

На правах рукописи

Горлов Анатолий Александрович

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАДИЦИОННОЙ
ЭНЕРГЕТИКИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ В СТРАНАХ
БАССЕЙНА СЕВЕРНОГО МОРЯ**

Специальность 08.00.14 – Мировая экономика

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата экономических наук

Москва - 2020

Работа выполнена в Департаменте мировой экономики факультета мировой экономики и мировой политики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Научный руководитель: **Крюков Валерий Анатольевич**
Академик РАН, доктор экономических наук,
профессор Департамента мировой экономики
НИУ «Высшая школа экономики»

Официальные оппоненты: **Телегина Елена Александровна,**
Член-корреспондент РАН, доктор экономических
наук, профессор факультета международного
энергетического бизнеса РГУ нефти и газа (НИУ)
имени И. М. Губкина

Криворотов Андрей Константинович,
Кандидат экономических наук, доцент кафедры
управления инновациями Московского
государственного института международных
отношений МГИМО (Университет) МИД России

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Национальный
исследовательский институт мировой
экономики и международных отношений
имени Е.М. Примакова РАН» (ИМЭМО РАН)**

Защита состоится «___»_____2020 года в ___ часов на
заседании диссертационного совета по защите докторских и кандидатских
диссертаций Д 002.009.02 при Федеральном государственном бюджетном
учреждении науки Институте экономики Российской академии наук по адресу:
117218, г. Москва, Нахимовский проспект, 32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН Института
экономики РАН по адресу: 117218, г. Москва, Нахимовский проспект, 32, а
также на сайте организации.

Автореферат размещен на официальном интернет-сайте ФГБУН
Института экономики РАН: <http://www.inecon.org/dissertacziionnye-sovety/>

Автореферат разослан «___»_____2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 002.009.02,
доктор политических наук

З.А. Дадабаева

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Страны бассейна Северного моря (БСМ), к которым относятся Германия, Великобритания, Франция, Дания, Бельгия, Нидерланды и Норвегии, являются лидерами мировой экономики в процессах энергетической трансформации и развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ), что изначально было направлено на уменьшение зависимости от импорта топливных ресурсов и повышения уровня энергетической безопасности. Благодаря целенаправленной энергетической политике, доля ВИЭ в странах БСМ стала расти быстрыми темпами, и уже в 2015 году ввод мощностей ВИЭ превысил объем ввода традиционных установок. Дополнительное ускорение процессам замещения традиционной энергетики возобновляемыми источниками в странах БСМ обеспечили решения Парижского соглашения по климатической политике и устойчивому развитию, связанные с глобальным потеплением. Стремительное снижение стоимости «зеленой» энергии всё чаще делает более привлекательной альтернативную энергетику. Исследования особенностей процесса замещения в странах БСМ являются актуальными, так как позволяют определить ключевые факторы и важнейшие тренды динамики этого процесса, а также сформулировать теоретически-методические подходы к оценкам и прогнозам замещения, которые могут быть учтены для диверсификации национальных энергетических секторов в мировой экономике. Тема исследований стала актуальна также для России, где в последние годы, благодаря эффективной государственной поддержке, сформировался оптовый рынок ВИЭ, и которая ратифицировала в 2019 году Парижское соглашение. На конференции COP25 (Мадрид, 2019) страны мира разделились на сторонников и противников срочных действий по предотвращению климатической катастрофы. На этом фоне Европейский Союз, во главе со странами БСМ, объявил о своей новой программе «European Green Deal», направленной на сокращение выбросов парниковых газов до 55% к 2030 году и до нуля к 2050 году, а также призвал все страны мира последовать его примеру в течение 2020 года. Это поставило энергетический сектор мировой экономики перед вызовом необходимости радикальной трансформации, что придает теме исследований особую актуальность.

Степень разработанности темы исследования. Несмотря на то, что возобновляемая энергетика формирует стратегический тренд процесса трансформации энергетического сектора мировой экономики, до настоящего времени нет полного единства научных мнений исследователей относительно

теоретических аспектов, касающихся особенностей замещения традиционных источников энергии возобновляемой энергетикой и определяющих ее факторов. Однако, с позиций общей роли и перспектив традиционной и возобновляемой энергетике в мировой экономике необходимо выделить труды ведущих российских и зарубежных ученых, таких как Бушуев В.В., Фортов В.Е., Шпильрайн Э.Э., Волошин В.И., Григорьев Л.М., Телегина Е.А., Митрова Т.А., Попель О.С., Еременко Г.В., Елистратов В.В., Безруких П.П., Крюков В.А., Шафранник Ю.К., Филлипов С.П., Порьфирьев Б.Н., Жуков С.В., Конопляник А.А., Громов А.И., Конторович А.Э., Эдер Л.В., Да Роза А., Джевелл Дж., Шерп А., Рьях К., Твиделл Дж., Джонстоун Н. и другие.

С методической точки зрения процессы замещения традиционных источников энергии возобновляемой энергетикой, как в глобальном, так и в региональном контексте также практически не имеют оптимального набора аналитических, оценочных и прогнозных инструментов. Ряд авторов склоняется к тому, что динамику процессов замещения можно исследовать с использованием эконометрических инструментов (регрессионный анализ, эмпирические корреляции, кривые обучения т.п.), к ним относятся: Джамасб Т., Райт Т., Арроу К., Ромер П., Шедерхольм П., Кохлер Д., Рубин Е., Ратнер С.В. и другие. Целесообразно также использовать финансово-экономических методы для количественной и качественной оценки процессов замещения. В этом направлении можно отметить труды таких российских и зарубежных ученых, как Фюкс Р., Сендеров С.М., Васиков А.Р., Салихов Т.П., Гараев З.В., Терентьев Н.Е., Херцог А., Липман Т., Каммин Д. и другие.

Учитывая, что теоретические и методические аспекты замещения традиционных источников энергии возобновляемой энергетикой требуют дополнения и развития, представляется важным сделать это в рамках данной работы.

Цели и задачи исследования.

Целью диссертационного исследования является выявление особенностей и формирование новых научнообоснованных подходов к оценке динамики и эффективности процесса замещения традиционной энергетике возобновляемыми источниками в странах бассейна Северного моря.

Выдвинутая цель базируется на **научной гипотезе**, что рост возобновляемых технологий носит необратимый характер и уже не зависит только от породивших его причин: климатической политики, стремления снизить зависимость от импорта энергоресурсов, роста цен на углеводороды

или прогнозов истощения ископаемого сырья. Новая парадигма энергобезопасности стран БСМ будет определяться уже не столько имеющимися или импортируемыми объемами ископаемых ресурсов, сколько наличием собственных технологических прорывов в различных направлениях устойчивой энергетики, комплексно развивающихся вместе с ВИЭ.

В соответствии с обозначенной целью в работе решались следующие взаимосвязанные задачи:

1. Выявление особенностей эволюции энергетического сектора мировой экономики с позиций ведущей роли ВИЭ в процессах накопления ресурсов, интеграции, трансформации и замещения на примере стран БСМ с использованием системного и статистического анализа
2. Выявление и структурирование факторов, влияющих на динамику процесса замещения традиционных источников возобновляемыми в энергетическом секторе мировой экономики на примере стран БСМ;
3. Разработка теоретических и практических аспектов аналитического факторного подхода к оценке эффективности процессов энергетической трансформации в странах мира, апробация подхода на примере Германии;
4. Разработка теоретических и практических аспектов эконометрического подхода к оценке динамики развития новых технологий ВИЭ в странах мира на основе аппарата кривых обучения, апробация подхода на примере развивающихся морских ветровых энергоустановок (ВЭУ) Германии;
5. Разработка теоретических и практических аспектов эконометрического подхода к прогнозным оценкам динамики развития новых технологий ВИЭ в странах мира на основе аппарата кривых обучения, апробация подхода на примере новых и развивающихся технологий морских ВЭУ стран БСМ (Франция, Великобритания, Дания, Бельгия и Нидерланды).

Объектом исследования в данной работе является энергетический сектор стран бассейна Северного моря.

Предметом исследования являются особенности и динамика процесса замещения традиционных источников возобновляемыми в энергетическом секторе стран бассейна Северного моря, а также вероятные сценарии и прогнозы динамики этого процесса на среднесрочную перспективу (до 2030 года).

Описание методологии исследования Методологическая база диссертационной работы представлена совокупностью общих и специальных методов исследования. Среди общих методов исследования необходимо

выделить: анализ, синтез, дедукцию и индукцию. Среди специальных методов исследования можно выделить: экономико-статистические, экономико-математические и эконометрические методы исследования, в частности, математический аппарат кривых обучения.

Информационную базу исследования составили актуальные данные и статистика, опубликованные Международным энергетическим агентством (IEA), Международным агентством по возобновляемой энергетике (IRENA), Европейской Комиссией, Всемирным банком (World Bank), Ассоциацией Wind Europe, Ассоциацией REN21, Ассоциацией Ocean Energy Systems, компанией Bloomberg New Energy Finance, инвестиционным банком Lazard и другими организациями. Кроме этого, в работе были использованы данные, опубликованные в зарубежной и российской научной литературе, экономические исследования ведущих консалтинговых российских и зарубежных компаний, информационных агентств.

Соответствие исследования требованиям паспорта ВАК РФ

Диссертационная работа выполнена в соответствии Паспорта научной специальности 08.00.14 Мировая экономика, отрасли экономические науки, Пункта 16 - Методологические аспекты функционирования мировой экономики. Развитие мировой общехозяйственной и товарной конъюнктуры. Пункта 21 - Развитие ресурсной базы мирового хозяйства. Экономические аспекты глобальных проблем – экологической, продовольственной, энергетической. Мировозхозяйственные последствия глобальных процессов, пути и механизмы их решения.

Научная новизна диссертационного исследования состоит в том, что на основе комплексного исследования процесса замещения традиционной энергетики возобновляемыми источниками, выявлены особенности государственной политики, факторов влияния и барьеров энергетической трансформации стран бассейна Северного моря и разработаны новые подходы к оценке эффективности и прогнозированию динамики этого процесса.

Наиболее существенные новые результаты исследования, полученные лично автором и выносимые на защиту, заключаются в следующем:

1. На основе выполненного системного исследования эволюции сектора энергетики мировой экономики **выявлены** следующие особенности этого процесса, заключающиеся в том, что: под влиянием научно-технического прогресса он проходит в соответствии с экономической теорией технологических укладов; на каждом новом этапе происходит смена базовых

энергетических ресурсов; текущий уклад совпадает по времени и целям с 3-ей промышленной революцией, принятой в качестве базового плана развития экономики ЕС (стран БСМ). **Доказано**, что совместное использование различных технологий ВИЭ и накопителей энергии привело к появлению нового конкурентоспособного вида энергетических ресурсов, который можно хранить, накапливать и транспортировать, который является экологически чистым и постоянно растущим за счет инновационного энергетического развития, в отличие от неуклонно сокращающихся запасов ископаемых углеводородных ресурсов.

2. Выявлены новые тренды в процессе замещения традиционных источников энергии на ВИЭ в странах бассейна Северного моря, в частности: резкое снижение нормированной стоимости «зеленой» электроэнергии; быстрый рост доли мощности и генерации ВИЭ; значительное уменьшение доли угля, нефти и атома; высокая степень системной и рыночной интеграции ВИЭ в энергосистему стран БСМ; рост масштабов внедрения систем хранения энергии, цифровой энергетики и электрификации всех секторов экономики, что в совокупности определило ускорение энергетической трансформации на ВИЭ в странах БСМ. Тем не менее, **доказано**, что решение стран БСМ об отказе от атомных и угольных станций ближайшие годы, на фоне увеличения доли газа в энергобалансе стран, может привести к серьезным экономическим проблемам.

3. Структурированы основные факторы влияния на процессы замещения в странах БСМ, что позволило **определить** новую энергетическую политику этих стран, которая базируется на факторах влияния первого порядка - триаде энергобезопасности, энергоэффективности и климатической политики, объединенных парадигмой устойчивого развития экономики и общества. **Выявлены** новые факторы второго порядка влияния на процессы замещения в странах БСМ, к которым относятся: политика широкого вовлечения населения в «зеленую энергетику»; преодоление барьера интеграции в сети переменных ВИЭ (VRE) за счет цифровизации, различных накопителей энергии и резервных газо-турбинных установок; расширение масштабов электрификации транспорта; внедрение технологий концепции «электромобиль в сеть» (V2G); увеличение объема экспорта микросетей ВИЭ (Smart Grid) в развивающиеся страны и т.п. **Доказано**, что мультипликативный эффект и синергия выявленных факторов влияния обеспечили ускорение процессов энергетической трансформации в странах БСМ и многих государствах мира.

4. **Выявлено**, что климатическая политика стран БСМ определила переход всё возрастающих глобальных финансовых потоков от традиционной энергетики к возобновляемой за счет крупнейших частных инвесторов и банков, корпоративных закупок «зеленой» электроэнергии ведущими компаниями мира по договорам PPA (power purchasing agreements), финансовых инициатив типа RE100 или Global Divest - Invest, внедрения фискальных мер и отказа от финансирования традиционной энергетики, пересмотра бизнес - стратегий в сторону ВИЭ многими мировыми энергетическими и нефтегазовыми компаниями. **Доказано**, что объемы субсидирования ВИЭ в странах БСМ постоянно росли, однако, субсидирование традиционной энергетики также сохранялось примерно в тех же размерах, что противоречит озвученной климатической политике этих стран. **Установлено**, что быстрое снижение стоимости энергии различных видов ВИЭ ведет к тому, что в странах БСМ уже рыночная экономика, а не субсидирование, становится драйвером развития возобновляемой энергетики.

5. **Выявлена** зависимость между ростом ВИЭ в глобальном масштабе и экспоненциальным ростом потребления и стоимости ископаемых ресурсов, необходимых для производства источников и накопителей этой энергии, что обуславливает противоречия между целями «зеленой энергетики» и реальными рисками для окружающей среды. **Доказано**, что данный тренд создает новый барьер развития ВИЭ, наряду с экологической неопределенностью с биоэнергетикой, а также утилизацией элементов ВИЭ с накопителями. **Обоснована** необходимость дальнейших исследований и учета этого тренда в моделях замещения на ВИЭ в мировой экономике.

6. **Выявлено**, что оценки эффективности энергетической трансформации выполняются в странах БСМ с помощью новых моделей, демонстрирующих влияние роста ВИЭ на многие факторы: ВВП, благосостояние, занятость, международную торговлю, ущерб окружающей среде и т.д. **Разработан** аналитический подход, основанный на факторах энергетической безопасности, экономической выгоды и рациональности внедрения технологий ВИЭ в разные сектора экономики, позволяющий выполнять оценки эффективности процессов замещения в странах (регионах) мира и в РФ. **Установлено**, что развитие морской ветроэнергетики в странах БСМ по масштабам воздействия на мировую экономику может стать сравнимо с бумом шельфовой нефтегазовой индустрии, наблюдавшимся в этих же странах в прошлом веке. **Выявлена** успешная синергия оффшорной традиционной энергетики и новейших

технологий ВИЭ, которая заключается в участии нефтегазовых компаний в развитии морских ВЭУ, использовании плавучих ВЭУ для продления срока службы нефтяных месторождений и т.д., что может оказать существенное влияние на процессы замещения и политику инвесторов.

7. **Разработан** эконометрический подход к оценке текущей динамики внедрения ВИЭ на основе аппарата кривых обучения с учетом капитальных, операционных издержек и нормированной стоимости электроэнергии (LCOE). **Получены** новые данные по кривым обучения для сектора оффшорных ВЭУ, которые **подтверждают** возможность проведения оценки динамики процессов внедрения развивающихся технологий ВИЭ в условиях недостаточности статистики. Также **разработан** эконометрический подход прогноза динамики роста новых технологий ВИЭ на базе алгоритма исследования тренда динамики LCOE, уравнений кривых обучения, роста кумулятивной мощности и суммарного производства электроэнергии. Полученные новые прогнозные данные о значительном росте ресурсов развивающихся морских ВЭУ стран БСМ к 2030 году, подтвердила целесообразность его использования для среднесрочных прогнозов динамики новых технологий ВИЭ, по которым ещё отсутствует статистика.

8. На основе опыта стран БСМ **разработаны** рекомендации для Российской Федерации в части увеличения доли ВИЭ в энергобалансе страны. В частности, **предлагается** внедрить в отечественную практику «зеленые сертификаты», долгосрочные соглашения PPA, финансовые инициативы типа «RE100» и другие инструменты поддержки. Для увеличения объема использования ВИЭ на внутреннем рынке РФ **предлагается**: внедрение ВИЭ на удаленных и изолированных территориях, а также расширение микрогенерации с широким привлечением населения в просьюмеры и энергетические кооперативы. Расширение внешнего рынка ВИЭ, с учетом стратегических интересов России и возможностей её судостроительной промышленности, **рекомендуется** путем развития новых технологий плавучих ветровых ВЭУ. Для обеспечения конкурентоспособности экспорта ВИЭ, кроме имеющейся практики трансфера зарубежных технологий, **предлагается** активизация собственных НИОКР и инновационной деятельности, а также создание в стране индустрии редких и редкоземельных металлов.

Теоретическая и практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов заключается в том, что они могут быть использованы:

- для развития теоретических и ориентированных на практику подходов к моделированию и прогнозированию энергетических трендов для отдельных регионов и стран в контексте мировой экономики;
- для совершенствования подходов оценки факторов, оказывающих влияние на динамику процессов замещения традиционной энергетики возобновляемыми источниками в странах мира;
- для разработки планов и программ стратегического развития регионов Российской Федерации с учетом возможной диверсификации и трансформации энергетического сектора;
- для дополнения и совершенствования образовательных программ по специальностям "мировая экономика", "экономика энергетики".

Результаты диссертационной работы использовались Институтом Энергетической Стратегии (ГУ ИЭС) при подготовке обосновывающих материалов по развитию энергетики в изолированных и удаленных районах Российской Федерации, а также могут быть востребованы Министерством экономического развития и Минэнерго РФ.

Публикации и апробация работы

Основные результаты диссертационного исследования отражены в шести статьях автора, из которых пять, общим объемом 3,9 п. л., были опубликованы в ведущих научных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, а также были представлены докладами на Международном конгрессе «Возобновляемая энергетика XXI век: энергетическая и экономическая эффективность - RENCON» в 2016 году и на Международной научно-практической конференции Научно-исследовательского университета – Высшая школа экономики в апреле 2017 года.

Структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа содержит 36 рисунков, 15 таблиц и 8 приложений. Объем основного текста составляет 186 стр., список литературы состоит из 288 наименований, общий объем работы - 235 стр.

Введение

Глава 1. Процессы замещения традиционной энергетики возобновляемой в мировой экономике на примере стран БСМ

1.1. Процессы трансформации энергетического сектора мировой экономики и перспективы роста ВИЭ

1.2. Современное состояние, особенности и тренды энергетического сектора стран БСМ

1.3. Процессы интеграции, трансформации и замещения в энергетическом секторе мировой экономики на примере стран БСМ

Глава 2. Факторы влияния на процессы замещения традиционной энергетики возобновляемой в мировой экономике на примере стран БСМ

2.1. Факторы влияния первого порядка - государственная энергетическая политика стран БСМ

2.2. Факторы влияния второго порядка на трансформацию энергетического сектора стран БСМ

2.3. Барьеры и неопределенности в процессах замещения энергетического сектора стран БСМ

Глава 3. Оценки эффективности процесса трансформации энергетического сектора мировой экономики на примере стран БСМ

3.1. Аналитический факторный подход к оценке динамики и эффективности процессов энергетической трансформации в странах мира

3.1.1. Факторы - индикаторы справедливых оценок эффективности процессов трансформации в энергетическом секторе мировой экономики

3.1.2. Обоснование и апробация аналитического факторного подхода оценки динамики и эффективности процессов замещения в странах мира на примере Германии

3.2. Обоснование и апробация эконометрического подхода к оценкам и прогнозам роста возобновляемых ресурсов в странах мира на базе кривых обучения

3.2.1. Эконометрический подход оценки динамики развития новых технологий ВИЭ на примере морской ветроэнергетики стран БСМ

3.2.2. Эконометрический подход прогнозных оценок роста возобновляемых ресурсов на примере морской ветроэнергетики стран БСМ

3.3. Перспективы повышения эффективности развития рынка ВИЭ в России с учетом опыта стран БСМ

Заключение

Список литературы

Приложения

Основное содержание и результаты работы, выносимые на защиту

В рамках решения первой научной задачи на защиту выносятся результаты анализа эволюции энергетического сектора мировой экономики с позиций всё возрастающей роли ВИЭ , а также оценки современного состояния топливно-энергетических комплексов стран БСМ и выявленные основные особенности процессов интеграции и замещения при переходе к новой глобальной устойчивой технологической энергетике на примере стран БСМ

На основе проведенного в диссертации системного исследования выявлено, что под влиянием факторов научно-технического прогресса эволюция глобальной энергетики проходила в соответствии с экономической теорией технологических укладов, с доминированием на каждом новом этапе использования новых энергетических ресурсов - воды, угля, нефти, атома или газа. Текущий 5-ый технологический уклад совпадает по времени и целям с 3-ей промышленной революцией, концепция которой, разработанная экономистом Д. Рифкиным (США), была принята в качестве базового плана развития экономики Европейского Союза и стран БСМ. Стержнем этой концепции является цифровая энергетика, позволяющая децентрализацию производства - потребления энергии, а также дающая возможность людям самим генерировать электроэнергию дома и продавать её. Основными ресурсами становятся природный газ и технологии возобновляемой энергетики. Уже начался переход к 6-му укладу, в рамках которого прогнозируется ускоренное развития ВИЭ и накопителей энергии, технологий «Интернета вещей», электрификации транспорта и т.п., что совпадает с концепцией 4-ой промышленной революции, разработанной президентом Всемирного экономического форума в Давосе К. Швабом. Эти обстоятельства, совместно с экологическими угрозами от использования углеводородного сырья, обусловили в странах БСМ и в мировой экономике процессы замещения традиционной энергетики технологиями ВИЭ и переход к новой технологической энергетике.

Доказано, что совместное использование ВИЭ и накопителей энергии привело к появлению нового вида экологически чистых энергетических ресурсов, постоянно возрастающих за счет развития новых видов технологий, и которые возможно долговременно хранить и транспортировать также, как и быстро сокращающиеся запасы ископаемых ресурсов. В 2018 году глобальная кумулятивная мощность СЭС уже превысила 486 ГВт, что стало почти в 85 раз больше, чем в 2005 году, а мощность ВЭУ в мире выросла до 564 ГВт. К началу 2019 года мощность ВИЭ в мировой экономике достигла 2 351 ГВт, из которых около 50% приходится на большую гидроэнергетику.

С целью выявления трендов в процессе замещения традиционных источников энергии на ВИЭ был выполнен анализ современного состояния ТЭК стран БСМ, показавший, что в Германии величина первичной энергией в 2018 году достигала 298 Мт.н.э. Из них, около 6,6 % (19,8 Мт.н.э.) было обеспечено атомом, 22,5% углем, 32,8% нефтью и 23,9% натуральным газом,

что стало, соответственно, на 50,2%, 47,8% и 19,4% меньше, а по газу на 30,7% больше, чем в 1990 году (Табл.1).

Таблица 1

Ресурсы первичной энергии стран БСМ

Первичные энерго ресурсы Мт.н.э.	Германия			Великобритания		
	1990	2016	2018	1990	2016	2018
Уголь	128,6	77,2	67,1	63,1	11,8	7,99
Натуральный газ	55,0	70,3	71,5	47,2	69,4	67,9
Нефть	121,4	101,4	97,9	76,4	60,7	60,6
Атом	39,8	22,0	19,8	17,1	18,7	16,9
Гидроэнергия	1,5	1,8	1,55	0,46	0,46	0,47
Биотопливо и отходы	4,8	30,7	30,0	0,626	12,1	15,2
Солнце, ветер и другие ВИЭ	0,017	11,0	14,8	0,012	4,2	6,1

Составлено автором по данным: Сайт International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/countries/Germany> ; URL: <https://www.iea.org/countries/United%20Kingdom> (дата обращения 12.08.2019)

За этот же период объем первичной энергии от различных ВИЭ увеличился в 871 раз. В производстве электроэнергии также использовались значительные объемы ископаемого топлива, так, в 2018 году доля угля составляла 40,2%, природного газа - 14,1%. С 2000 по 2018 год производство электроэнергии от солнца увеличилось в 670 раз, а от ветра в 11,9 раз. Уже к 2016 году доля установленной мощности СЭС достигла 20%, а ВЭУ- 24%, при мощности всех электростанций страны 208,5 ГВт. А доля АЭС снизилась до 5%, и доля ТЭС на 25%. К началу 2019 года кумулятивная мощность СЭС Германии выросла уже до 45,9 ГВт, а ВЭУ до 59,4 ГВт. В 2018 году ВИЭ совокупно обеспечили 40% генерации электроэнергии, а к 2030 году планируется уже 65%. Достижения Германии оказывают решающее влияние на процессы замещения в странах ЕС и во всем энергетическом секторе мировой экономики.

Аналогичные статистические исследования трендов использования различных ресурсов в производстве первичной энергии и электроэнергии, а также динамики установленной мощности традиционных и возобновляемых источников, были проведены в остальных странах БСМ, что доказало активизацию процессов замещения в этих странах. Как и в Германии, с 1990 по 2018 год во всех странах БСМ (кроме Нидерландов) в производстве первичной энергии выявлено снижение использования угля на 55-88% и нефти на 16-20%, а также снижение объемов углеводородов в электроэнергетике. Было установлено, что рост ВИЭ в странах БСМ характеризуется высокой степенью динамики. Так, с 1990 по 2018 год первичная энергия от ВИЭ в

Великобритании увеличился в 508 раз (таб.1) и в Бельгии в 253 раза, а во Франции производство электроэнергии от солнца с 2000 года увеличилось в 2400 раз и от ветра в 594 раза.

Было выявлено, что в странах БСМ доля ископаемого топлива ещё велика. Так, в производстве первичной энергии в 2018 году нефть и газ составили, соответственно, в Великобритании - 34,6% и 38,3%, в Бельгии - 40% и 29%, в Нидерландах - 42,6% и 35,5%. С 1990 года рост доли природного газа к 2018 году достиг во Франции, Великобритании и Дании 41%, 44% и 46%, а в Бельгии – 82%. Во Франции и в Бельгии ещё большая доля атомной энергии, составившая в производстве электроэнергии в 2018 году - 72% и 38,1%. Но, несмотря на это, страны БСМ решили в среднесрочной перспективе полностью отказаться от использования угля, нефти и атома. Выполненный анализ доказал, что это может привести к серьезным проблемам для экономики и энергетики этих стран, и потребует значительного увеличения использования природного газа и импорта электроэнергии.

В диссертации выявлены особенности рыночной и системной интеграции ВИЭ в странах БСМ в единую энергосистему для обеспечения оптимального баланса между возобновляемой и традиционной энергетикой. Этому процессу способствовало большое число политических решений, включая Директиву 2009/28/ЕС, определившую цели на 2020 год: снижение выбросов CO₂ на 20%, увеличение доли ВИЭ в конечном потреблении энергии до 20% и повышение энергоэффективности на 20%. Важное значение имели различные меры государственной поддержки: компенсационные закупочные тарифы (feed-in-tariff), субсидии, льготные кредиты и гранты, налоговые льготы и т.п. Было установлено непрерывное снижение стоимости электроэнергии (LCOE) от ВИЭ, которая, например, для СЭС с 2010 года по 2016 год, снизилась на 69%. Это позволило основным видам технологий ВИЭ уже стать конкурентоспособными с традиционной энергетикой. Выявлены новые тренды системной интеграции: внедрение интеллектуальных электросетей и автономных ВИЭ распределенной генерации; развитие технологии производства газа из воды (P2G), повышение гибкости энергосистем с ВИЭ путем использования цифровизации, резервных газотурбинных установок и накопителей энергии: начало широкой электрификации различных секторов экономики. При этом, инвестиции в цифровую энергетику росли примерно на 20% ежегодно.

Выполненные исследования подтвердили выдвинутую автором научную гипотезу, что новая парадигма энергобезопасности стран БСМ и мира будет определяться уже не столько имеющимися объемами ископаемых ресурсов, сколько наличием собственных технологических прорывов в возобновляемом и традиционном секторах устойчивой энергетики,

В рамках второй научной задачи на защиту выносятся результаты систематизации и анализа факторов, влияющих на динамику процесса замещения традиционной энергетики возобновляемой в энергетическом секторе мировой экономике на примере стран БСМ.

В диссертации были выявлены, структурированы и исследованы наиболее значимые факторы, влияющие на динамику процесса замещения в странах БСМ и мира. К факторам 1-го порядка была отнесена политика энергобезопасности ЕС, направленная на снижение энергозависимости, составившую в 2018 году по нефти - 90%, природному газу - 69% и углю - 42%. На импорт природных ресурсов страны ЕС ежедневно расходуют около 1,0 млрд. евро. Анализ хронологии и содержания основных документов нормативно-правовой базы ЕС, направленных на повышение энергобезопасности, подтвердил их ведущую роль в быстром росте «зеленой» энергетики. Это позволило странам БСМ сменить главную цель - достижение доли ВИЭ в конечном энергопотреблении, с 20% в 2020 году до 35 % к 2030 году, что должно сократить использование углеводородного топлива с 71% до 54%.

Другим важнейшим фактором была определена политика энергоэффективности ЕС, направленная на уменьшение затрат энергии, что также позволяет снизить импорт ресурсов и улучшить окружающую среду. Исследование показало, что Директивы ЕС по повышению энергоэффективности зданий (EPBD), по минимизации энергопотребления сооружений (nZEB), по мерам экономии при генерации, передаче и потреблении энергии во всех секторах экономики обеспечили ускорение энергетической трансформации в странах БСМ. Страны ЕС планируют к 2030 году повышение энергоэффективности до 33%, экономию расходов на топливо от 175 до 320 млрд. евро в год и достижение к 2050 году нулевого потребления энергии всеми зданиями.

Ещё к одному фактору 1-го порядка была отнесена климатическая политика ЕС, направленная на предотвращение глобального изменения климата путем развития ВИЭ и отказа от углеводородной энергетики. Страны ЕС решили сократить выбросы парниковых газов на 20% к 2020 году и уже на 40% к 2030

году по сравнению с уровнем 1990 года. Рассмотрение задач климатической конференции ООН – COP21 (Париж, 2015), где около 200 стран приняли соглашение об ограничении глобального потепления температурой 2°C, показало, что, в отличие от экономического механизма Киотского протокола (COP3, 1997) с его обязательствами по снижению выбросов, теперь это будет определяться планами стран добровольно. Анализ результатов последующих климатических конференций в 2016 - 2018 гг. (Марокко, Париж, Бонн, Катовицы) позволил определить новые важные для ускорения глобальной энергетической трансформации решения: о вводе «налога на ущерб климату» за добычу ископаемых ресурсов; об отказе многих компаний и организаций, во главе с Всемирным Банком, финансировать разработки нефтегазовых месторождений; об учреждении Альянса стран, отказывающихся от использования угля и многое другое. Страны БСМ стали лидерами климатической политики, однако, заявление США о намерении выхода из соглашения COP21 внесло неуверенность в планы ряда государств.

В экологически ответственной мировой экономике все большую роль стала играть концепция устойчивого развития, подразумевающая, что деятельность человечества должна удовлетворять свои потребности, не подрывая такие же возможности будущим поколениям и не оказывая разрушительного воздействия на экосистему планеты. Исследование задач глобального устойчивого развития, определенных на 15 лет вперед конференцией ООН (2015, Нью-Йорк), показал, что они легли в основу энергетической политики ЕС (стран БСМ) перехода от ископаемого топлива к использованию низкоуглеродных ресурсов во всех секторах экономики, что вызвало ускоренный рост различных технологий ВИЭ. Всемирный банк и Европейский банк реконструкции и развития стали использовать в энергетическом секторе «истинные нормы инвестиций», учитывающие ущерб от истощения месторождений, уничтожения лесов и других природных ресурсов, а также социальные аспекты, связанных с благосостоянием и здоровьем населения.

Выполненный анализ позволил определить факт сформировавшейся «триады» новой энергетической политики ЕС, возглавляемой странами БСМ, включающей в себя рассмотренные факторы 1-го порядка, объединенные парадигмой устойчивого развития экономики и общества. Эта политика была принята многими странами мира, что обеспечило ускорение глобальной энергетической трансформации (рис.1).

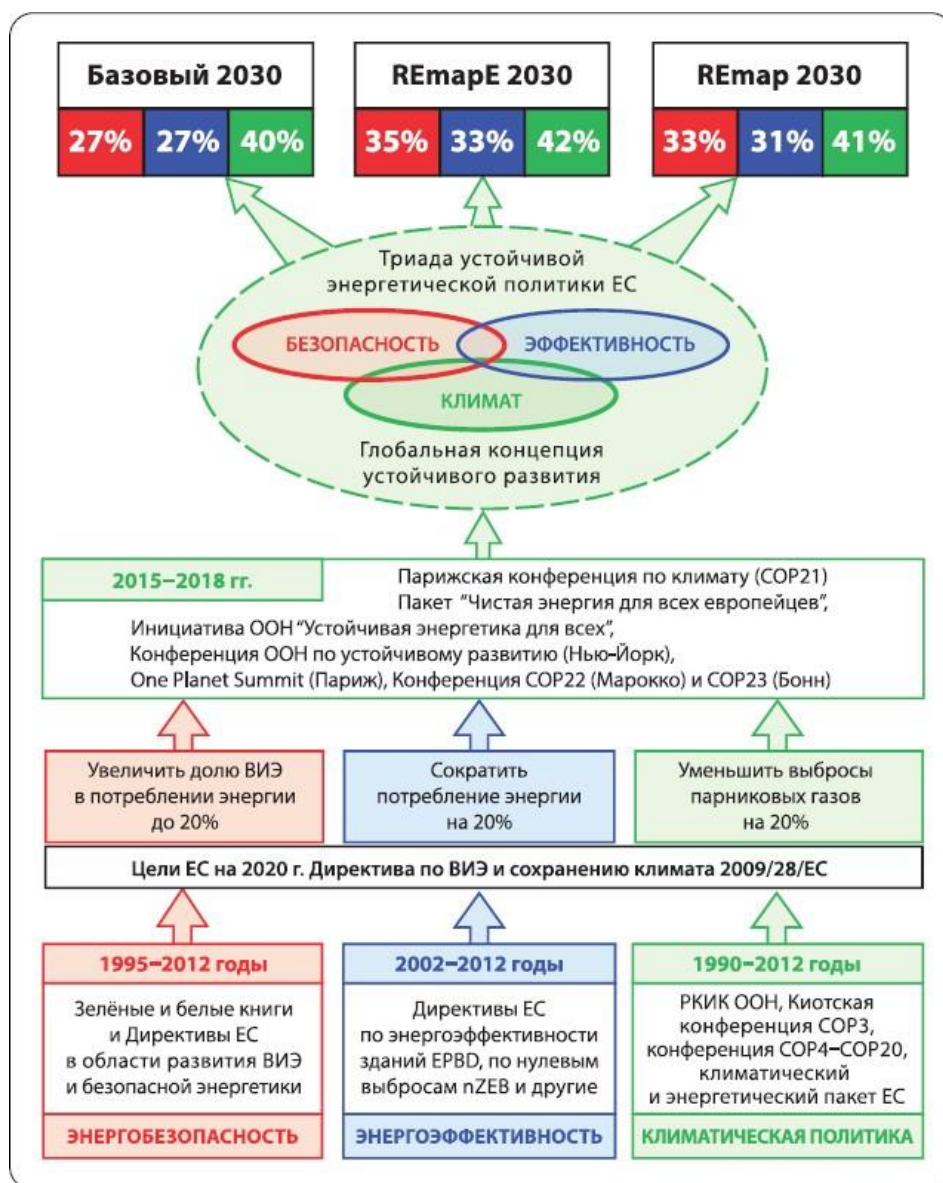


Рисунок 1 - Триада новой энергетической политики ЕС (стран БСМ)
Составлено автором

В диссертации также выделены и подробно исследованы различные экономические, политические, энергетические и другие факторы 2-го порядка, влияющие на процесс замещения. К важнейшему фактору был отнесен экологический - допустимого уровня глобального потепления, от достоверности которого полностью зависят политические и финансовые решения трансформации энергетического сектора мировой экономики. В 2018 году Межправительственная группа экспертов по изменению климата ООН объявила, что если не принять срочных мер, то «точка невозврата», после которой глобальное потепление уже нельзя будет остановить, может быть достигнута уже менее, чем через 15 лет. Для ограничения роста глобальной температуры к 2030 году величиной $1,5^{\circ}\text{C}$, понадобится \$460 млрд. ежегодных инвестиций. Рост ВИЭ, необходимый для предотвращения потепления, меняет

макроэкономическую логику на рынке углеводородов, так как ведет к ограничениям со стороны спроса и снижению цен на них. С целью обеспечения нулевых выбросов к 2050 году, в ЕС была утверждена стратегия полной электрификации за счет достижения 100% доли использования ВИЭ во всех секторах экономики.

В работе было показано, что развитие ВИЭ в странах БСМ и мире финансово поддерживалось государством. Например, только глобальный рынок «зеленых» облигаций увеличился с 2013 года в 17 раз до \$ 163 млрд. в 2017 году. Субсидирование ВИЭ в ЕС выросло с 29 млрд. евро в 2008 году до 75 млрд. евро в 2016 году, но в диссертации было установлено, что в странах БСМ в равном объеме продолжалось субсидирование углеводородной энергетики (Рис. 2), несмотря на собственные призывы отказаться от неё в климатических целях.

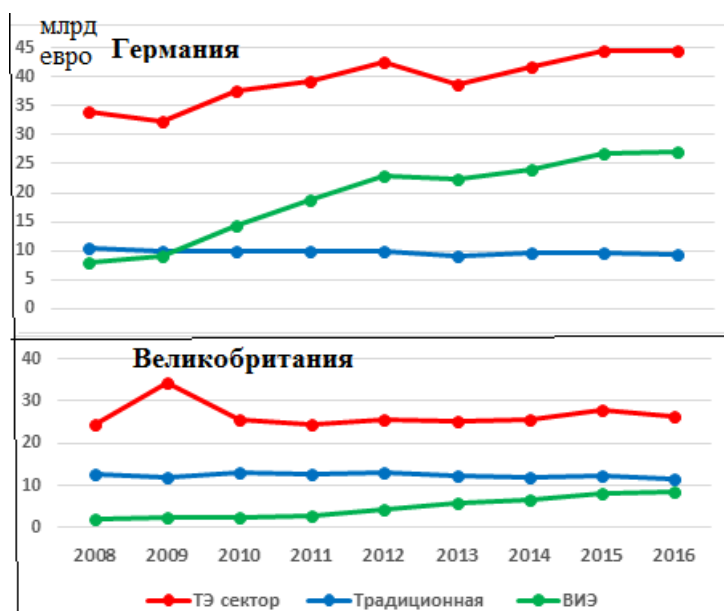


Рисунок 2 - Динамика субсидирования энергетического сектора (красный), традиционной энергетики (синий) и ВИЭ (зеленый) в Германии и в Великобритании
Составлено автором по данным: Study on energy prices, costs and subsidies and the irimpacton industry and households.URL://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d7c9d93b-1879-11e9-8d04-01aa75ed71a1/language-en (дата обращения 09.08.2019):

На рынках ВИЭ все чаще стали использоваться тендеры и аукционы, что позволило планировать к 2030 году в странах БСМ вложение в проекты ВИЭ, общей мощностью до 60 ГВт, более 52 млрд. евро без субсидирования. На основании этого определено, что в странах БСМ уже рыночная экономика, а не государственная поддержка, становится драйвером дальнейшего развития возобновляемой энергетики.

Выполненный в диссертации анализ показал быстрое снижение LCOE различных видов ВИЭ, обусловленное с непрерывным совершенствованием их технологий, чему способствует инновационная международная кооперация при взаимодействии государства, науки и бизнеса. Наиболее важным для становления «зеленой» энергетики стран БСМ стал начальный период 2007 - 2013 годов, когда по плану SET выполнялось целевое инвестирования НИ ОКР различных технологий ВИЭ объемом 7,2 млрд. евро. К 2018 году значения LCOE ВЭУ и СЭС большой мощности упали до \$29 - 56/МВт-ч и до \$36 - 46/МВт-ч соответственно, при этом, нижняя граница интервала LCOE угольных электростанций составляла \$60 /МВт-ч и парогазовых - \$58 /МВт-ч. Уже часто экономически выгодней становится внедрять новые проекты «зеленой» энергетики, чем создавать электростанции на ископаемом топливе.

В работе установлено, что глобальные инвестиции в возобновляемую энергетику к 2018 году достигли 2,9 трлн. евро, и она стала уже зрелым сектором мировой экономики (Табл. 2).

Таблица 2

Динамика инвестиций в ВИЭ мировых лидеров за период 2005-2017 годы

Инвестиции млрд.евро (%)	2005	2007	2009	2011	2013	2015	2017
Глобальные	76,6	158,5	180	281,9	233,7	313,5	290,2
Европа	33,8 (44)	65,4 (41,2)	79,4 (44,1)	119,9 (42,5)	61,1 (26,1)	64,2 (20,5)	49,9 (17,2)
Китай	7,7 (10)	14,6 (9,2)	33,7 (18,7)	44,8 (15,9)	58,2 (25)	109 (35)	115,4 (40)
США	14,4 (19)	40,1 (25,3)	30,5 (17)	54,2 (19,2)	38,8 (16,6)	50,1 (16)	49,5 (17)

Составлено автором по данным источника: Clean Energy Investment Trends.

URL <https://data.bloomberglp.com/bnef/sites/14/2018/07/BNEF-Clean-Energy-Investment-Trends-1H-2018.pdf> (дата обращения 12.11.2018)

Однако, если с 2005 году мировым лидером по инвестициям в ВИЭ являлся ЕС, то уже с 2013 года первое место постоянно занимает Китай, вложивший в «зеленую» энергетику только в 2017 году 115,4 млрд. евро и оттеснивший ЕС (страны БСМ) на второе место. При этом глобальные инвестиции в новые мощности ВИЭ в 2017 году стали в три раза больше инвестиций в проекты генерации на ископаемом топливе.

В диссертации определен новый фактор влияния - переход всё возрастающих глобальных финансовых потоков от традиционной энергетики к возобновляемой за счет крупнейших банков и частных инвесторов (У. Баффета,

М.Блумберга, Б.Гейтца и т.д.) ; закупок «зеленой» электроэнергии ведущими компаниями мира по договорам PPA (Microsoft , Facebook, JP Morgan и т.п.); финансовых инициатив типа RE100 или Global Divest-Invest; пересмотра бизнес - стратегий в сторону ВИЭ многими ведущими энергетическими и нефтегазовыми компаниями (Dong Energy, Vitol Group, BP, Shell , Total и т.д.).

Наиболее серьезным препятствием интеграции переменчивых ВИЭ (VRE) в энергосистемы являлся их нестабильный характер генерации, связанный с изменением погодных условий. В диссертации выявлено, что уже найдены эффективные меры повышения гибкости сетей за счет цифровизации, резервных газовых установок и накопителей энергии. Это позволило поддерживать параметры сети с VRE более точно, чем с любыми другими источниками генерации и обеспечило уверенный рост доли переменчивых ВИЭ в производстве электроэнергии стран БСМ (Рис.3).

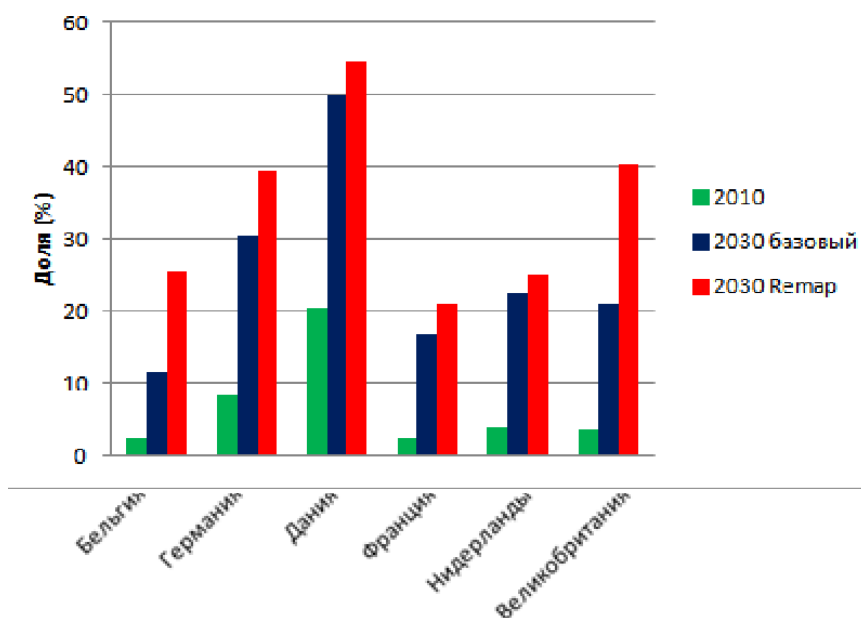


Рисунок 3 - Доля переменной возобновляемой энергии в производстве электроэнергии в странах БСМ в 2010 году и в 2030 по базовому сценарию и сценарию Remap
Составлено автором , источник: Renewable Energy Prospects for the European Union (REmap EU).
URL:https://www.irena.org/-media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Feb/IRENA_REmap_EU_2018.pdf (дата обращения 11.10.2018)

В работе определено особое значение электрификации транспорта, позволяющее формировать распределенные хранилища энергии на базе концепции «автомобиль-сеть» (V2G). Установлено, что новым фактором влияния стала политика вовлечения населения в совместное владение ВИЭ и процессы спроса - потребления энергии путем создания энергетических кооперативов, сообществ просьюмеров и «зеленых умных городов» (SRC), что

ведет к всестороннему изменению социального уклада. Выявлено, что расширение странами БСМ экспорта технологий ВИЭ и автономных микросетей (Smart Grid) среди сообществ развивающихся стран и островных государств позволит в ближайшие 20 лет приблизиться к решению проблемы всеобщей электрификации человечества.

В диссертации доказано, что факторы 2-го порядка (рис.4) дают



Рисунок 4 - Совокупное влияние факторов второго порядка на динамику процессов замещения традиционной энергетики возобновляемыми источниками в странах БСМ
Составлено автором

дополнительное ускорение динамике процессов замещения, а их синергия обеспечивает кумулятивные и мультипликативные эффекты экспоненциального роста технологий и ресурсов ВИЭ в странах БСМ и мировой экономике.

Выполненные исследования показали, что на пути оптимистичного развития процесса замещения появились новые неопределенности и барьеры, значимость которых возрастает по мере расширения масштаба внедрения ВИЭ. Так, по расчетам европейских специалистов, биотопливо может выделять больше CO₂, чем любое ископаемое топливо. Развитие биоэнергетики связано с изменением землепользования, потреблением огромных объемов сельскохозяйственной и лесной биомассы, что может нанести значительный ущерб окружающей среде.

В диссертации выявлено, что новым препятствием для расширения внедрения ВИЭ в странах БСМ и глобальном масштабе может стать проблема с необходимостью для этого добычи и переработки огромных объемов различных ископаемых ресурсов. По оценкам Всемирного банка и ряда ученых стран БСМ, потребуются десятки миллионов тонн меди, свинца, цинка, алюминия и миллиарды тонн железа, а также множество цветных и редких металлов - серебра, индия, лития, кобальта, неодима и диспрозия. Может сложиться парадоксальная ситуация, когда рост ВИЭ с целью предотвращения климатической катастрофы, приведет к значительному ущербу окружающей среде. Этот барьер, наряду с проблемой утилизацией элементов ВИЭ с накопителями, требует дополнительных исследований, которые должны быть рассмотрены при моделировании энергетического перехода в мировой экономике полностью на ВИЭ.

В рамках третьей научной задачи на защиту выносятся разработанный автором аналитический факторный подход к оценке эффективности процессов энергетической трансформации в странах мира.

В последние годы стали использоваться новые многофакторные модели оценок эффективности процессов энергетической трансформации в мировой экономике, где на передний план выходят различные экономические и социальные «справедливые» факторы. На основе данных одного из первых в мире подобного исследования Международного агентства IRENA и других источников, в диссертации было выявлено причины и степень влияния глобального роста ВИЭ на главные факторы оценок моделирования: ВВП, благосостояние, занятость и международную торговлю. Например, было показано, что рост доли ВИЭ к 2030 году до 36% в мировом потреблении

энергии по сценарию полной электрификации дорожной карты развития ВИЭ (REmapE) может увеличить глобальный ВВП на \$1,3 трлн. и, аналогично, обеспечит значительные выгоды по другим факторам-индикаторам (табл.3).

Таблица 3

Основные макроэкономические оценки эффективности процессов замещения традиционной энергетики на ВИЭ

Глобальные факторы-индикаторы	Сценарий RE map 2030 год		СценарийREmapE 2030 год	
	Величина	Проценты	Величина	Проценты
Внутренний валовый продукт (рост)	На \$706 млрд.	На 0,6%	На \$1,1 трлн.	На 1,1%
Благосостояние	---	На 2,7%	---	На 3,7%
Занятость населения	На 10,9 млн. чел.	На 44,8%	На 9,3 млн. чел	На 41%
Импорт ископаемого топлива (снижение)	На \$104 млрд.	---	На \$181 млрд.	---

Составлено автором. Источник: Renewable Energy Benefits: Measuring the Economics. IRENA. URL: https://www.irena.org/documentdownloads/publications/irena_measuring-the-economics_2016.pdf (дата обращения 10.01.2018)

Модель ЕЗМЕ, использованная IRENA, отличается сложным алгоритмом, необходимостью иметь обширные данные статистики и экспертных мнений. С целью выполнения оценок эффективности процессов замещения, в диссертации были разработаны теоретические аспекты нового упрощенного подхода на базе анализа факторов результативности (энергетической безопасности) и экономической выгоды внедрения технологий ВИЭ, а также фактора рациональности их использования в экономике страны за определенный период.

Для апробации подхода была выбрана Германия - лидер энергетического перехода в странах БСМ и в мировой экономике. Более 70 % потребляемой энергии страны обеспечивается за счет импорта ископаемых ресурсов и с целью снижения энергетической зависимости быстро растет производство электроэнергии от ВИЭ (до 41,5% в 2018 году). Однако, по закону о ВИЭ (EEG) в Германии потребители обязаны платить на их развитие, что определяет рост стоимости электроэнергии и совместно с расходами, связанными с сетевой интеграцией ВИЭ, не позволяет однозначно оценивать эффективность процесса замещения.

Разработанный подход был использован для аналитического исследования этого процесса в экономике Германии с 2012 по 2016 год, когда ряд экспертов в стране стали отрицать перспективу перехода на ВИЭ.

Первоначально определяется динамика фактора-индикатора результативности (IS) с учетом расчетов индексов Херфиндаля - Хиршмана долей стран - импортеров в общей стоимости импорта, а также долей источников энергии в балансе страны. Далее, по отношению затрат на энергию (CE) к ВВП (GNP) в расчете на душу населения определяется индикатор рациональности замещения (IR). Индикатор экономической выгоды (IE) рассчитывается по доходам и расходам, связанных с развитием ВИЭ, - для секторов электроэнергетики (РВИЭ) по данным четырех независимых сетевых операторов Германии и для домашних хозяйств (ЕДХ), с учетом их расходов на потребление энергии, расходов на электроэнергию и доплат на ВИЭ.

Результаты апробации подхода показали высокий уровень развития ВИЭ в Германии, но экстенсивный характер процесса замещения за рассматриваемый период, так как темпы роста индикатора результативности (IS) были ниже темпов роста индикаторов экономической выгоды (IE) и рациональности (IR). Это означает не достижение тогда ещё главной цели энергетической трансформации страны - повышение энергетической безопасности, что можно объяснить расходами операторов, связанными с необходимостью частого вмешательства в работу энергосистемы страны с переменчивыми ВИЭ, плохой погодой для них в 2016 году и расходами немецких домохозяйств на «зеленую» энергетику. Подтверждено, что новый подход позволяет выполнять оценки эффективности процессов замещения в энергетике регионов и стран мира, в том числе и в России.

В рамках четвертой научной задачи на защиту выносятся разработанный автором эконометрический подход к оценке динамики развития новых технологий ВИЭ в странах мира на основе аппарата кривых обучения

На основании выполненного анализа установлено, что одним из основных трендов в странах БСМ является электрификация всех секторов экономики и что для решения этой задачи ведущими стали ветровые технологии, а среди них лидерами становятся имеющие огромный потенциал в Северном море новые и развивающиеся морские ВЭУ. Достигнув зрелости, подобные ВИЭ за счет роста своих ресурсов могут оказать существенное влияние на процессы замещения, но оценки нормированной стоимости электроэнергии (LCOE) и динамики развития подобных технологий, необходимые для снижения рисков потенциальных инвесторов, обычными методами выполнить затруднительно из-за недостатка данных.

Для решения этой задачи автором был разработан новый эконометрический подход на базе кривых обучения (experience curve), однофакторную версию которых можно представить логарифмическим уравнением зависимости себестоимости производимой энергии (Y) от накопленной мощности (X). По мере развития технологии ВИЭ происходит наращивание суммарной мощности и в соответствии с кривой обучения, происходит снижение издержек. Выполненный анализ теории аппарата кривых обучения, представленной в трудах экономистов К.Эрроу, П. Ромера, Т.Райта, Т. Джамбса и других, показал, что наиболее точные оценки можно получить, используя двухфакторную версию кривой с учетом издержек на исследования и разработки (НИОКР) в качестве второго фактора. В основу нового подхода автором работы была положена эконометрическая модель «Time model» Международного Энергетического Агентства (IEA) для оценок морских ВИЭ, где в качестве показателя себестоимости (Y), который определяет конкурентоспособность технологий, используется стоимость электроэнергии LCOE, рассчитываемая по капитальным, операционным издержками (CAPEX, OPEX) и другим параметрам. Модификация исходной модели «Time model» заключается в упрощении общего алгоритма оценок, в первую очередь в части определения зависимости снижения величин CAPEX и OPEX со временем, по данным динамики первоначальных инвестиций в реальные проекты исследуемой технологии ВИЭ. Далее по полученным данным рассчитываются значения издержек LCOE на разные годы исследуемого периода, а затем по ним и статистике динамики генерации рассматриваемой технологии ВИЭ выполняется построение для неё кривых обучения, определяющих процессы замещения. В оптимальном варианте эти кривые могут оцениваться по двухфакторной версии в системе двух уравнений на основе трех временных рядов: издержки LCOE, инвестиции в НИОКР и кумулятивной установленной мощности.

Апробация подхода была выполнена на примере развивающихся морских ВЭУ Германии за период с 2011 по 2017 год, когда редкие оценки показателя LCOE для них отличались количественным и временным разбросом, не позволяющим выполнить статистическое построение кривой обучения. Расчеты по данным первичных инвестиций для ряда внедренных в разные годы проектов морских ВЭУ, позволили определить параметры функциональной модели динамики снижения издержек CAPEX, OPEX и LCOE для разных сценариев (мин, макс и сред.). Далее, по данным LCOE и генерации оффшорных

ВЭУ в Германии были построены уравнения и графики однофакторных кривых обучения для этой технологии ВИЭ (Рис.5).

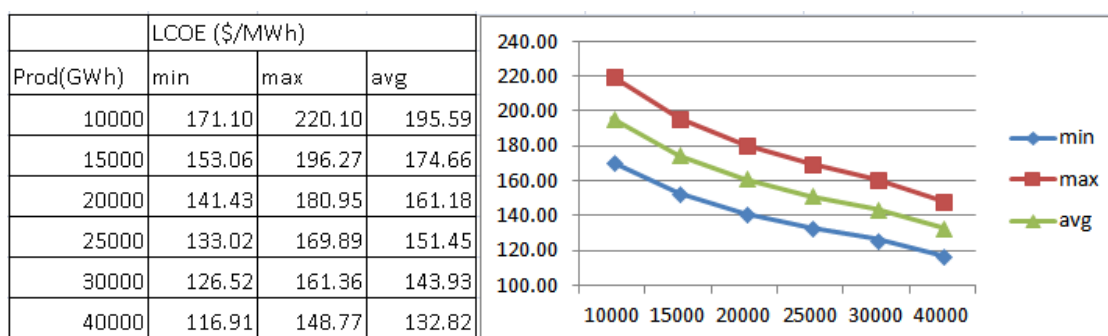


Рисунок 5 – Кривая обучения для технологий оффшорных ВЭУ в Германии

По абсциссе – производство энергии морскими ВЭУ в ГВт-ч, по ординате – LCOE (\$/МВт-ч)
Источник: Расчеты автора.

Также был рассчитан тренд LCOE морских оффшорных ВЭУ всех стран БСМ до 2030 года, необходимый для прогноза роста таких ресурсов. На рисунке в таблице приведена статистика по генерации морских ВЭУ и полученные данные LCOE для всех сценариев, а справа представлены построенные по этим данным кривые обучения. Значения LCOE оказались близки к предположениям ряда авторитетных экспертов, например, компании Ernst & Young et Associés (\$128/ МВт-ч на 2017 год), что подтверждает результативность разработанного подхода. Оцененные коэффициенты обучения LR в среднем равны 17,5% , что показывает уверенное снижение стоимости электроэнергии LCOE оффшорных ВЭУ при росте объема генерации, но более медленно , чем у зрелых технологий береговых ВЭУ (LR -30%). Разработанный подход не является статистическим исследованием, а представляет собой интервальную модель с включением эконометрических инструментов. При этом, динамика LCOE развивающихся технологий ВИЭ строится по нескольким точкам (годам), подобно методике инвестиционного банка LAZARD. Полученные результаты подтвердили целесообразность использования подхода для оценки динамики замещения традиционной энергетики развивающимися технологиями ВИЭ в условиях недостаточной статистики.

В рамках пятой научной задачи на защиту выносятся разработанный автором эконометрический подход к прогнозным оценкам динамики развития новых технологий ВИЭ в странах мира на основе аппарата кривых обучения.

В мировой экономике постоянно появляются и развиваются новые технологии ВИЭ, например, плавучие ВЭУ и СЭС , гибридные установки и

другие. Для исследования процессов энергетической трансформации важно знать ожидаемую долю подобных возобновляемых ресурсов в топливно-энергетических балансах стран. В диссертации был обоснован новый эконометрический подход, позволяющий в среднесрочной перспективе оценить динамику роста ресурсов технологий ВИЭ, для которых ещё не существует достаточно данных, чтобы использовать известные методы энергетических прогнозов. В основе этого подхода лежат разработанные в рамках решения четвертой задачи теоретические предпосылки. Кривая обучения не имеет прямой привязки ко времени, что потребовало для прогнозных оценок теоретической доработки её использования одновременно с учетом динамики LCOE.

При использовании в разработанном подходе однофакторной модели кривой обучения, на первом этапе, с помощью уже рассмотренного подхода или иным способом, выполняется оценка тренда LCOE исследуемой технологии ВИЭ. На втором этапе выполняется оценка производственной функции типа Кобба - Дугласа, которая для технологий ВИЭ определяется зависимостью объема производства электроэнергии (PROD) от суммарной установленной мощности (POW). Третьим шагом является оценка кривой обучения, для чего нужны данные об LCOE и о динамике выработки электроэнергии (PROD). На последнем этапе выполняются прогнозные оценки динамики суммарной установленной мощности (POW) и величины выработки энергии (PROD) исследуемой технологии ВИЭ до заданного момента времени в будущем.

С целью апробации подхода был выполнен прогноз развития только выходящих на рынок новых технологий плавучих ВЭУ во Франции. Анализ данных по ряду планируемых к вводу проектов позволил выполнить расчет предполагаемой динамики LCOE этой технологии ВИЭ в странах БСМ с 2017 по 2030 годы. Сведения о мощности проектов плавучих ВЭУ Франции были собраны по годам и по ним, с помощью производственной функции, были получены данные об предполагаемых объемах генерации, на основании которых по уравнениям прогноза динамики LCOE были оценены кривые обучения. Полученные уравнения кривых обучения и производственных функций, соответствующие различным сценариям развития ВИЭ, а также значения LCOE на 2030 год, позволили дать прогнозные оценки выработки электроэнергии (3,0 и 9,5 ТВт·ч) и кумулятивной мощности (1,8 и 5,3 ГВт) для плавучих ВЭУ Франции на 2030 год (Рис.6).

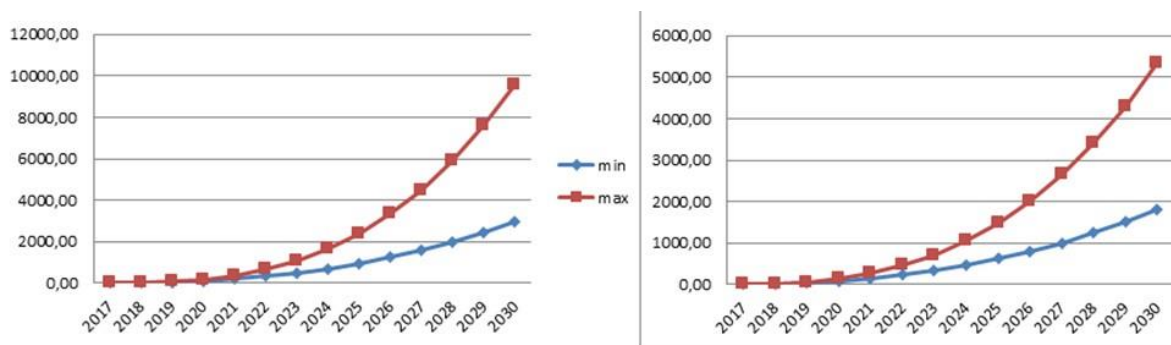


Рисунок 6 - Прогнозы для технологии плавучих ВЭУ Франции. На графике слева приведена динамика роста производства электроэнергии (ГВт-ч), на графике справа - динамика роста суммарной установленной мощности (МВт)
 Рассчитано и составлено автором

Подобные же прогнозные оценки до 2030 года были выполнены для роста ресурсов выходящих на коммерческий уровень плавучих ВЭУ Великобритании (до 31 ТВт-ч и 12,5 ГВт), а также развивающихся оффшорных ВЭУ Нидерландов, Бельгии и Дании. Эти данные были использованы далее для макроэкономических оценок влияния роста ВИЭ в странах БСМ. Следует отметить, что прогнозы по плавучим ВЭУ были получены уже осенью 2017 года, ещё до введения в эксплуатацию первого в мире проекта плавучей ВЭУ (Humbly Grove). Выполненный имитационный прогноз с использованием двухфакторных моделей кривых обучения подтвердил правомерность теоретического обоснования о влиянии расходов на НИОКР на точность оценок прогнозирования, показавший снижение издержек LCOE на 5% при равных уровнях производства электроэнергии, что определяет целесообразность развития подхода в этом направлении. Полученные результаты подтвердили возможность использования разработанного подхода для среднесрочного прогнозирования динамики роста ресурсов различных новых технологий ВИЭ, позволяющего уточнять их суммарную ожидаемую долю в энергетических балансах различных странах мира, в том числе и в России.

Выполненный в диссертации анализ показал, что темпы развития морских ВЭУ в странах БСМ возрастают с каждым годом и, согласно прогнозам ЕС, к 2027 году их установленная мощность достигнет 60 ГВт, что совпадает с полученными в диссертации оценками. Установлено, что бассейн Северного моря стал полигоном, где внедряются различные проекты интеграции и синергии оффшорного сектора традиционной энергетики с морскими видами ВИЭ, а стремительное развитие морской ветроэнергетики в странах БСМ по масштабам воздействия на мировую экономику может стать сравнимо с бумом шельфовой нефтегазовой индустрии, наблюдавшимся в этих же странах во второй половине прошлого века. Многие мировые нефтегазовые компании,

такие как Equinor (бывшая Statoil), Ørsted (бывшая DONG) и другие, уже активно работают в секторе оффшорных ВЭУ. Например, компании DNVGL, Exxon Mobil, Statoil разрабатывают перспективный проект WINWIN использования плавучих ВЭУ для продления срока службы истощенных нефтяных месторождений. Новая программа ЕС – Green Deal (2019) также определила морские ВЭУ лидирующей технологией процессов замещения, а проекты стран БСМ в этой области направлены не только на сетевую генерацию, но и на энергообеспечение локальных потребителей различных направлений мировой экономики – морской нефтегазовой индустрии, производства зеленого водорода и пресной воды, аквакультуры и т.д.

По выполненным в диссертации макроэкономическим оценкам определено, что кумулятивная мощность всех видов ВЭУ в странах БСМ к 2030 году достигнет 203 ГВт, что обеспечит производство электроэнергии до 533 ТВт-ч, рост занятости до 358,5 тысяч рабочих мест, привлечет около 150,6 млрд. евро инвестиций, сократит выбросы парниковых газов до 240,7 млн. тонн и снизит импорт углеводородов на 8,3 млрд. евро. А за счет замещения импорта углеводородов в странах БСМ собственным производством электроэнергии всеми основными видами ВИЭ, доход России от экспорта в 2030 году может сократиться на 16,6 млрд. евро (на 33.2%) относительно 2015.

В рамках решения основных задач в работе был также выполнен анализ рынка ВИЭ России и даны рекомендации повышения эффективности его развития с учетом опыта стран БСМ.

Эффективная модель государственной поддержки ВИЭ в России - Договора на поставку мощности (ДПМ ВИЭ), позволила привлечь к трансферу новых технологий ведущие мировые компании, в том числе и из стран БСМ. Высокие требования ДПМ ВИЭ по локализации, CAPEX, КИУМ и экспорту обеспечили за короткое время практически с нуля создание производственных мощностей и инфраструктуры развития оптового рынка ВИЭ, суммарной мощностью в 5,4 ГВт к 2025 году. Так, только объем оптового рынка ветроэнергетики к этому времени должен достигнуть 750 млрд. руб., обеспечить около 250 млрд. руб. инвестиций в сектор энергомашиностроения и прибавку в ВВП до 0,5% в год. Предполагаемый объем государственных инвестиций в 659,3 млрд. руб. на период 2025–2030 годы позволит ввести более 24 ГВт новых мощностей ВИЭ, что является достаточно скромным показателем по сравнению с планами ЕС. Но, по мнению автора, отсутствие энергетической зависимости и большие лесные массивы позволяют РФ выполнить свои климатические обязательства,

связанные с Парижским соглашением, без резкого увеличения рынка ВИЭ, характерного для стран БСМ. В то же время, чтобы оставаться в тренде глобальной энергетической трансформации, в России целесообразен более интенсивный рост мощностей различных технологий ВИЭ, уровня локализации и экспорта отечественного оборудования. На основании анализа состояния рынка ВИЭ России в диссертации разработаны рекомендации повышения эффективности его дальнейшего развития с учетом опыта стран БСМ, в частности, выдвинуты предложения использовать лучшее из энергетической нормативно-правовой базы и ряда инструментов поддержки этих стран. Расширение внутреннего рынка ВИЭ предлагается на удаленных территориях и за счет микрогенерации, а внешнего рынка путем развития новых технологий плавучих ветровых ВЭУ.

Заключение

В конце 2019 года на конференции ООН (COP25, Мадрид) не удалось утвердить «книгу правил» Парижского соглашения. Ряд стран, во главе с США, Австралией и Бразилией, отказались принимать климатические обязательства, считая не достоверной угрозу глобального потепления. В это же время, руководство Европейского Союза, во главе со странами БСМ, предложило распространить свою новую амбициозную программу "Зеленая сделка", направленную на достижения нулевых выбросов к 2050 году, на все страны мира и объявило о намерениях сохранить лидерство в процессах глобальной энергетической трансформации мировой экономики.

Обобщая результаты выполненного исследования, можно утверждать, что страны бассейна Северного моря, благодаря своей целенаправленной энергетической политике, только за два десятилетия подготовили международному сообществу теоретическую, политическую и экономическую платформу для дальнейшего ускорения процессов замещения традиционной энергетики возобновляемыми источниками энергии. Начало масштабной активизации энергетической трансформации в мировой экономике, связанной с климатической политикой, возможно уже в ближайшие годы и будет зависеть только от политической воли каждого государства мира.

По теме диссертации опубликованы следующие работы общим объемом 4,5 п.л., из них 3,9 п.л. в научных журналах из перечня ВАК РФ:

1. Горлов А.А. Процессы замещения традиционной энергетики возобновляемой в странах бассейна Северного моря // Энергетическая политика. 2015.- №4. - С.68-78

2. Горлов А.А. Методика оценки динамики процессов замещения традиционной энергетики возобновляемыми источниками энергии // Вестник Омского университета. Серия «Экономика». 2016. - №3. - С.21-27

3. Горлов А.А. Обоснование методического подхода к оценке динамики развития технологий оффшорной ветровой энергетики (на примере Германии) // МИР (Модернизация . Инновации. Развитие). 2018. - Т. 9.- № 1.- С.50-63, DOI: 10.18184/2079–4665.2018.9.1.

4. Горлов А.А. Использование кривых обучения для оценки динамики развития возобновляемых источников энергии // Энергетическая политика. 2018.- №3.- С.62-75

5. Горлов А.А.,Крюков В.А Прогнозирование процессов развития ветровой энергетики в бассейне Северного моря на базе кривых обучения// Проблемы прогнозирования. 2019.-№2. – С.93-103

Эта же статья опубликована на английском языке (Издательство «Pleiades Publishing Ltd):

6. Gorlov A.A., Kryukov V. A. Forecasting the Development Process of Wind Energy to the North Sea Basin Based on Learning Curves// Studies on Russian Economic Development. 2019. - Vol. 30.-No.2. – PP. 117-184

В других изданиях (объем 0,6 п.л.):

7. Горлов А.А. Экономика возобновляемой энергетики стран бассейна Северного моря// Энергия: техника, экология, экономика. 2014.- № 5 -. С.2-11