеся параметры, а другие — постоянные, что позволяет более экономно моделировать временную изменчивость (Chan, Eisenstat, 2018b).

Подход на основе TVP-VAR-SV модели для анализа динамической взаимосвязи между рынками энергоносителей, драгоценных и промышленных металлов, а также сельскохозяйственных товаров обнаружил, что энергетические рынки играют центральную роль в передаче шоков между товарными рынками (Gong & Xu, 2022).

Ряд исследований посвящен анализу ценовых шоков вдоль производственных цепочек. Анализ с помощью TVP-SVAR-SV модели влияния шоков цен на нефть на выпуск на разных стадиях нефтяной промышленности Китая показал, что эффекты существенно варьируются во времени, а наиболее значимым фактором выступает рост цен, обусловленный шоками спроса на нефть (Kang et al., 2015). Систематический анализ проблемы упорядочения переменных в TVP-VAR-SV модели показал, что упорядочение не влияет на точечные прогнозы, но существенно сказывается на стандартных отклонениях прогнозных распределений и длине прогнозных интервалов, причем наилучшее упорядочение для одной переменной не обязательно оптимально для другой (Amir-Ahmadi et al., 2020; Arias et al., 2023).

В контексте геополитических шоков применение TVP-VAR-SV модели для анализа взаимосвязи европейских рынков природного газа в период 2021–2022 гг., показало, что общая связанность рынков резко снизилась, причем это падение было почти полностью обусловлено ценовой дивергенцией на рынке Великобритании (Szafranek et al., 2023).

Российская экономическая литература традиционно уделяет особое внимание анализу межотраслевых взаимодействий в обрабатывающей промышленности. В статье О. В. Почукаевой (Почукаева, 2006) автор рассмотрела перспективы развития инвестиционных отраслей машиностроения при усилении инновационной активности в металлургическом комплексе, приводя прогнозные оценки эффективности межотраслевого взаимодействия. А. В. Соколов, В. А. Бажанов (Соколов, Бажанов, 2024) оценили возможные параметры взаимодействия машиностроения и металлургии в экономике России в перспективе до 2035 года, используя эконометрические методы для выявления характера связей между отраслями. М. Г. Шилова, Е. В. Нежникова (Шилова, Нежникова, 2024) проанализировали современное состояние и перспективы развития металлургической промышленности России в условиях

быстро меняющейся экономической и геополитической среды, уделяя особое внимание взаимодействию металлургического комплекса с машиностроением, строительством и нефтегазовым сектором. С. П. Петров, М. А. Печенская-Полищук (Петров, Печенская-Полищук, 2025) исследовали пространственную реконфигурацию потоков в цепочках поставок российской черной металлургии под влиянием геополитических шоков, рассматривая Урал как один из ключевых регионов производства и потребления металлургической продукции.

Сравнительный анализ металлургических регионов России, включая Свердловскую область (Pravdina et al., 2024), выявил значительные различия в адаптационных стратегиях: Свердловская область сохраняет металлургическую специализацию, тогда как другие регионы смещаются в сторону менее технологичных секторов или добычи полезных ископаемых. Перспективной специализацией для Свердловской области названо машиностроение.

Вместе с тем исследования, непосредственно посвященные анализу временной динамики зависимости объема выпуска в обрабатывающей промышленности от цен на медь и сталь, практически отсутствуют. Имеющиеся работы в этой области носят в основном качественный или прогнозный характер и не используют современный инструментарий моделей с изменяющимися параметрами. Настоящее исследование призвано восполнить этот пробел, впервые применяя подход с использованием TVP-VAR-SV моделей для анализа трансмиссии ценовых и финансовых шоков в обрабатывающей промышленности Свердловской области.

Основой TVP–VAR-SV модели является расширенная модель векторной авторегрессии (VAR) в приведенной форме, предложенная С. А. Симс (Sims, 1980):

$$y_t = c_t + B_{1,t} y_{t-1} + \cdots + B_{s,t} y_{t-s} + u_t \qquad (6.1)$$

где y_t является $k \times 1$ вектором наблюдаемых переменных (k – число переменных), t – время ($t = s + 1, \ldots, n$), s – временной лаг, c_t представляет собой $k \times 1$ вектор независимых от эндогенных переменных коэффициентов, $B_{1,t}, \ldots, B_{s,t}$ являются $k \times k$ матрицами изменяющихся во времени коэффициентов. Случайные ошибки прогноза u_t являются $k \times 1$ векторами коррелированных шоков с распределением $u_t \sim N(0, \Omega_t)$, где ковариационная матрица Ω_t является недиагональной. Следуя работам (Primiceri, 2005; Lütkepohl, 2007) и предполагая рекурсивную идентификацию шоков, можно преобразовать уравнение (6.1) в уравнение приведенной формы с ортогональными шоками ε_t:

$$y_t = c_t + B_{1,t} y_{t-1} + \cdots + B_{s,t} y_{t-s} + A_t^{-1} \Sigma_t \varepsilon_t \quad \varepsilon_t \sim N(0, I_k) \quad (6.2)$$

где A_t является нижней треугольной матрицей с единицами на диагонали, а $\sum_t$ – диагональная матрица со стандартными отклонениями на диагонали. Объединяя все коэффициенты правой части уравнения 6.2 в единый вектор B_t, можно записать это уравнение в компактной форме:

$$y_t = X_t' B_t + A_t^{-1} \Sigma_t \varepsilon_t \quad (6.3)$$

$$X_t' = I_k \otimes [1, y_{t-1}', \ldots, y_{t-s}'],$$

где символ $\otimes$ означает произведение Кронекера, I_k единичная матрица.

Стратегия моделирования заключается в оценке и анализе изменения коэффициентов в уравнении (6.3) вместо (6.1). Заметим, что существует взаимно однозначное соответствие между уравнениями (6.1) и (6.3), которое полностью оправдывает этот подход.

Пусть α_t — вектор ненулевых и неединичных элементов матрицы A_t (построчно) и σ_t — вектор диагональных элементов матрицы Σ_t. Тогда динамика изменяющихся во времени параметров модели (3) задается следующим образом (Primiceri, 2005):

$$B_t = B_{t-1} + \nu_t, \quad (6.4)$$

$$\alpha_t = \alpha_{t-1} + \xi_t, \quad (6.5)$$

$$\log \sigma_t = \log \sigma_{t-1} + \eta_t \quad (6.6)$$

В уравнениях (6.4) – (6.6) элементы вектора B_t моделируются как случайные блуждания (как и свободные элементы матрицы A_t). Стандартные отклонения σ_t предполагаются эволюционирующими как геометрические случайные блуждания, принадлежащие к классу моделей, известных как стохастическая волатильность. Предполагается, что все случайные шоки в уравнениях (6.4) – (6.6) подчиняются совместному нормальному распределению. Отметим, что именно изменение стандартных отклонений σ_t матрицы Σ_t приводит к классу TVP–VAR–SV моделей с изменяющимися параметрами и стохастической волатильностью.

Оценка параметров осуществляется в байесовском подходе с использованием метода Гиббса, являющегося разновидностью алгоритма Монте-Карло по схеме марковской цепи (MCMC). На каждом шаге итераций (сэмплирования) траектории коэффициентов B_t, элементов матрицы A_t и логарифмов волатильностей σ_t оцениваются с помощью

алгоритма сглаживания Дарбина и Купмана (Durbin, Koopman, 2001; Durbin, Koopman, 2002). Для итогового апостериорного вывода вычисляются медианы и 68 % доверительные интервалы, границы которого соответствуют 16-й и 84-й процентилям[52], на основе 50 000 итераций. В байесовской оценке TVP-VAR-SV модели выбор априорных распределений основывается на комбинации слабо информативных и эмпирически калиброванных гиперпараметров (Sims, Zha, 1998; Sims, 2000).

Важное значение при оценке параметров TVP–VAR-SV модели имеет идентификация структурных шоков (Sims, 1980; Rubio-Ramírez, 2010). В предлагаемой работе для идентификации структурных шоков используется рекурсивная схема, основанная на упорядочении переменных от наиболее экзогенных к наиболее эндогенным, что позволяет наложить ограничения на матрицу мгновенных связей и выделить структурные возмущения.

В качестве внешних факторов в работе выбраны цены на медь и стальную арматуру, так как они являются, во-первых, ключевыми ценообразующими факторами для экспортно ориентированной экономики Свердловской области, а во-вторых, металлургическая отрасль служит базовой основой обрабатывающей промышленности. Уральская горно-металлургическая компания (УГМК) является одним из крупнейших производителей меди в России. К тому же Свердловская область считается центром производства сортового проката (арматуры, катанки). Цена на арматуру является важнейшим индикатором строительного цикла и инвестиционного спроса, что напрямую влияет на загрузку мощностей металлургов. Цены на медь и стальную арматуру (котируемые на Лондонской бирже металлов) служат внешними шоками предложения, которые напрямую определяют выручку, прибыль и инвестиционные возможности региональных металлургов.

Связующим каналом между внешними ценовыми шоками и реальной экономикой, отражая ожидания и склонность к риску инвесторов, является индекс Мосбиржи металлов и добычи (MOEXMM), отражающий стоимость акций ведущих металлургических компаний. Этот показатель характеризует не просто текущую стоимость акций. Это агрегированный взгляд рынка на будущие денежные потоки металлургических компаний и, следовательно, всей обрабатывающей промышленности в целом.

В качестве переменной реального сектора экономики выбран объем производства в обрабатывающей промышленности Свердловской

[52] *Линии, соответствующие 16-й и 84-й процентилям в нормальном распределении, обозначают границы одного стандартного отклонения от среднего значения.*

области. Обрабатывающая промышленность является основой экономики региона, обеспечивая более половины промышленного производства и формируя его индустриальный каркас. Металлургия, как ключевой поставщик материалов, оказывает непосредственное влияние на обрабатывающую промышленность через два основных канала. Во-первых, удорожание металла ведет к росту издержек для предприятий-переработчиков, что может сдерживать их производственную активность. Во-вторых, рост выпуска в металлургии стимулирует инвестиционный спрос на продукцию обрабатывающих отраслей (оборудование, станки, транспортные средства). Динамика обрабатывающей промышленности показывает, насколько сильно внешние ценовые и финансовые шоки, проходя через металлургический сектор, передаются в смежные производства. Поэтому анализ с использованием TVP-VAR-SV позволит определить, какой из этих каналов — издержек или инвестиционного спроса – доминирует в разные периоды времени.

В исследовании используются месячные данные цен на медь, стальную арматуру (в дальнейшем просто сталь) и индекс Мосбиржи металлов и добычи с 2010 по 2023 годы[53]. Эти данные получены на сайте ведущего российского информационного агентства Cbonds[54]. Следует подчеркнуть, что цены на металлы в долларах переводились в цены в рублях по среднему за месяц значению обменного курса, так что фактически они отражают выручку предприятий – экспортеров вследствие курсовой разницы рубля к доллару. Но для сокращений в дальнейшем будем использовать фразу «цена металлов». Месячные данные объемов промышленного производства в обрабатывающей промышленности в Свердловской области с 2010 по 2023 годы получены на официальном сайте Росстата[55]. Все данные рассчитывались в постоянных ценах 2010 года и затем логарифмировались. Окончательно, получая разницу между логарифмами показателей за текущий и предыдущий годы, рассчитывались среднегодовые темпы роста. Анализируемые показатели и их обозначение приведены в таблице 6.4.

---

[53] Цены в долларах переводились в цены в рублях по среднему за месяц значению обменного курса.

[54] Cbonds. URL:https://cbonds.ru/indexes/MOEXMM (дата обращения: 12.02.2026).

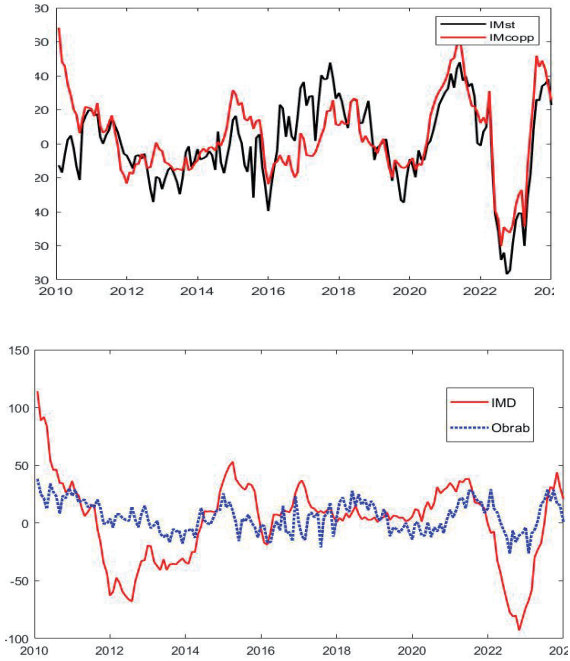
[55] Росстат России. URL:https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (дата обращения: 12.02.2026).

Таблица 6.4

Показатели, используемые при анализе влияния ценовых и финансовых факторов на обрабатывающую промышленность в Свердловской области

Переменная	Обозначение
Темпы роста цен на медь, %	IMcopp
Темпы роста цен на стальную арматуру, %	IMst
Темпы роста индекса Мосбиржи металлов и добычи, %	IMD
Темпы роста объема производства в обрабатывающей промышленности, %	Obrab

Источник: составлено автором.



Источник: составлено автором.

Рис. 6.3. Индекс Мосбиржи металлов и добычи (IMD) и объема промышленного производства в обрабатывающей промышленности (Obrab) Свердловской области. Слева – временные ряды годовых темпов роста (%) цен на медь (IMcopp) и на сталь (IMst).
Справа – временные ряды годовых темпов роста (%).

На рисунке 6.3 показаны графики исследуемых временных рядов с ярко выраженной волатильностью всех исследуемых переменных. Особенно это проявляется в динамике темпов роста объема производства в обрабатывающей промышленности. При этом пики темпов роста мировых биржевых цен на медь и стальную арматуру (в дальнейшем – просто цен на медь и сталь) приблизительно совпадают между собой и совпадают с пиками темпов роста индекса металлов и объема производства в металлургии в Свердловской области.

Использование векторных авторегрессий в качестве инструмента моделирования требует наличия стационарности временных рядов. Для оценки стационарности в работе применялись ADF-тест (расширенный тест Дики – Фуллера) и PP-тест (тест Филлипса – Перрона). Оба теста отклонили гипотезу о статистической значимости наличия единичного корня во всех временных рядах исследуемых переменных.

Следующим шагом является выбор наилучшей спецификации модели векторной авторегрессии, соответствующей выборочным данным. В таблице 6.5 представлены среднее значение и стандартное отклонение интегрированной функции правдоподобия для сравниваемых моделей с ценовым фактором в виде цен на медь. Оценка интегрированной функции правдоподобия проводилась по методу, предложенному в работе (Chan, Eisenstat, 2018). Наилучшей спецификации соответствуют модели с наибольшим логарифмом максимального правдоподобия. Анализ результатов сравнения моделей различной спецификации показывает, что TVP-VAR-SV модель с одним лагом обеспечивает наилучшее соответствие внутривыборочным данным. Другими словами, результаты сравнения моделей показывают, что стохастическая волатильность является важной особенностью моделирования данных. С экономической точки зрения это означает, что кластеризация волатильности является ключевой особенностью исследуемых переменных. Аналогичный результат справедлив и для сравниваемых моделей с ценовым фактором в виде цен на сталь. Поэтому он не приводится.

Таблица 6.5

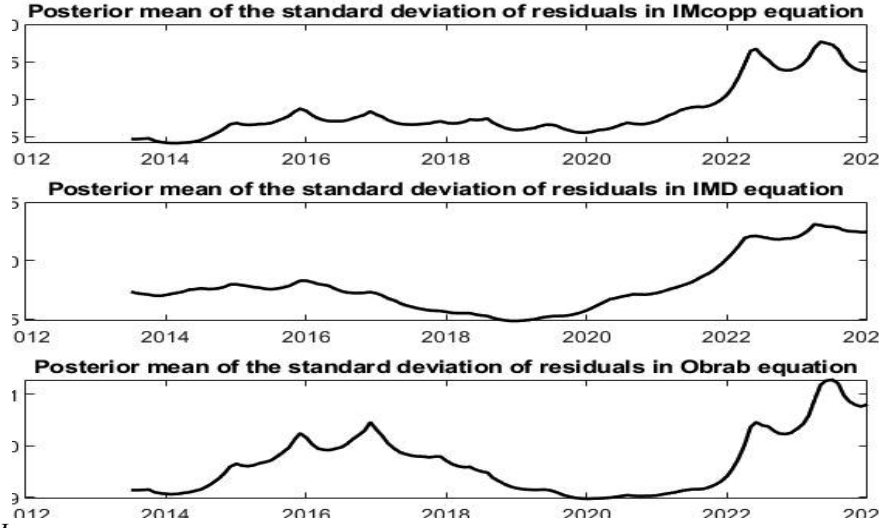
Логарифм функции правдоподобия для моделей векторной авторегрессии с различной спецификацией

p (порядок лага)	VAR	TVP-VAR	TVP-VAR-SV
p=1	-602.40 (0.01)	-591.10 (0.11)	**-583.30** (0.08)
p=2	-708.43 (0.01)	-701.11 (0.14)	-678.23 (0.17)
p=4	-723.21 (0.06)	-711.21 (0.34)	-701.28 (0.54)
p=8	-811.16 (0.15)	-801.41 (0.46)	-782.81 (0.56)
p=12	-903.28 (0.14)	-900.32 (0.43)	-867.12 (0.75)

Источник: составлено автором.
Примечание 1: Результаты в таблице приведены для моделей с ценовым фактором в виде цен на медь.
Примечание 2: Полужирным шрифтом выделен логарифм функции правдоподобия для лучшей спецификации модели.

На рисунке 6.4 показана временная зависимость апостериорного среднего значения стандартных отклонений остатков в модели TVP-VAR-SV с ценовым фактором в виде цен на медь[56], подтверждающая кластеризацию остатков исследуемых переменных. Особенно кластеризация для экономики Свердловской области заметна в периоды 2014–2018 годов и после 2022 года для всех переменных. Эти периоды связаны с наложением санкций на экономику России со стороны недружественных стран. Для мировой экономики период 2015–2016 годов характеризуется резким ростом цен на сталь и медь (рис. 6.3), вызванным замедлением темпов роста экономики Китая. Приведенные результаты подтверждают правильность выбора спецификации анализируемой модели в виде TVP-VAR-SV, то есть модели со стохастической дисперсией.

[56] *Аналогичная зависимость для цен на сталь выглядит примерно также и поэтому не приводится.*



Источник: составлено автором по результатам моделирования.

Рис. 6.4. Апостериорное среднее значение стандартного отклонения остатков в моделях TVP-VAR-SV с ценовым фактором в виде цен на медь.

Одним из самых наглядных и содержательных инструментов для интерпретации результатов векторной авторегрессии независимо от ее спецификации являются функции импульсного отклика (IRF). IRF показывают, как одна переменная в системе связанных уравнений реагирует во времени на неожиданный шок (импульс) в другой переменной, при условии, что все остальные факторы остаются неизменными. IRF помогают визуализировать динамические взаимосвязи между переменными, направление, величину и продолжительность эффекта воздействия одной переменной на отклики в других переменных. Для того чтобы IRF имели содержательную интерпретацию, необходимо идентифицировать структурные шоки. Для этого накладываются ограничения, которые позволяют очистить шоки от взаимного влияния. Как уже отмечалось выше, в данном исследовании применяется рекурсивная идентификация, предполагающая цепочку причинно-следственных связей между переменными в определенный момент времени. В рамках нашей TVP-VAR-SV модели переменные располагаются следующим образом: темпы роста цен на металлы, темпы роста индекса металлов и добычи, темпы роста объема производства в обрабатывающей промышленности. Такой порядок переменных объясняется тем, что

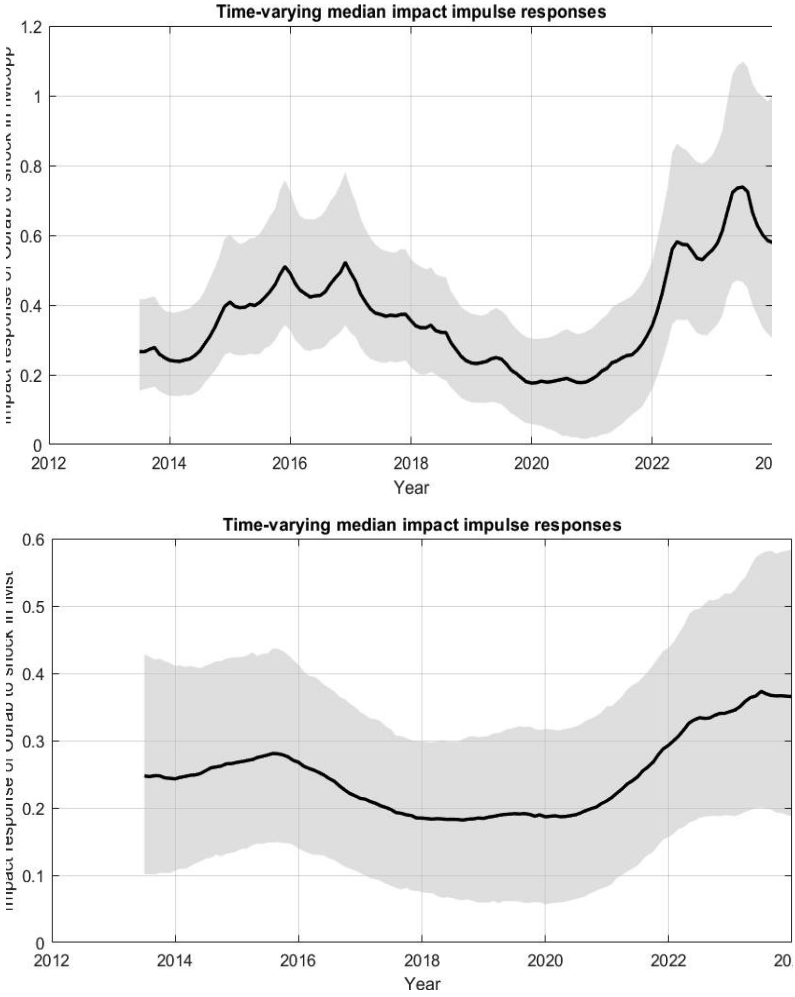
металлургическая отрасль является основой экспорта продукции обрабатывающей промышленности в Свердловской области[57].

Преимуществом TVP-VAR-SV модели как модели с изменяющимися во времени параметрами является возможность анализа IRF, не усредненных по всему временному горизонту, а в любой момент исследуемого временного периода. На рисунке 6.5 показана временная динамика медианных значений IRF (значения, которые делят пополам выборку всех оценок параметров, полученных для каждой байесовской итерации) для темпов роста объема выпуска в обрабатывающей промышленности на шок мировых цен на медь и сталь. IRF показывают процентное изменение темпов роста объемов выпуска в этом секторе на изменение мировых цен на 1 % в момент действия шока. При интерпретации данных результатов и в дальнейшем следует еще раз подчеркнуть, что цены на металлы (медь и сталь) фактически отражают выручку предприятий-экспортеров. На графиках видны статистически значимые повышенные положительные значения импульсных откликов темпов роста объема выпуска в обрабатывающей промышленности в 2015–2016 годах и после 2022 года[58] и пониженные значения отклика в период пандемии в 2019–2021 годах. Следует отметить, что в 2014–2015 годах произошло резкое ослабление курса рубля. Для металлургической отрасли это стало мощнейшим стимулом наращивания объемов производства. Кроме того, этот период характеризуется также резким ростом цен на сталь и медь (рис. 6.3). Скачок импульсных откликов темпов роста объемов производства в обрабатывающей промышленности Свердловской области в 2022–2023 годах — это, на первый взгляд, парадоксальное явление. Вопреки ожидаемому спаду из-за санкций и ухода с европейского рынка, отрасли обрабатывающего сектора не только устояли, но и в некоторые периоды показывали рост. Это стало результатом экстренной перестройки логистики и рекордной поддержки государства. Правительство РФ оперативно ввело комплекс мер поддержки в виде смягчения экспортных пошлин и льготного кредитования оборотных средств. Кроме того, с конца 2022 года стали резко расти мировые цены на сталь и медь (рис. 6.3).

---

[57] По данным онлайн-сервиса, для анализа таможенной статистики внешней торговли Российской Федерации (https://ru-stat.org) доля экспорта металлов и изделий из них из Свердловской области с 2013 по 2021 годы составляла 53 %.

[58] Статистическая значимость определяется тем, что нулевое значения импульсного отклика не попадает в пределы доверительного интервала.



Источник: составлено автором по результатам моделирования.

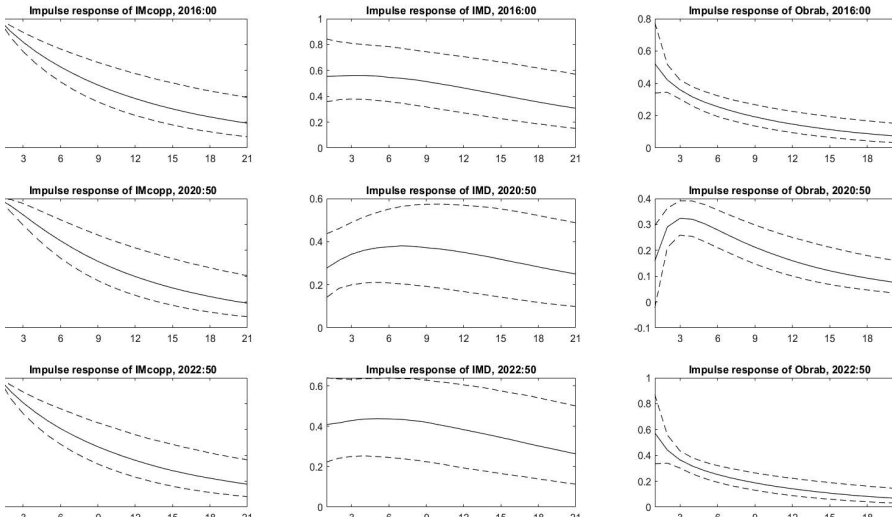
Рис. 6.5. Временная динамика медианных значений IRF для темпов роста объема выпуска в обрабатывающей промышленности на положительный шок мировых цен на медь (слева) и на сталь (справа).
Серым цветом показан 68 % доверительный интервал.

Рисунок 6.5 демонстрирует также, что медианные значения IRF для темпов роста объема выпуска в обрабатывающей промышленности на положительный шок мировых цен на медь являются более волатильными по сравнению с аналогичными значениями импульсного отклика

на положительный шок мировых цен на сталь. Анализ временной динамики медианных значений IRF показывает также, что ширина доверительного интервала, характеризующего степень неопределенности оцененных значений IRF, на обоих графиках рисунка 6.5 максимальна в период 2022–2023 годов. Этот результат отражает фундаментальную нестабильность экономических связей в указанный период, вызванную беспрецедентными санкциями, которые разрушили устоявшиеся межотраслевые связи, в результате чего традиционные каналы трансмиссии (цена – индекс металлов – выпуск в обрабатывающей промышленности) перестали работать.

Следует отметить, что анализируемые IRF показывают импульсные отклики, как отмечалось уже выше, в момент действия шока и не характеризуют послешоковое поведение анализируемых темпов роста переменных. Поэтому представляет интерес исследование послешокового поведения темпов роста объема выпуска в обрабатывающей промышленности с помощью IRF в определенный момент времени. Для данного анализа выбраны три момента времени: 2016 год, середина 2020 года и середина 2022 года. Первый момент времени характеризуется тем, что межотраслевые связи еще не нарушены, второй момент – наличием пандемии COVID-19, а третий момент – перестройкой логистики и усиленной поддержкой государства.

На рисунке 6.6 показаны медианные значения IRF темпов роста индекса металлов и объема выпуска в обрабатывающей промышленности на положительный шок цен на медь для указанных выше моментов времени. Пунктирные линии на графиках ограничивают 68 % доверительный интервал. Анализ IRF показывает статистически значимое положительное влияние шока цен на медь на темпы роста индекса металлов и объема выпуска в обрабатывающей промышленности для всех временных горизонтов и для всех моментов времени.

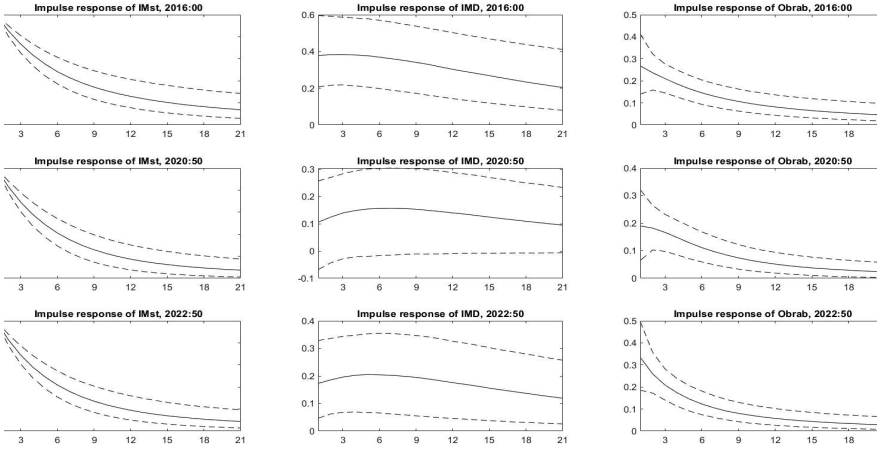


Источник: составлено автором по результатам моделирования.

Рис. 6.6. Медианные значения IRF темпов роста индекса металлов и объема выпуска в обрабатывающей промышленности на положительный шок цен на медь для различных моментов времени.
Пунктирные линии соответствуют 16-й и 84-й процентилям.

Отметим, что положительное значение импульсного отклика темпов роста выпуска в обрабатывающей промышленности в начале 2016 и в середине 2022 года намного превышает аналогичное значение в период пандемии в середине 2020 года. Анализируя форму IRF интересно отметить, что во время пандемии в середине 2020 года количественное значение импульсного отклика после шока возрастает и достигает максимума для временного горизонта, равного трем месяцам. В отличие от этого, значения откликов темпов роста выпуска в обрабатывающей промышленности на ценовой шок меди в начале 2016 и в середине 2022 годов максимальны в период действия шока (t=0), после чего начинается их спад. Данный результат объясняется тем, что во время пандемии COVID-19 инвестиционный спрос предприятий обрабатывающей промышленности (спрос предприятий на средства производства (капитальные блага), необходимые для расширения, модернизации или поддержания производственных мощностей) реализуется с задержкой из-за карантинных ограничений и разрыва производственных цепочек. В середине 2022 года, несмотря на санкции, произошла экстренная перестройка логистики и государственная поддержка (льготное кре-

дитование, смягчение пошлин). Металлурги получили сверхприбыль от роста мировых цен (особенно на медь). Поэтому инвестиционный спрос на продукцию обрабатывающей промышленности возник почти мгновенно. Таким образом, временная структура IRF выступает индикатором степени искажения трансмиссионных механизмов в экстремальных условиях.



Источник: составлено автором по результатам моделирования.

Рис. 6.7. Медианные значения IRF темпов роста индекса металлов и объема выпуска в обрабатывающей промышленности на положительный шок цен на сталь для различных моментов времени.
Пунктирные линии соответствуют 16-й и 84-й процентилям.

На рисунке 6.7 показаны медианные значения IRF темпов роста индекса металлов и объема выпуска в обрабатывающей промышленности на положительный шок цен на сталь для тех же моментов времени, что и на рисунке 6.6. В целом качественное поведение IRF ценового шока на сталь для темпов роста индекса металлов и объема выпуска в обрабатывающей промышленности аналогично описанному на рисунке 6.6 для влияния цен на медь на эти же переменные. Так же, как и на рисунке 6.6, анализ IRF показывает статистически значимое положительное влияние шока цен на сталь на темпы роста индекса металлов и объема выпуска в обрабатывающей промышленности для всех временных горизонтов и для всех моментов времени.

Количественное поведение IRF темпов роста индекса металлов и объема выпуска в обрабатывающей промышленности на шок цен на

сталь (рис. 6.7) характеризуется меньшими значениями импульсных откликов по сравнению с откликами этих переменных на ценовой шок меди (рис. 6.6). Таким образом, можно сделать вывод, что обрабатывающая промышленность Свердловской области (в частности, металлургический сектор) более чувствительна к ценовым шокам на медь, чем на сталь. Меньшие значения импульсных откликов на шок цен стали свидетельствуют о более слабой передаче этих шоков в индекс металлов и реальный выпуск.

Также следует отметить, что в отличие от значения отклика темпов роста выпуска в обрабатывающей промышленности на ценовой шок меди значение отклика темпа роста выпуска в этом секторе на ценовой шок стали в период пандемии в середине 2020 года максимально в период действия шока (t=0). Это можно объяснить тем, что предприятия обрабатывающей промышленности более быстро адаптируются к изменению цен на сталь (например, за счет замещения материала, оптимизации запасов или переноса издержек на конечную продукцию), чем к аналогичному изменению цен на медь.

Положительный отклик агрегированного выпуска обрабатывающей промышленности Свердловской области на рост мировых цен на медь и сталь не противоречит экономической логике, а объясняется тремя основными факторами. Во-первых, доминирующим положением металлургического производства в структуре обрабатывающих отраслей региона: рост цен напрямую стимулирует выпуск этого крупнейшего сегмента. Во-вторых, инвестиционный спрос со стороны металлургической отрасли на оборудование машиностроения создает дополнительный положительный импульс для части обрабатывающих производств. В-третьих, в периоды сверхприбыли металлургической отрасли предприятия-поставщики оборудования могут переносить рост издержек на металл в конечные цены. Таким образом, положительная агрегированная реакция отражает структурную особенность промышленности региона, где металлургия, являясь неотъемлемой частью обрабатывающей промышленности Свердловской области и производящей полуфабрикаты (прокат, катанку, арматуру, рафинированную медь и так далее), выступает ведущим звеном регионального обрабатывающего комплекса. Рост мировых цен напрямую увеличивает ее выпуск и прибыль, а генерируемый ею инвестиционный спрос на продукцию машиностроения распространяет положительный импульс на смежные обрабатывающие производства.

Для определения относительной важности каждого структурного шока в работе применялось разложение дисперсии ошибок прогноза (Forecast Error Variance Decomposition, FEVD). Этот метод показывает какая доля изменения переменной вызвана собственными шоками, а какая — шоками других переменных в системе взаимосвязанных авторегрессионных уравнений. FEVD напрямую характеризует силу и значимость трансмиссионного канала передачи шоков. Если определенный шок (например, ценовой шок на медь) объясняет достаточно значимую долю дисперсии ошибки прогноза другой переменной (скажем, объема выпуска) на интересующем горизонте, это означает, что трансмиссионный канал от цены меди к объему выпуска является мощным и устойчивым. Изменение FEVD во времени (в TVP-VAR-SV) показывает, как эволюционирует эффективность трансмиссионного механизма. Таким образом, FEVD служит количественной мерой важности каждого канала для объяснения неопределенности в целевой переменной.

На рисунке 6.8 показана динамика изменения среднего значения FEVD темпов роста объема выпуска в обрабатывающей промышленности Свердловской области при горизонте прогнозирования 16 месяцев для TVP-VAR-SV модели с ценовыми шоками на медь и сталь. Анализ динамики FEVD для ценовых шоков на медь (рис. 6.8а) показывает, что доля дисперсии ошибки прогноза для темпов роста в обрабатывающей промышленности, объясняемая шоками цен на медь, примерно совпадает с долей дисперсии, объясняемой собственным шоком в объеме выпуска в этом секторе.

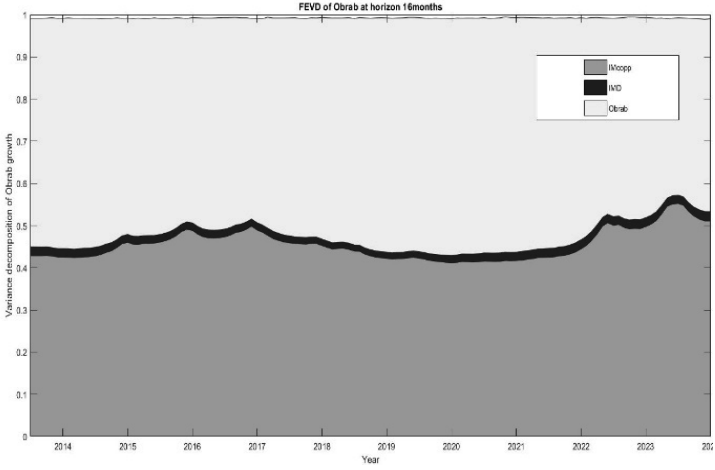
Динамика FEVD для ценовых шоков на сталь (рис. 6.8б), напротив, характеризуется значительной долей дисперсии ошибок прогноза, объясняемой собственным шоком в объеме выпуска и меньшей долей ошибок прогноза, объясняемой ценовым шоком на сталь и индекс металлов в этом секторе промышленности. Это означает, что колебания объема выпуска в обрабатывающем секторе в основном определяются внутренними факторами, специфичными для отраслей этого сектора промышленности (в основном металлургической отрасли), и в меньшей степени внешними воздействиями со стороны биржевых цен на сталь и индекс металлов.

Вопреки ожиданиям, индекс металлов не показал доминирующего влияния на выпуск обрабатывающей промышленности: доля дисперсии ошибок прогноза, объясняемая шоком этого индекса, оказалась незначительной во все периоды (особенно для TVP-VAR-SV модели с ценой на медь). Это может указывать на то, что финансовый канал в ус-

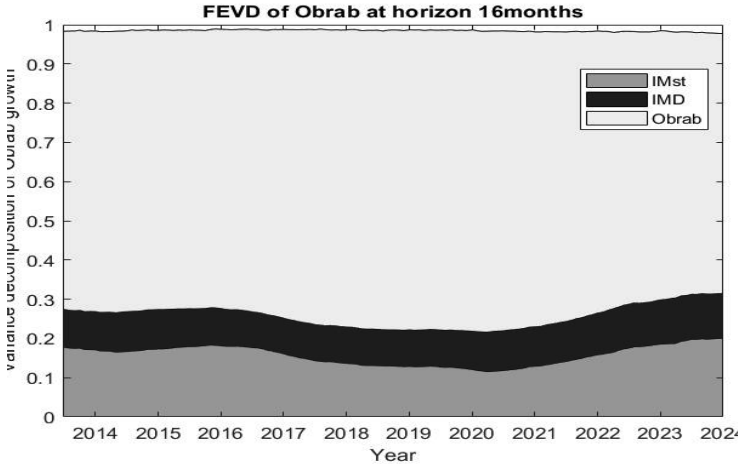
ловиях российской региональной экономики работает слабее, чем прямой канал «цена металла → издержки/инвестиционный спрос → выпуск», либо на недостаточную репрезентативность фондового индекса для реального сектора Свердловской области.

На основании анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что трансмиссионный канал передачи ценовых шоков на сталь к объему выпуска в обрабатывающей промышленности является более слабым, чем аналогичный канал передачи шоков цен на медь к объему выпуска в этом секторе. Шоки в ценах на сталь не оказывают доминирующего влияния на динамику обрабатывающей промышленности.

Таким образом, главное достоинство подхода с использованием TVP-VAR-SV модели заключается в способности одновременно моделировать изменяющиеся во времени параметры регрессии и стохастическую волатильность, что позволяет корректно улавливать эволюцию межотраслевых связей и нестабильность экономической среды. Это дает возможность анализировать импульсные отклики и разложения дисперсии ошибок прогноза для любого момента исследуемого периода, в отличие от классических VAR-моделей, которые предполагают постоянство параметров и гомоскедастичность.



а



б

Источник: составлено автором по результатам моделирования.

Рис. 6.8. Динамика изменения среднего значения FEVD темпов роста объема выпуска в обрабатывающей промышленности Свердловской области при горизонте прогнозирования 16 месяцев для модели с ценовым шоком на медь (а) и сталь (б).

Проведенное исследование включает в себя количественную оценку изменяющейся во времени реакции обрабатывающей промышленности Свердловской области на шоки мировых цен на медь и сталь с учетом финансового канала (индекса металлов и добычи). Для решения поставленной задачи впервые для данного региона была применена модель векторной авторегрессии с изменяющимися во времени параметрами и стохастической волатильностью (TVP-VAR-SV). Такой подход позволил не только учесть временную нестабильность коэффициентов и гетероскедастичность шоков, но и проанализировать эволюцию импульсных откликов и разложения дисперсии ошибок прогноза для любого момента исследуемого периода 2010–2023 гг.

Выдвинутая гипотеза о непостоянстве реакции обрабатывающей промышленности на ценовые шоки полностью подтвердилась. Анализ временной динамики медианных значений IRF показал, что статистически значимые положительные отклики выпуска наблюдались в периоды 2015–2016 гг. и после 2022 г., тогда как в 2019–2021 гг. (период пандемии) трансмиссионный механизм ослабевал, а ширина доверительных интервалов, характеризующая степень неопределенности экономической политики, резко возрастала. Это свидетельствует о том,

что сила и направленность межотраслевых связей зависят от макроэкономического контекста и внешних возмущений.

Сравнительный анализ влияния цен на медь и сталь показал, что обрабатывающая промышленность Свердловской области демонстрирует более сильную и устойчивую реакцию на шоки цен на медь по сравнению со шоками цен на сталь. Импульсные отклики на шок меди имеют более высокие количественные значения и меньшую ширину доверительных интервалов. Разложение дисперсии ошибок прогноза (FEVD) показало, что доля дисперсии выпуска, объясняемая шоком цен на медь, сопоставима с долей, объясняемой собственным шоком отрасли, тогда как для стали этот вклад существенно ниже. Таким образом, ввиду того что экспорт меди явным образом ориентирован на мировые цены, и при этом медная отрасль является для Свердловской области одной из отраслей специализации, цена LME выступает и для формирования индекса обрабатывающих производств региона более значимым ценовым фактором, чем цены на сталь.

Выявлены принципиальные различия в форме импульсных откликов в зависимости от характера шока. В 2016 и 2022 гг. пик отклика достигался в момент шока (t=0) с последующим спадом, что свидетельствует о мгновенной реализации инвестиционного спроса металлургов на продукцию обрабатывающей промышленности. В период пандемии COVID-19 (середина 2020 г.) максимальный отклик для ценовых шоков на медь наблюдался с лагом в три месяца, что объясняется временной блокировкой трансмиссионного механизма из-за карантинных ограничений и разрыва производственных цепочек. Этот результат подтверждает, что временная структура IRF может служить индикатором степени искажения межотраслевых связей в экстремальных условиях.

Полученные результаты имеют значение для региональной промышленной политики. Во-первых, высокая чувствительность обрабатывающей промышленности к ценам на медь требует мониторинга конъюнктуры этого рынка при планировании мер поддержки. Во-вторых, слабость трансмиссионного канала в периоды кризисов (как показала пандемия) означает, что автоматического переноса благоприятной ценовой конъюнктуры на реальный выпуск не происходит – необходимы целенаправленные меры по поддержанию инвестиционной активности и логистической связанности отраслей.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение модели за счет включения дополнительных переменных (курс рубля,

объемы экспорта металлопродукции, инвестиции в основной капитал), применение альтернативных схем идентификации структурных шоков (например, знаковые ограничения), а также проведение аналогичного анализа для других промышленно развитых регионов России с целью выявления общих закономерностей и региональной специфики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии рассмотрен комплекс аспектов важной народнохозяйственной проблемы современного этапа развития страны. Авторский коллектив с различных методических позиций и средств экономической науки участвует в поиске путей модернизации организационно-экономического механизма взаимодействия функционирования и развития двух больших территориальных инфраструктур универсального значения с системной организацией и технологией с промышленными и территориальными комплексами различной региональной специализации. Учитывая различия в тенденциях экономической организации субъектов хозяйствования в различных отраслях и противоречивый характер экономических отношений, в меняющихся условиях неизбежны рассогласования и несоответствия подходов, лежащих в основе экономического управления деятельностью различных сегментов реального сектора на территориях.

К основным обобщенным выводам и одновременно концептуальным тезисам, которые должны стать предметом дальнейших исследований и разработок, следует отнести:

1. Актуальные вопросы развития производительных сил на крупных территориях и входящих в них регионах Российской Федерации необходимо рассматривать и оценивать в аспекте согласования стратегий и программ развития двух системно организованных инфраструктур, а именно электроэнергетики и транспорта, с планами развития отраслевых и межотраслевых производственно-технологических комплексов страны и ее регионов. Транспортно-логистическая и энергетическая политика с усиленной активизацией в ней роли единой электроэнергетической системы должны стать важнейшими дополнениями промышленной политики и политики пространственного развития. Такое единство является критически важным с позиции полноформатного перехода к суверенному развитию, что не может не включать в себя энергетический и транспортно-логистический суверенитет страны. Для полноценного включения энергетики, транспорта и логистики в идеологию и практику суверенного развития Россия располагает всеми необходимыми ресурсно-технологическими предпосылками.

2. Роль больших инфраструктурных систем в экономическом развитии страны, ее макротерриторий и регионов возрастает не только в силу их обеспечивающей роли, но и в связи с технико-технологическим системным статусом. То есть в энергетической и транспортно-ло-

гистической системе концентрируется запрос на разработку, серийное производство и массовое применение передовых научно-технических достижений, а системы обладают емкостью в отношении технологий применения в своей деятельности, которые сами же способны генерировать. Значение обратных связей взаимодействия «промышленность – большие инфраструктурные системы» имеет очевидный потенциал усиления, особенно при проведении политики приоритетов, в числе которых всегда присутствуют задачи, непосредственно связанные с развитием этих систем.

3. Пока не сформирован механизм форсированного развития электроэнергетики, но налицо предпосылки к росту общественной потребности в электроэнергии. Необходимо вернуться к сооружению крупных объемов генерирующих мощностей темпами, опережающими рост спроса на электроэнергию. В настоящей монографии рассмотрены методологические и методические предпосылки к энергоэкономическому и технологическому прогнозированию электроэнергетики. Задача продолжения для наших исследований – формирование целостной методики прогнозирования, а также исследование путей снижения стоимости электроэнергии, потребляемой промышленным производством.

4. Необходимо расширить приоритет развития транспортной системы как таковой до приоритета построения транспортно-логистической системы нового типа. Она могла бы сочетать в себе основу обеспечения связности территорий, что является одним из приоритетов научно-технологического развития России, с новой функцией одного из материальных носителей процессов построения сетей технологического сопряжения и сетей товарно-продуктовой кооперации в условиях слабости экономического управления этими процессами, проявившейся еще в период давления парадигмы максимального упования на рыночное саморегулирование и непреодоленной до сих пор. Элементы крупных транспортно-логистических систем нового типа были представлены в наших ранее опубликованных статьях (Лаврикова, Петров, Кожов, 2024; Кожов, Петров, 2023 и др.). Предстоит большая исследовательская и экспертная работа по формированию транспортно-логистической системы Большого Урала на основе иерархии пространственно распределенных взаимодействующих линейных и узловых объектов с выходом к портам СМП и сопряжением с коридором «Север – Юг».

Таким образом, представленная коллективная монография, помимо сборки широкого круга представленных в ней исследовательских вопросов в единой логике взаимосвязанного развития транспор-

тно-энергетических и производственно-экономических систем на обширных территориях взаимодействия, открывает путь к дальнейшим системно-экономическим исследованиям и разработкам, имеющим не только научное, но и прикладное значение для полноценного экономико-технологического и социально-экономического суверенного развития России.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

Акбердина, В. В., Сергеева, А. С. (2018). Идентификация и основные характеристики срединных регионов. *Управление экономическими системами: электронный научный журнал*. № 6 (112), С. 44.

Акбердина, В. В., Сергеева, А. С. (2015). Основные положения концепции развития срединных субрегионов. *Стратегии развития социальных общностей, институтов и территорий. Материалы Международной научно-практической конференции: в 2-х томах*, С. 57–58.

Алексеева, Е. В. и др. (2024). *Атлас индустриального наследия Большого Екатеринбурга*. Екатеринбург: TATLIN, 400.

Алексеева, Е. В., Быстрова, Т. Ю., Литовский, В. В., Патрушев, С. А. (2024). Влияние золотодобычи на градостроительный ландшафт Екатеринбургской агломерации (Часть 2). *Академический вестник УралНИИпроект РААСН.* 1(60), 22–28. DOI: 10.25628/UNIIP.2024.60.1.003

Андреева, Е. Л., Тарасов, А. Г., Ратнер, А. В. (2020). Проблемы и перспективы развития внешнеэкономической деятельности Арктического региона Урала (на примере ЯНАО). *Российский внешнеэкономический вестник.* № 2, С. 41–42.

Белов, О. А., Федоров, О. В. (2022). Анализ структуры генерирующей мощности и динамики электропотребления в Средне-Камчатском изолированном энергоузле. *Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ*. Т. 24. № 5, С. 120–135. DOI: 10.30724/1998-9903-2022-24-5-120-135.

Бессонова, Н. В., Орловский, К. А. (2024). Транспорт Башкортостана-2023. Путь к инновационным переменам. *Дневник науки.* 1(85), 36.

Большие инфраструктурные системы серединного макрорегиона: современная эволюция и стратегическая перспектива (2023). Под науч. ред. д. т. н. М. Б. Петрова. – Екатеринбург: *Институт экономики УрО РАН*, 278 с.

Большой Урал: социально-экономические и пространственные изменения в первые десятилетия XXI века / под редакцией д-ра экон. наук Лавриковой Ю. Г., – Екатеринбург: *Институт экономики УрО РАН*, 2024. – 607 с.

Брехунцов, А. М., Нестеров, И. И., Нечипорук, Л. А. (2019). Ресурсный потенциал Западной Сибири как основа развития ТЭК России в XXI в. *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. № 1. С. 10–15.

Брехунцов, А. М., Нестеров, И. И., Бяков, А. В., Грамматчикова, Е. Г. (2024). Главные направления и основные проблемы развития нефтегазового комплекса Западной Сибири. *Фундаментальные, глобальные и региональные проблемы геологии нефти и газа: Материалы Всероссийской научной конференции, посвященной 90-летию со дня рождения академика РАН А. Э. Конторовича*, Новосибирск, 29 января – 01 февраля 2024 года. – Новосибирск: Сибирское отделение РАН, 2024. – С. 21–23. – DOI 10.53954/9785604990070_21. – EDN JRAHXI.

Бузмаков, В. Н., Володина, Ю. В. (2022). Титаномагнетитовые месторождения как перспективная сырьевая база металлургии Урала (на основе опыта разработки Качканарской группы месторождений). *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского*: Сб. научных статей. ПГНИУ. Пермь, 25. С. 27–33.

Бушуев, В. В. (2012). *Энергетика России. Т.1. Потенциал и стратегия реализации.* М.: ИЦ «Энергия», 616.

Бушуев В. В., Новиков Н. Л. (2020). Инфраструктурные накопители в энергетике. *Энергетическая политика*. Т. 152. № 10, С. 74–88. DOI 10.46920/2409-5516_2020_10152_74.

Вакуленко, С. П., Евреенова Н. Ю. (2020). *Единая транспортная система.* М.: Российский университет транспорта (МИИТ), 106.

Валеев Н. А., Мачарет Д. А. (2003) Долгосрочная оценка экономической эффективности железнодорожных грузовых перевозок. *Транспортное дело России*. № 4, С. 8–11. DOI: 10.52375/20728689_2023_4_8

Газман В. Д. (2026). Конкуренция генераций с учетом социальных и экологических затрат (на примере США) // *ЭКО.* № 2, С. 224–237. DOI: 10.30680/ECO0131–7652–2026–2–224–237

Глумов А. А. (2007) *Содержание и динамика процессов экономического развития срединного региона*: автореф. дис. канд. экон. наук: 08.00.05 / А. А. Глумов; УрГЭУ. – Екатеринбург, 25 с.

Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году» (2021). М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 570.

Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2021 году». (2022). М.: Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 624.

Игнатьева, Е. Д., Серкова, А. Е. (2025). Оценка влияния транспортной инфраструктуры на индустриальное развитие и экономический рост в российских регионах. Креативная экономика. Том 19. №7, С. 1797–1816. DOI: 10.18334/ce.19.7.123428

Изард, У. (1966). Методы регионального анализа: введение в науку о регионах / пер. с англ. В. М. Гохмана, Ю. Г. Липеца, С. Н. Тагера. – *М.: Прогресс*, 660 с.

Исаев А. Г. (2015) Транспортная инфраструктура и экономический рост: пространственные эффекты. *Пространственная экономика*. №3, С. 57–73. DOI: 10.14530/se.2015.3.057-073

Кириченко, И. С., Алексахин, А. В. (2016). Развитие мирового и отечественного производства железа прямого восстановления, Молодой ученый. 2 (106), 85–90.

Кожов, И. К., Кожов, К. Б. (2025). Сценарное прогнозирование в энергетике: инструмент стратегического управления в условиях неопределенности. *Статья в сборнике международной научно-практической конференции «Новаторский подход»*, 30 сентября 2025 г. – Москва: Научно-образовательный портал «ГЕНЕЗИС», 47 с.

Кожов К. Б., Петров М. Б. (2023). Сухой порт города Екатеринбург и его инфраструктурное обустройство. В сборнике Города нового времени: система GLASS. Екатеринбурга: Институт экономики УрО РАН, с. 113–123. DOI: 10.17059/rec-2023-2-2

Кононов, Ю. Д., Тыртышный, В. Н. (2013). Оценка влияния неопределенности исходных данных на эффективность вариантов энерго- и топливоснабжения регионов в прогнозных исследованиях. *Проблемы прогнозирования*. № 1, С. 90–94.

Косой В. В. (2016). России нужны высокоскоростные магистрали. *Транспорт России*. №5, С. 16–20.

Крылов Г. В., Рафиков В. А., Иванов В. А. и др. (1990). Газотранспортные магистрали Западной Сибири. М.: *Недра,* 259 с.

Крылов, П. М. (2024). Транспортная система Республики Башкортостан в концепции схемы территориального планирования региона: современные географические проблемы и направления пространственного развития, *Вестник Удмуртского университета*, 34(3), 326–337.

Крюков В. А., Коломак Е. А. (2021). Пространственное развитие России: основные проблемы и подходы к их преодолению. *Научные труды ВЭО России*. Т. 227, С. 92–114. DOI: 10.38197/2072-2060-2021-227-1-92-114

Лаврикова, Ю. Г., Петров, М. Б., Кожов, К. Б. (2024). Сухой порт Северного морского пути в концепции формирования Урало-Арктического сектора России. *Экономика региона*. 20 (2), 574–590. DOI: 10.17059/ekon.reg.2024-2-15

Лисин, В. С. (1998). *Ресурсо-экологические проблемы XXI века и металлургия*. М.: Высшая школа, 447.

Литовский, В. В. (2020). *Гравиогеография Урала и сопряженных территорий*. М.: ГЕОС, 400

Литовский, В. В. (2023). Пространственно-технологическая эволюция медной промышленности Урала как индикатор проблем развития региональных ЭПЦ и нерешенных проблем инфраструктурного каркаса макрорегиона. *Большие инфраструктурные системы серединного макрорегиона: современная эволюция и стратегическая перспектива*. Екатеринбург: Институт экономики УрО РАН, 16–43.

Литовский, В. В. (2024). Пространственные особенности и приоритеты дальнейшего развития систем транспорта и энергетики на Урале. *Большой Урал в период пространственных изменений в первые десятилетия 21 века.* Екатеринбург: УрО РАН, 501–507.

Литовский, В. В. К вопросу о трансформации энергопроизводственных циклов в рамках фундаментальных представлений об их эволюции на примере Урала. Часть 1. Золотопромышленность // История и современное мировоззрение. 2023. Т. 5. № 3. С. 126–142.

Маергойз, И. М. (1974). Уникальность экономико-географического положения советского Дальнего Востока и некоторые проблемы его использования в перспективе. *Вестник Московского университета. Серия 5: География.* № 4, с. 3.

Макаров, А. А. (2016). *Системные исследования развития энергетики*. М.: Издательский дом МЭИ, 280.

Макаров И. Н. (2025). О возможности развития региональной транспортно-энергетической инфраструктуры периферийных и неурбанизированных территорий посредством крупных инфраструктурных проектов на основе государственно-частного партнерства. *Креативная экономика*. Т. 19. № 9, С. 2283–2302. DOI: 10.18334/ce.19.9.123882.

Мартыненко, А. В., Сайфутдинов, Д. Ж. (2023). Адекватность гравитационной модели для железнодорожных пассажиропотоков. *Мир транспорта*. Т. 21, № 1, С. 75–86. DOI: 10.30932/1992-3252-2023-21-1-9

Мезенцев, П. Е., Костин, А. А., Ананичева, С. С. (2017). Моделирование

эффективности применения автономной электростанции. *Промышленная энергетика*. № 12, С. 9–13.

Мезенцев П. Е., Кожов К. Б., Кожов И. К. (2025). Оценка эффективности строительства солнечных электростанций в региональном разрезе. *Векторы благополучия: экономика и социум*. Т. 53. № 3, С. 110–127. DOI: 10.18799/26584956/2025/3/1979

Мельников В. В. (2025). Современные тенденции и факторы социально-экономического неравенства регионов России. *Экономический анализ: теория и практика*. Т. 24. № 2, С. 49–72. DOI: 10.24891/ea.24.2.49

Минакир, П. А., Исаев, А. Г., Демьяненко, А. Н., Прокапало, О. М. (2020). Экономические макрорегионы: интеграционный феномен или политико-географическая целесообразность? Случай Дальнего Востока. *Пространственная экономика*. Т. 16. № 1, С. 66–99. DOI: 10.14530/se.2020.1.066-099.

Наумов, Е. В., Никулина, Н. Л. (2024). Оценка влияния особенностей размещения производительных сил, инфраструктуры и объектов социальной сферы на результативность экономической деятельности предприятий в муниципальных образованиях УрФО. *Векторы благополучия: экономика и социум*. Т. 52. № 4, С. 234–252. DOI: 10.18799/26584956/2024/4/1928

Некрасов С. А. (2022). Рост электропотребления российских регионов как фактор их социально-экономического развития. *Экономика региона*. Т. 18, вып. 2, С. 509–527. DOI: 10.17059/ekon.reg.2022-2-15.

Оптимизационные межрегиональные межотраслевые модели / А. Г. Гранберг, В. Е. Селиверстов, В. И. Суслови др.; АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т экономики и орг. пром. пр-ва. – *Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние*, 1989. 256.

Патракеева О. Ю., Кулыгин В. В. (2024). Пространственный анализ инфраструктурных эффектов экономической динамики регионов России. *Экономика региона*. Т. 20. Вып. 3, С. 642–654. DOI: 10.17059/ekon.reg.2024-3-3.

Петров, М. Б., Серков, Л. А. (2024). Анализ долгосрочных и краткосрочных взаимосвязей между электропотреблением и экономическим ростом в промышленно-развитых регионах России. *Journal of Applied Economic Research*. Т. 23, № 1, С. 136–158. DOI: 10.15826/vestnik.2024.23.1.006

Петров М. Б., Чумляков К. С., Чумлякова Д. В., Игнатюк Ю. Л. (2020). Оценка потенциала и перспектив участия Уральского федерального округа в формировании евроазиатских транспортных коридоров. *Рос-*

сийский внешнеэкономический вестник. № 10, С. 28-41.

Петров, С. П., Печенская-Полищук, М. А. (2025). Адаптация цепей поставок черной металлургии России к геополитическим вызовам: от переориентации потоков к изменению финансовых результатов. *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*, Т. 18, № 6, С. 110–131. DOI: 10.15838/esc.2025.6.102.5

Пискун, Е. И., Хохлов, В. В. (2019). Экономическое развитие регионов Российской Федерации: факторно-кластерный анализ. *Экономика региона*. Т. 15. вып. 2, С. 363–376. – DOI: 10.17059/2019-2-5.

Планирование эксперимента и анализ данных (1980). Пер. с англ. / Д. К. Монтгомери. – Л.: Судостроение, 384 с.

Пономарев, Ю. Ю. (2022). Влияние транспортной инфраструктуры на совокупную факторную производительность фирм: оценка для городов России. *Экономическая политика*. Т. 17. № 1, С. 102–125. DOI: 10.18288/1994-5124-2022-1-102-125.

Почукаева, О. В. (2006). Межотраслевое взаимодействие производственных комплексов как фактор экономического роста. *Проблемы прогнозирования*. № 2, С.102–109. URL: https://ecfor.ru/nauchnye-izdaniya/problemy-prognozirovaniya/arhiv-nomerov/problemy-prognozirovaniya-2006-2/

Проникая в будущее. Инновационный портрет Уральского мегарегиона (2016). А. И. Татаркин, В. С. Бочко, В. Л. Берсенев и др. – Екатеринбург: *Институт экономики Уральского отделения РАН*, 274 с.

Разуваев А. Д. (2021). *Экономическая оценка создания, эволюции и стратегического развития транспортной инфраструктуры (на примере железнодорожного транспорта)*. М.: Прометей, 286 с.

а ресурсосберегающих технологий прямого восстановления металлов с использованием метода и инструментальной системы моделирования и оптимизации. *Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук*. Новокузнецк: на правах рукописи, 308.

Садовничий В. А., Осипов Г. В., Акаев А. А., Малков А. С., Шульгин С. Г. (2018) Социально-экономическая эффективность развития железнодорожной сети Сибири и Дальнего Востока. Математическое моделирование и прогноз. *Экономика региона*. № 3, С. 758–777. DOI: 10.17059/2018-3-6

Сандакова, Н. Ю. (2014). Исследование факторов, влияющих на развитие транспортной инфраструктуры региона. *Инфраструктурные отрасли экономики: проблемы и перспективы развития*. № 6. С. 21–26.

Скляр, В. О. (2014). *Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии*. Донецк.: ДонНТУ, 224.

Соколов А. А., Руднева О. С. (2024). Опорный каркас транспортной инфраструктуры степной зоны России: проблемы и перспективы развития. *Вопросы степеведения*. № 3, С. 33–38. DOI: 10.24412/2712-8628-2024-3-33-38

Соколов, А. В., Бажанов, В. А. (2024). Оценка возможных параметров взаимодействия машиностроения и металлургии в России в перспективе до 2035 года. *Мир экономики и управления*, Т. 24, № 4, С. 121–140. DOI: 10.25205/2542-0429-2024-24-4-121-140

Срединный регион: теория, методология, анализ (2009). Е. Г. Анимица, А. А. Глумов, Е. Б. Дворядкина и др. – Екатеринбург: *Уральский государственный экономический университет*, 508 с.

Стародубцева, Е. Б., Ким, А. Д. (2021). Проблемы участия России в глобальных цепочках стоимости. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика.* № 2, С. 21–30. DOI: 10.24143/2073-5537-2021-2-21-30

Стенников, В. А., Славин, Г. Б. (2015). Структуризация уровней централизации энергоснабжения. *Энергетическая политика*. № 2, С. 55–63.

Степанов, Е. А. (2017). Сравнительные преимущества Уральского Федерального округа в мировой экономике. *Вестник Челябинского государственного университета*. № 14 (410). Экономические науки. Вып. 59, С. 55–56.

Стратегии макрорегионов России: методологические подходы, приоритеты и пути реализации / ред. акад. А. Г. Гранберг. *М.: Наука*, 2004. 720 с.

Стребков, Д. С. (2019). О развитии бестопливной энергетики. *Энергетический вестник.* № 25, С. 17–33.

Суржикова, О. А. (2012). Проблемы и основные направления развития электроснабжения удаленных и малонаселенных потребителей России. *Вестник науки Сибири*. № 3(4), С. 103–108.

Татаркин, А. И. (2013). Инновационная направленность развития срединного региона в модернизации российской экономики. *Научное обозрение*. № 3, С. 153–202.

Титаномагнетиты Урала и технология их переработки. URL: https://metal-archive.ru/titanomagnetity/907-titanomagnetity-urala-i-tehnologiya-ih-pererabotki.html

Томаев, О. А., Павлов, П. Н., Каукин, А. С. (2020). Внутренняя торговля России: применение гравитационной модели. *Экономическая политика*. Т. 15. № 5, С. 60–89.

Тонышева, Л. Л., Кузьмина Н. Л. (2019). Пространственное развитие Тюменской области: проблемы и перспективы. *Нефть и газ: технологии и инновации. Материалы Национальной научно-практической конференции*, С. 187–190.

Тремясов, В. А., Зограф, Я. Е., Кривенко, Т. В. (2021). Оптимальное планирование солнечно-дизельной системы генерации с аккумулированием электроэнергии. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии*. Т.1. № 14, С. 42–54. DOI: 10.17516/1999-494X-0287

Управление социально-экономическим развитием территорий: факторы, институты, механизмы: кол. моногр. (2018). А. Ю. Веретенникова, К. С. Гончарова, Е. П. Ерошенко и др. Екатеринбург: *Институт экономики УрО РАН,* 276 с.

Фаткуллин, И. Ф., Трофимов, А. М. (2010). Факторы формирования, развития и функционирования автотранспортных сетей Республики Татарстан. *Ученые записки Казанского университета*. Т.152. кн.3, С. 262–269.

Цымбал, В. П., Мочалов, С. П., Рыбенко, И. А. (2014). *Процесс СЭР – металлургический струйно-эмульсионный реактор*. М.: Металлургиздат, 488.

Чумляков, К. С. (2016). Транспортные коридоры России в мирохозяйственной интеграции. Тюмень: *ТОГИРРО*, 184 с.

Чумляков, К. С., Чумлякова, Д. В. (2015). Развитие системы магистральных трубопроводов в пространстве инфраструктурного освоения Западной Сибири. *Транспорт Российской Федерации*. № 5(60), С. 18–22.

Шилова, М. Г., Нежникова, Е. В. (2024). Анализ и перспективы развития металлургической отрасли в России. *Инновационная экономика*. Т. 11. № 4. URL: https://journals.rudn.ru/in-econ/article/view/48894

Юсфин, Ю. С. (1994). *Новые процессы получения металла.* М.: Металлургия, 320.

Acevedo Arenas, A.C.Y. (2024) Towards a standardized LCOE calculation for informed decision-making in energy policy and investment. *International Journal of Energy Economics and Policy*. Vol.14. №6, P. 523-541. DOI: 10.32479/ijeep.16280.

Alanazi, M., Alharthi, Y., & Alzahrani, A. (2025). Enhancing stochastic planning in autonomous hybrid renewable energy systems using Monte Carlo simulation. *Energy Reports*. Vol.12, P. 2100-2115. DOI: 10.1016/j.egyr.2025.02100

Alberizzi, A., Carlini, E.M., Luzi, L. (2024). Agent-based modeling for intraday electricity markets with renewable integration. *Computational Economics*. Vol.4, P.2147-2178. DOI: 10.1007/s10614-024-10542-w

Albin, J., Alhassan, K., Paulo, Anciaes P. (2025). Public transport investments as generators of economic and social activity. *Journal of Transport & Health*. 41,101989 DOI: 10.1016/j.jth.2025.101989

Alekseeva, E., Bystrova, T., Litovsky, V., Patrushev, S. (2023). Mines d'or dans le paysage naturel, anthropique et socioculturel du Grand Ekaterinbourg. *Les paysages industriels, un patrimoine en tension* (pp. 69-77). Troyes: Edité conjointement par la Ville de Troyes et l'APIC (Association pour le patrimoine industriel de Champagne-Ardenne.

Alotaibi, S., Quddus, M., Craig Morton, Cr., Imprialou, M. (2022). Transport investment, railway accessibility and their dynamic impacts on regional economic growth. *Research in Transportation Business & Management*. 43(2022), 100702. DOI: 10.1016/j.rtbm.2021.100702.

Amir-Ahmadi, P., Christian, M., Mu-Chun, W. (2020). Choosing Prior Hyperparameters: With Applications to Time-Varying Parameter Models. *Journal of Business & Economic Statistics*. 38(1), 124-136. DOI: 10.1080/07350015.2018.1459302

Andersson D.E., Shyr O.F., Fu, J. (2010). Does High-Speed Rail Accessibility Influence Residential Property Prices? Hedonic Estimates from Southern Taiwan. *Journal of Transport Geography*. Vol.18, P. 166–174. DOI: 10.1016/J.JTRANGEO.2008.10.012

Anselin, L. (1988). Spatial Econometrics: Methods and Models. *Dordrecht: Springer (Kluwer Academic)*, 284 p. ISBN 978-9024737352.

Arias, J. E., Rubio-Ramírez, J. F., & Shin, M. (2023). Macroeconomic forecasting and variable ordering in multivariate stochastic volatility models. *Journal of Econometrics*, 235(2), 1054–1086. DOI: 10.1016/j.jeconom.2022.04.013

Aschauer, D.A. (1989). Is Public Expenditure Productive? *Journal of Monetary Economics*. Vol.23, P. 177-200.

Badalyan G., Herzfeld T., Rajcaniova M. (2014). Transport Infrastructure and Economic Growth: Panel Data Approach for Armenia, Georgia and Turkey. *Review of Agricultural and Applied Economics*. Vol. 17, P. 22–31. DOI: 10.15414/raae.2014.17.02.22-31

Bertoncini, M. (2022). An application of the PROMETHEE II method for the comparison of energy requalification strategies to design Post-Carbon Cities. *AIMS Energy*. Vol.10. № 4, P. 553-581. DOI: 10.3934/energy.2022028.

Bloomberg NEF. (2025). New Energy Outlook 2025: Long-term scenarios for the global energy transition. *Bloomberg New Energy Finance*. https://about.bnef.com/new-energy-outlook/

Brans J.-P. (1986). L'ingénièrie de la décision; Elaboration d'instruments d'aide à la decision. *Management Science*. Vol. 32, № 6, P. 647-656. DOI: 10.1287/mnsc.32.6.647.

Brans J.-P. (2005) PROMETHEE Methods. Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. – New York: Springer, 163–195. DOI: 10.1007/b100605.

Bystrova, T., Alekseeva, E., Litovskiy, V. (2024). Hydropower System of the Ural Factory City as a Unique Object of Industrial Heritage. In: Radionov, A.A., Ulrikh, D.V., Timofeeva, S.S., Alekhin, V.N., Gasiyarov, V.R. (eds). Proceedings of the 7th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety. ICCATS 2023. *Lecture Notes in Civil Engineering,* 400, (pp. 356-371). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-031-47810-9_33

Campagne, E., Amara-Ouali, Y., Goude, Y., Kalogeratos, A. (2024). Leveraging graph neural networks to forecast electricity consumption. arXiv preprint, arXiv:2408.17366. https://arxiv.org/abs/2408.17366

Carlino, A., Creutzig, F., & van Vuuren, D. (2025). Variability of technology learning rates: Implications for energy transition modeling. *Science*. Vol.28(2), №109456. DOI: 10.1016/j.isci.2025.109456

Ceylan, C., Ozturk, Y., & Karakose, M. (2025). Precision forecasting for hybrid energy systems using five deep learning algorithms. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Vol.163, №109493. DOI: 10.1016/j.ijepes.2025.109493

Chan, J. C. C., & Eisenstat, E. (2018). Bayesian model comparison for time-varying parameter VARs with stochastic volatility. *Journal of Applied Econometrics*, 33(4), 509–532. DOI: 10.1002/jae.2617

Chan, J. C. C., & Eisenstat, E. (2018b). Comparing hybrid time-varying parameter VARs. *Economics Letters*, 171, 1–5. DOI: 10.1016/j.econlet.2018.06.031

Chien, J.C.L., Lior, N. (2011). Concentrating Solar thermal Power as a Viable Alternative in China's Electricity Supply. *Energ. Pol*. Vol.39. №12, P. 7622–7636. doi:10.1016/j.enpol.2011.08.034

Cox, J.C. (1979). Option pricing: a simplified approach. *Journal of Financial Economics*. Vol.7. № 3, P. 229-263. DOI: 10.1016/0304-405X(79)90015-1.

David, P.A. (1985). Clio and the Economics of QWERTY / P.A. David // The American Economic Review. Vol.75. № 2, P. 332–337.

Dimitriou, D., Sartzetaki, M., Karagkouni, A. (2026). Transport Infrastructure Impact Assessment to Regional Economy: Methodology Framework and Comparative Analysis. *Transportation Research Procedia*. V. 95, P. 49-56 DOI: 10.1016/j.trpro.2026.02.007.

Dixit, A.K. (1994). *Investment under Uncertainty*. – Princeton: Princeton University Press, 468 p.

Durbin, J., & Koopman, S. J. (2001). *Time Series Analysis by State Space Methods*. Oxford: Oxford University Press, 253. URL: https://econpapers.repec.org/bookchap/oxpobooks/9780199641178.htm

Durbin, J., & Koopman, S. J. (2002). A simple and efficient simulation smoother for state space time series analysis. *Biometrika*, 89(3), 603–616. DOI: 10.1093/biomet/89.3.603

Elhorst, J.P. (2014). Spatial Econometrics: From Cross-Sectional Data to Spatial Panels. *Berlin; Heidelberg: Springer*, 125 p. DOI: 10.1007/978-3-642-40340-8.

Ember. Global Electricity Review 2025. Ember Climate. https://ember-energy.org/insights/research/global-electricity-review-2025/

Filenta, P., Kydros, D. (2022). Literature Review of Economic and Regional Development through Quantitative Methods and Social Network Analysis. *European Journal of Interdisciplinary Studies*. Vol. 14, No. 1, P. 188–206.

Frischmuth, F., Hess, T., Härtel, P. (2024). Stochastic planning of energy system transformation pathways considering operational uncertainties. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. Vol. 3, P. 1842-1854. DOI: 10.1109/TSTE.2024.3456789

Fu, X., Huang, Y., & Wang, D. (2021). Statistical machine learning model for uncertainty quantification in renewable energy generation. *Frontiers in Energy Research*. Vol.9. №809254. DOI: 10.3389/fenrg.2021.809254

Fujita, M., Krugman, P. R., Venables A. J. (1999). The Spatial Economy: Cities, Regions, and International Trade. *Cambridge, Mass.; London*: MIT Press, 367 p.

Geske R. (1979). The valuation of compound options. *Journal of Financial Economics*. Vol. 7. № 1, P. 63–81. DOI: 10.1016/0304-405X(79)90022-9.

Ghani E., Goswami A. G., & Kerr W.R. (2016). Highway to Success: The Impact of the Golden Quadrilateral Project for the Location and Performance of Indian Manufacturing. *The World Bank Economic Review*. *The Economic Journal*. Vol.3, P. 317-357. DOI: 10.1111/ECOJ.12207

Gong, X., & Xu, J. (2022). Geopolitical risk and dynamic connectedness between commodity markets. *Energy Economics*, 110, 106028. DOI: 10.1016/j.eneco.2022.106028

Grgić J. (2020). Impact of Transport Infrastructure on Local Development in Dalmatia. *Regional Science Policy & Practice*. №13. DOI:10.1111/rsp3.12352

Haken H. (2004). Synergetics: Introduction and Advanced Topics. *Springer-Verlag*.

Harder, N., Büttner, N., Schick, C., & Weinhardt, C. (2025). ASSUME: An agent-based simulation framework for wholesale electricity markets. *SoftwareX*. Vol.29, №101438. DOI: 10.1016/j.softx.2025.101438

Hingorani, N.G., Gyugyi L. (2000). Understanding FACTS concepts and technology of flexible AC transmission systems. – New York: *IEEE Press*, 452 p.

Hoekstra, A., van den Berg, M., & Steinbuch, M. (2025). Using learning curves to guide the energy transition with insights from electric trucks. *Nature Innovation*. Vol.1, P. 29. DOI: 10.1038/s44333-025-00029-5

Hu, H., Wang, L., Tao, R. (2024). Energy demand forecasting using convolutional neural networks and modified war strategy optimization. *Scientific Reports*. 2024. Vol.1, P. 5789. https://doi.org/10.1038/s41598-024-56789-w

Hulst, N., van den Berg, K., & Steubing, B. (2025). Learning curves in prospective life cycle assessment of emerging energy technologies. *Environmental Science & Technology*. Vol.59(4), P. 1847-1856. DOI: 10.1021/acs.est.4c05673

International Energy Agency. (2021). Renewables 2021: Analysis and forecast to 2026. IEA Publications. https://www.iea.org/reports/renewables-2021

International Renewable Energy Agency. Digitalisation and AI for power system transformation. (2025). *IRENA Publications*. https://www.irena.org/publications/2025/Oct/Digitalisation-AI-power-systems

Islam, R., Rahman, M.M., Muttaqi, K.M. (2025). Machine learning for power system stability and control: A comprehensive review. *Results in Engineering*. Vol.25. №103456. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.103456

Kang, W., Ratti, R. A., & Yoon, K. H. (2015). Time-varying effect of oil market shocks on the stock market. *Journal of Banking & Finance*, 61(S2), S150–S163. DOI: 10.1016/j.jbankfin.2015.08.027

Karpovich, O., Shlafman, A. (2017). Classification of factors of development of transport infrastructure in the region. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 90 012115, 7 p. DOI: 10.1088/1755-1315/90/1/012115

Khamees, A. K., Badra, N. M., & Abdelaziz, A. Y. (2021). Stochastic modeling for wind energy and multi-objective optimization of hybrid renewable energy systems. *IEEE Access*. №9, P.158353-158370. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3130256

Koop, G., & Potter, S. M. (2007). Estimation and Forecasting in Models with Multiple Breaks. *Review of Economic Studies,* 74(3), 763–789. DOI: 10.1111/j.1467-937X.2007.00436.x

Koop, G., Leon-Gonzalez, R., & Strachan, R. W. (2009). On the evolution of the monetary policy transmission mechanism. *Journal of Economic Dynamics & Control*, 33(5), 997–1017. DOI: 10.1016/j.jedc.2008.11.003

Kuramoto Y. (1984). Chemical Oscillations, Waves, and Turbulence. Springer-Verlag.

Lenton, T.M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S. & Schellnhuber, H.J. (2008). Tipping elements in the Earth's climate system. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. Vol. 6, P. 1786-1793. DOI: 10.1073/pnas.0705414105

LeSage, J., Pace, R.K. (2009). Introduction to Spatial Econometrics. *1st ed. New York: Chapman and Hall/CRC.* 340 p. DOI: 10.1201/9781420064254.

Lorenz, E.N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*. №20(2), P. 130-141. DOI: 10.1175/1520-0469(1963)020<0130:DNF>2.0.CO;2

Loulo, R., Remme U., Kanudia A., Lehtila A., Goldstein G. (2005). Documentation for the TIMES Model - PART I. *IEA Energy Technology Systems Analysis Programme (IEA-ETSAP)*: Paris

Lubik, T. A., & Matthes, C. (2015). Time-Varying Parameter Vector Autoregressions: Specification, Estimation and an Application. *Economic Quarterly*, 101(4), 323–352. DOI: 10.21144/eq101040

Lubik, T., & Schorfheide, F. (2004). Testing for indeterminacy: an application to U.S. monetary policy. *American Economic Review*, 94(1), 190–217. DOI: 10.1257/000282804322970760

Lütkepohl, H. (2007). *New Introduction to Multiple Time Series Analysis*. Springer, 764. URL: https://saidnazulfiqar.wordpress.com/wp-content/uploads/2013/09/time-series.pdf

Markard, E. (2023). Locked in transition? Towards a conceptualization of path dependency in low-carbon energy systems. *Energy Research and Social Science*. Vol.106, Art. 103316. DOI: 10.1016/j.erss.2023.103316.

Markowitz, H. (1952). Portfolio selection. *The Journal of Finance*. Vol.7. № 1, P. 77–91. DOI: 10.1111/j.1540-6261.1952.tb01525.x.

Mas M., Maudos J., Pérez F., & Uriel E. (1995). Infrastructures and Productivity in the Spanish Regions. *Regional Studies*. Valencia, 27 p.

May R.M. (1976). Simple mathematical models with very complicated dynamics. *Nature*. Vol. 261(5560), P. 459-467. DOI: 10.1038/261459a0

Mirshekali, H., Dashti, R., Keshavarz, A., & Shaker, H.R. (2025). A review of large language models for energy systems: Applications and challenges. *IEEE Access*. Vol.13, P. 24567-24589. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3456789

Mishra, S., Bakke, J.O.H., Korpås, M., Tesfatsion, L. (2025). Agent-based modeling: A review of energy transition research. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol.213, №115267. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.115267

Myers, S.C. (1977). Determinants of corporate borrowing. *Journal of Financial Economics*. 1977. – Vol. 5, № 2. – P. 147–175. – DOI: 10.1016/0304-405X(77)90015-0.

Nakajima, J. (2011). Time-Varying Parameter VAR Model with Stochastic Volatility: An Overview of Methodology and Empirical Applications (*IMES Discussion Paper Series* No. 11-E-09). Institute for Monetary and Economic Studies, Bank of Japan. URL: https://www.imes.boj.or.jp/research/papers/english/11-E-09.pdf

Park, I., Yi, D. (2026). Beyond the obvious: Direct and indirect impacts of transport infrastructure investment on the regional economic growth. *Research in Transportation Business & Management*. 64, 101523 DOI: 10.1016/j.rtbm.2025.101523.

Pitz-Paal, R., Krüger, J., Hinsch, J. (2022). Decarbonizing the German industrial thermal energy use with solar, hydrogen, and other options–Recommendations for the world. *Solar Compass*. V. 3, P. 1-7. https://doi.org/10.1016/j.solcom.2022.100029.

Pradhan R.P., Bagchi T.P. (2013). Effect of Transportation Infrastructure on Economic Growth in India: The VECM Approach. *Research in Transportation Economics*. Vol. 38, P. 139–148. DOI: 10.1016/j.retrec.2012.05.008

Pravdina, N.V., Danilova, I.V., & Rezepin, A.V. (2024). Industrial development amid economic turbulence: strategic guidelines for single-industry regions. *R-Economy*, 10(3), 330–349. DOI: 10.15826/recon.2024.10.3.021

Prigogine, I., Stengers, I. (1984). Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature. *Bantam Books*.

Primiceri, G. (2005). Time Varying Structural Vector Autoregressions and Monetary Policy. *The Review of Economic Studies,* 72(3), 821–852. DOI: 10.1111/j.1467-937X.2005.00353.x

Qureshi, M., Ahamd, A., Syed, D., Husin, N.A. (2024). Deep learning-based forecasting of electricity consumption trends. *Scientific Reports*. 2024. Vol.14. №5660. DOI: 10.1038/s41598-024-56602-4

Rajakovic, N., Kuzle, I., & Zeljko, M. (2025). Coupling of the planning and power system analysis software for high-level penetration of renewable energy sources. *Energy Conversion and Management: X*. Vol.25. №100301. DOI:10.1016/j.ecmx.2025.100301

Rubin, E.S., Azevedo, I.M., Jaramillo, P., & Yeh, S. (2015). A review of learning rates for electricity supply technologies. *Energy Policy*. Vol.86, P. 198-218. DOI: 10.1016/j.enpol.2015.06.011

Rubio-Ramírez, J. F., Waggoner, D. F., & Zha, T. (2010). Structural Vector Autoregressions: Theory of Identification and Algorithms for Inference. *The Review of Economic Studies*, 77(2), 665–696. DOI: 10.1111/j.1467-937X.2009.00578.x

Saaty, T.L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*. Vol.48, №1, P. 9-26. DOI: 10.1016/0377-2217(90)90057-I.

Saaty, T.L. (1980) *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. – New York: McGraw-Hill, 287 p.

Sahoo P., Dash R.K. (2009). Infrastructure Development and Economic Growth in India. *Journal of the Asia Pacific Economy*. Vol.14, P. 351–365. DOI: 10.1080/13547860903169340

Saidi, A.S., Ben Makhlouf, A., Khalgui, M. (2024). Multiparameter bifurcation analysis of power systems with renewable energy sources integration. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. Vol.3. №2450029. DOI: 10.1142/S0218127424500299

Sims, C. A. (1980). Macroeconomics and reality. *Econometrica*, 48(1), 1–48. URL: https://www.pauldeng.com/pdf/Sims%20macroeconomics%20and%20reality.pdf

Sims, C. A. (2000). Using a Likelihood Perspective to Sharpen Econometric Discourse: Three Examples. *Journal of Econometrics*, 95(2), 443–462. DOI: 10.1016/S0304-4076(99)00046-9

Sims, C. A., & Zha, T. (1998). Bayesian Methods for Dynamic Multivariate Models. *International Economic Review*, 39(4), 949–968. DOI: 10.2307/2527347

Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A., Folke, C., & Walker, B. (2001). Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*. Vol. 413(6856), P. 591-596. DOI: 10.1038/35098000

Strogatz, S.H. (2018). Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics. *Biology, Chemistry, and Engineering* (2nd ed.). CRC Press.

Sua, L., Chen, M., Wang, X. (2025). Deep learning in renewable energy forecasting: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol.201, №115234. DOI: 10.1016/j.rser.2025.115234

Szafranek, K., Papież, M., Rubaszek, M., & Śmiech, S. (2023). How immune is the connectedness of European natural gas markets to exceptional shocks? *Resources Policy*, 85(A), 103917. DOI: 10.1016/j.resourpol.2023.103917

Thuku, G., Chakamera, Ch., Noleen, P. (2026). Causality between transport infrastructure and economic growth in Kenya. *Transport Economics and Management*. 4, P.38–47. DOI: 10.1016/j.team.2026.01.001

Trigeorgis, L. (1996). *Real Options: Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation*. Cambridge, MA: MIT Press, 427 p.

Unsihuay-Vila, C., Marangon-Lima, J.W., de Souza, A.C. (2010). Electricity demand and spot price forecasting using evolutionary computation and chaotic nonlinear dynamics. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2010. Vol. 5. P. 407-415. DOI: 10.1016/j.ijepes.2009.11.007

Zhang J., Zhang Y. (2021). Tourism, Transport Infrastructure and Income Inequality: A Panel Data Analysis of China. *Current Issues in Tourism*. Vol.25, P. 1-20. DOI:10.1080/13683500.2021.1928012

Wood Mackenzie. Energy Transition Outlook 2025-26: Insights and scenarios. Wood Mackenzie Reports. https://www.woodmac.com/insights/energy-transition-outlook-2025

World Economic Forum. Fostering Effective Energy Transition 2025. *WEF Reports*. 2025. https://www.weforum.org/publications/fostering-effective-energy-transition-2025/

Wright, T.P. (1936). Factors affecting the cost of airplanes. *Journal of Aeronautical Sciences*. Vol. 3(4), P. 122-128. DOI: 10.2514/8.155

Xun, Xu, Chase, N., Peng, T. (2021). Economic structural change and freight transport demand in China // *Energy Policy*. 158, 112567 DOI:10.1016/j.enpol.2021.112567

Yang, Z., Wang, H., & Liu, Y. (2025). Forecasting very short-term power load with hybrid deep learning models: A BiLSTM-CNN approach. *Systems Sci-*

ence & Control Engineering. Vol.1. №2486136. DOI:10.1080/21642583.2025 .2486136

Yang, H., Wang, X., Luh P. B. (2025). Chaotic characteristics of electricity price and its forecasting using neural networks. *AUPEC: Australasian Universities Power Engineering Conference*. Vol 12. P. 462-467.

Yu N., De Jon M., Storm S., Mi J. (2011). Transport Infrastructure, Spatial Clusters and Regional Economic Growth in China. *Transport Reviews*. Vol.32, P. 3-28. DOI: 10.1080/01441647.2011.603104

Научное издание

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И ТРАНСПОРТНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИНФРАСТРУКТУРЫ: ВЗАИМОСВЯЗАННОЕ РАЗВИТИЕ И РАЗМЕЩЕНИЕ

Рекомендовано к изданию
Объединенным ученым советом по экономическим наукам,
Ученым советом Института экономики УрО РАН.
Протокол Ученого совета № 6 от 15.06.2026. Рег. № 6(26)
(протокол редсовета № 5 от 15.06.2026)

Редактор Т. Н. Ваулина
Компьютерная верстка Е. В. Шестаковой

Дата подписания в печать 07.10.2026
Дата выхода в свет 14.10.2026
Формат 60х90 1/16. Бумага типографская.
Усл. печ. л. 13. Уч.-изд. л. 10.
Тираж 500 экз. Заказ № 14/10-1

Институт экономики Уральского отделения
Российской академии наук
620014, г. Екатеринбург, ул. Московская, 29
Тел. +7 (343) 371-45-36
Сайт: www.uiec.ru.

Отпечатано с готового оригинал-макета
ООО «Издательский дом „Ажур”»
620049, г. Екатеринбург,
ул. Восточная, д. 54
Тел. +7 (343) 350-78-28, +7 (343) 350-78-49
E-mail: azhur.ek@mail.ru



ISBN 978-5-7691-2639-0