

FORESIGHT AND STI GOVERNANCE

ФОРСАЙТ

ISSN 1995-459X

(print)

ISSN 2312-9972 (online)

ISSN 2500-2591 (english)

2018

Т. 12 №4

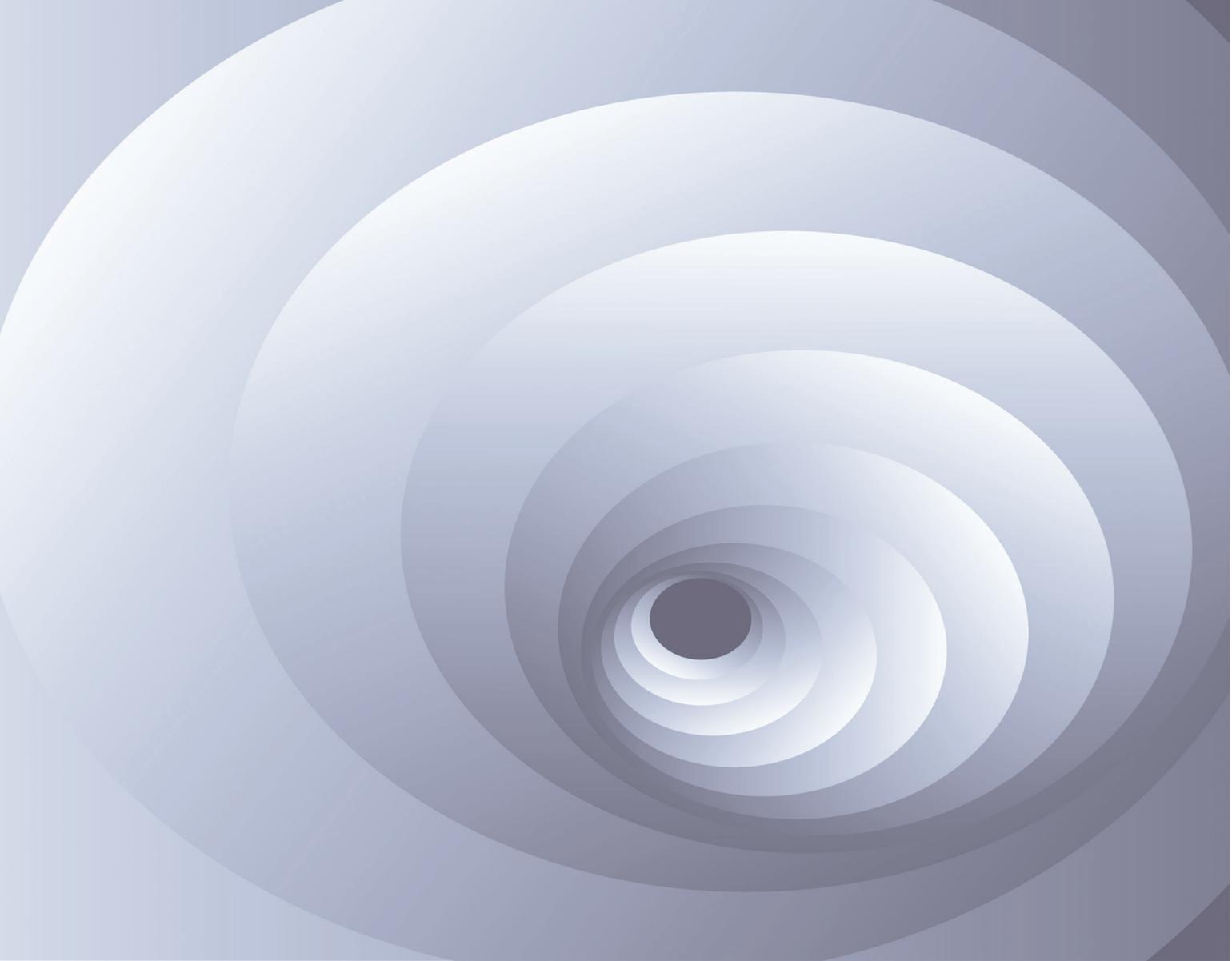


НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО УНИВЕРСИТЕТА «ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК

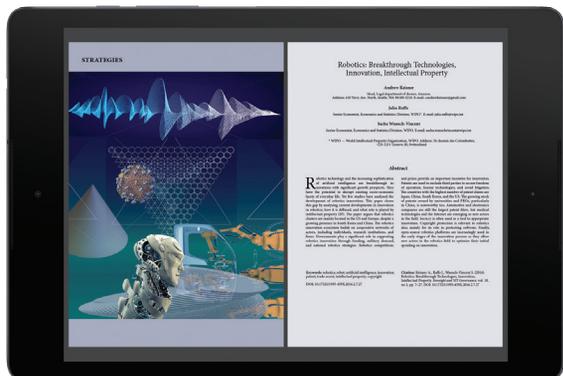
БУДУЩЕЕ ЭНЕРГЕТИКИ





ФОРСАЙТ

ТЕПЕРЬ ДОСТУПНЕЕ



РЕЙТИНГ ЖУРНАЛА

по импакт-фактору
в Российском индексе
научного цитирования
(2017 г.)

- Наукоедение 1
- Организация и управление 1
- Экономика 2

В соответствии с решением Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ журнал «Форсайт» включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в России, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук по направлению «Экономика»

*Протокол заседания президиума ВАК
№ 6/6 от 19 февраля 2010 г.*

ПОДПИСКА

Роспечать
80690

По итогам 2016 г. журнал вошел во 2-й квартал (Q2) рейтинга Scopus Scimago Journal & Country Rank по направлению «Business, Management and Accounting (miscellaneous)»

«Форсайт» вошел в число победителей открытого конкурса Министерства образования и науки РФ по государственной поддержке программ развития и продвижению российских научных журналов в международное научно-информационное пространство

По итогам экспертизы большого числа российских научных журналов, проведенной компанией Macmillan Science Communication (UK) «Форсайт» вошел в тройку наиболее перспективных изданий

ИНДЕКСИРОВАНИЕ

WEB OF SCIENCE™
CORE COLLECTION
EMERGING SOURCES
CITATION INDEX

SCOPUS™

RUSSIAN SCIENCE CITATION INDEX
WEB OF SCIENCE

SSRN

ProQuest™
Start here.

EBSCO

Academic Search Premier

OAJI
.net

Open Academic Journals Index

RePEc™ RESEARCH PAPERS
IN ECONOMICS

U

ULRICHSWEB™
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

GENAMICS™ JOURNALSEEK

eLIBRARY.RU

CYBERLENINKA



ВИНИТИ

ИЗДАНИЯ ИСИЭЗ

Аналитические доклады



Статистические сборники



С этими и другими изданиями можно ознакомиться в интернете или приобрести в книжных магазинах

Главный редактор Леонид Гохберг (НИУ ВШЭ)

Заместитель главного редактора Александр Соколов (НИУ ВШЭ)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Татьяна Кузнецова (НИУ ВШЭ)

Дирк Майсснер (НИУ ВШЭ)

Юрий Симачёв (НИУ ВШЭ)

Томас Тернер (НИУ ВШЭ и Университет Кейптауна, ЮАР)

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Игорь Агамирзян (НИУ ВШЭ)

Андрей Белоусов (Администрация Президента РФ)

Николас Вонортас (Университет Джорджа Вашингтона, США)

Люк Джорджиу (Университет Манчестера, Великобритания)

Криштиану Каньин (Центр стратегических исследований и управления, Бразилия)

Элиас Караяннис (Университет Джорджа Вашингтона, США)

Майкл Кинэн (ОЭСР)

Андрей Клепач (Внешэкономбанк, Россия)

Михаил Ковальчук (НИЦ «Курчатowski институт», Россия)

Ярослав Кузьминов (НИУ ВШЭ)

Кэрол Леонард (НИУ ВШЭ и Оксфордский университет, Великобритания)

Джонатан Линтон (НИУ ВШЭ и Университет Шеффилда, Великобритания)

Йен Майлс (НИУ ВШЭ и Университет Манчестера, Великобритания)

Ронпин Му (Институт политики и управления, Китайская академия наук)

Вольфганг Полт (Университет прикладных наук Йоаннеум, Австрия)

Озчан Саритас (НИУ ВШЭ и Университет Манчестера, Великобритания)

Марио Сервантес (ОЭСР)

Анджела Уилкинсон (Мировой энергетический совет и Оксфордский университет, Великобритания)

Фред Филлипс (Университет Нью-Мексико и Университет штата Нью-Йорк в Стоуни-Брук, США)

Тед Фуллер (Университет Линкольна, Великобритания)

Атила Хаваш (Институт экономики, Венгерская академия наук)

Карел Хагеман (Институт перспективных технологических исследований при Объединенном исследовательском центре Европейской комиссии)

Александр Хлунов (Российский научный фонд)

Клаус Шух (Центр социальных инноваций, Австрия)

Чарльз Эдквист (Университет Лунда, Швеция)

РЕДАКЦИЯ

Ответственный редактор

Марина Бойкова

Менеджер по развитию

Наталья Гавриличева

Литературные редакторы

Яков Охонько, Кейтлин Монтгомери

Корректор

Екатерина Малеванная

Художник

Мария Зальцман

Верстка

Михаил Салазкин

Учредитель

Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»

Свидетельство о регистрации

ПИ № ФС 77-68124 от 27.12.2016 г.

Тираж

600 экз.

Заказ

0000

Отпечатано в АО «Первая Образцовая типография»
Филиал «Чеховский Печатный Двор»
142300, Московская обл., г. Чехов, ул. Полиграфистов, д. 1
www.chpd.ru, e-mail: sales@chpd.ru, тел.: 8 (499) 270-73-59

© Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики», 2018

FORESIGHT AND STI GOVERNANCE

National Research University
Higher School of Economics



Foresight and STI Governance (formerly *Foresight-Russia*) — a research journal established by the National Research University Higher School of Economics (HSE) and administered by the HSE Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge (ISSEK), located in Moscow, Russia. The mission of the journal is to support the creation of Foresight culture through dissemination of the best national and international practices of future-oriented innovation development. It also provides a framework for discussing S&T trends and policies. Topics covered include:

- Foresight methods
- Results of Foresight studies
- Long-term priorities for social, economic and S&T development
- S&T and innovation trends and indicators
- S&T and innovation policies
- Strategic programmes of innovation development at national, regional, sectoral and corporate levels
- State-of-the-art methods and best practices of S&T analysis and Foresight.

The target audience of the journal comprises research scholars, university professors, policy-makers, businessmen, expert community, post-graduates, undergraduates and others who are interested in S&T and innovation analyses, Foresight and policy issues.

The thematic coverage of the journal makes it a unique title in its field. *Foresight and STI Governance* is published quarterly and distributed in Russia and abroad.

Leonid Gokhberg, Editor-in-Chief, First Vice-Rector, HSE, and Director, ISSEK, HSE, Russian Federation

Alexander Sokolov, Deputy Editor-in-Chief, HSE, Russian Federation

EDITORIAL COUNCIL

Igor Agamirzyan, HSE, Russian Federation
Andrey Belousov, Administration of the President of the Russian Federation
Cristiano Cagnin, Center for Strategic Studies and Management (CGEE), Brazil
Elias Carayannis, George Washington University, United States
Mario Cervantes, OECD
Charles Edquist, Lund University, Sweden
Ted Fuller, University of Lincoln, United Kingdom
Luke Georghiou, University of Manchester, United Kingdom
Karel Haegeman, EU Joint Research Centre — Institute for Prospective Technological Studies (JRC-IPTS)
Attila Havas, Institute of Economics, Hungarian Academy of Sciences
Michael Keenan, OECD
Alexander Khlunov, Russian Science Foundation
Andrey Klepach, Bank for Development and Foreign Economic Affairs, Russian Federation
Mikhail Kovalchuk, National Research Centre 'Kurchatov Institute', Russian Federation
Yaroslav Kuzminov, HSE, Russian Federation
Carol S. Leonard, HSE, Russian Federation, and University of Oxford, United Kingdom
Jonathan Linton, HSE, Russian Federation, and University of Sheffield, United Kingdom
Ian Miles, HSE, Russian Federation, and University of Manchester, United Kingdom
Rongping Mu, Institute of Policy and Management, Chinese Academy of Sciences
Fred Phillips, University of New Mexico and Stony Brook University – State University of New York, United States
Wolfgang Polt, Joanneum Research, Austria
Ozcan Saritas, HSE, Russian Federation, and University of Manchester, United Kingdom
Klaus Schuch, Centre for Social Innovation, Austria
Nicholas Vonortas, George Washington University, United States
Angela Wilkinson, World Energy Council and University of Oxford, United Kingdom

EDITORIAL BOARD

Tatiana Kuznetsova, HSE, Russian Federation
Dirk Meissner, HSE, Russian Federation
Yury Simachev, HSE, Russian Federation
Thomas Thurner, HSE, Russian Federation, and University of Cape Town, South Africa

EDITORIAL TEAM

Executive Editor — Marina Boykova
Development Manager — Natalia Gavrilicheva
Literary Editors — Yakov Okhonko, Caitlin Montgomery
Proofreader — Ekaterina Malevannaya
Designer — Mariya Salzmann
Layout — Mikhail Salazkin

Address: National Research University Higher School of Economics
20, Myasnitskaya str., Moscow, 101000, Russia
Tel: +7 (495) 621-40-38 E-mail: foresight-journal@hse.ru
Web: <https://foresight-journal.hse.ru/en/>

At the end of 2016 *Foresight and STI Governance* has reached Q2 of the Scopus Scimago Journal & Country Rank in the field "Business, Management and Accounting (miscellaneous)"

INDEXING AND ABSTRACTING

WEB OF SCIENCE™
CORE COLLECTION
EMERGING SOURCES
CITATION INDEX

SCOPUS™

RUSSIAN SCIENCE CITATION INDEX
WEB OF SCIENCE

SSRN

ProQuest

ULRICHSWEB™
GLOBAL SERIALS DIRECTORY

EBSCO

Academic Search Premier

GENAMICS™ JOURNALSEEK

RePEc

VINITI

eLIBRARY.RU

OAJI .net Open Academic Journals Index

CYBERLENINKA

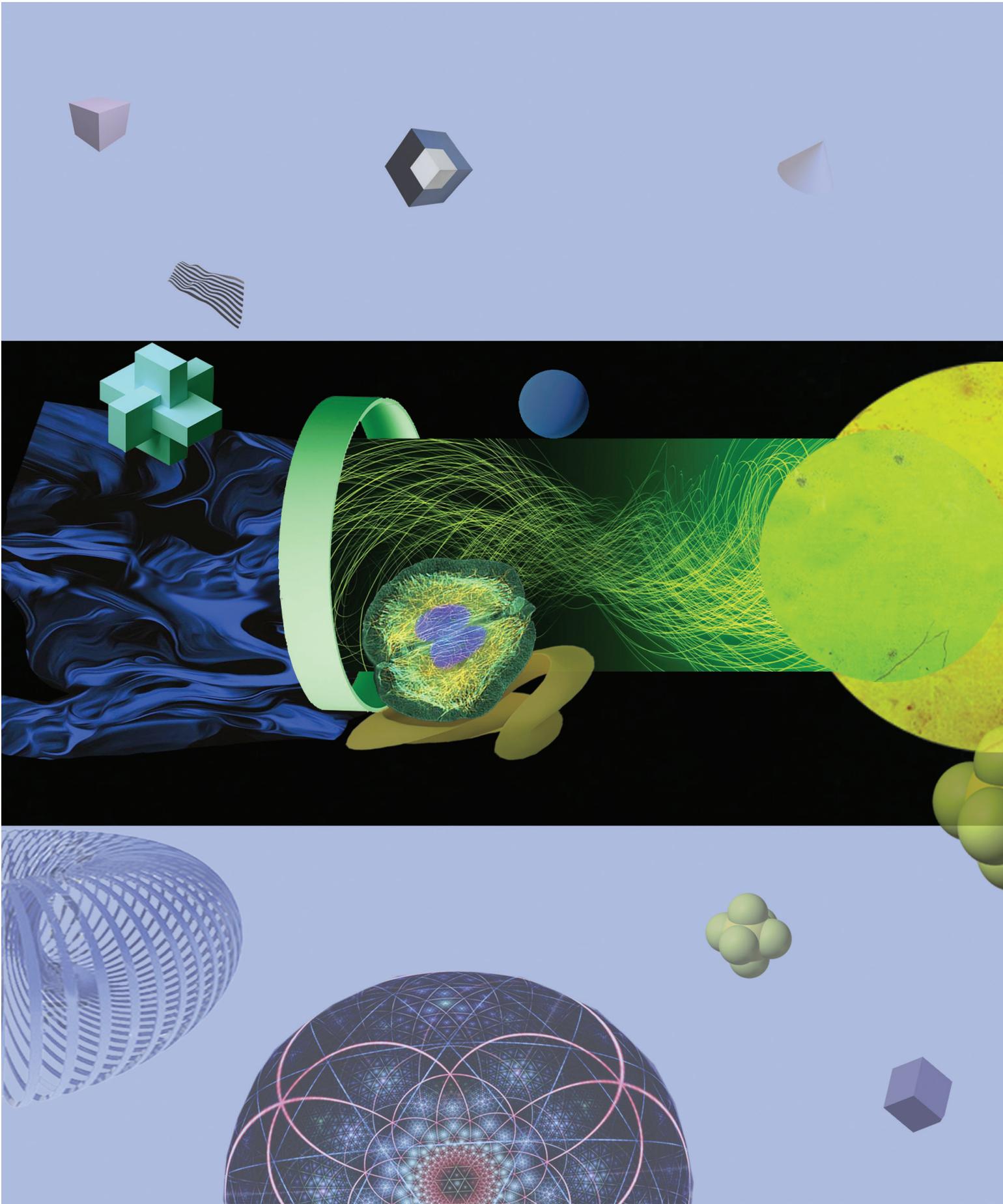
СОДЕРЖАНИЕ

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК
“БУДУЩЕЕ ЭНЕРГЕТИКИ”

CONTENTS

SPECIAL ISSUE
“FUTURE OF ENERGY”

СТРАТЕГИИ		STRATEGIES	
Новые источники энергии, энергетические технологии и системы: приоритет социальных, климатических и природоохранных факторов <i>Вступительная статья редакторов специального выпуска</i> Юрген-Фридрих Хаке, Лилиана Проскурякова	6	New Energy Sources, Technologies, and Systems: The Priority of Social, Climate, and Environmental Issues <i>Introductory article by the editors of the special issue</i> Jürgen-Friedrich Hake, Liliana Proskuryakova	6
Интеграция водной и энергетической политики как основа для устойчивого развития Дэниел Склэрью, Дженнифер Склэрью	10	Integrated Water-Energy Policy for Sustainable Development Daniel Sklarew, Jennifer Sklarew	10
Новая технологическая революция и требования к энергетике Сергей Филиппов	20	New Technological Revolution and Energy Requirements Sergey Filippov	20
ИННОВАЦИИ		INNOVATION	
Энергопотребление российского автомобильного сектора: роль технологических инноваций в межтопливной конкуренции Дмитрий Грушевенко, Екатерина Грушевенко, Вячеслав Кулагин	35	Energy Consumption of the Russian Road Transportation Sector: Prospects for Inter-Fuel Competition in Terms of Technological Innovation Dmitriy Grushevenko, Ekaterina Grushevenko, Vyacheslav Kulagin	35
МАСТЕР-КЛАСС		MASTER CLASS	
Применение глобальных баз данных в Форсайт-исследованиях энергетики и землепользования: метод GCDB Гильберт Ахамер	46	Applying Global Databases to Foresight for Energy and Land Use: The GCDB Method Gilbert Ahamer	46
Перспективы развития возобновляемой энергетики в Великобритании, Турции и Нигерии Нуркан Килинч-Ата	62	Assessing the Future of Renewable Energy Consumption for United Kingdom, Turkey and Nigeria Nurcan Kilinc Ata	62
Пределы технологической эффективности добычи сланцевой нефти в США Александр Маланичев	78	Limits of Technological Efficiency of Shale Oil Production in the USA Alexander Malanichev	78
ABSTRACTS	90	ABSTRACTS	90



Новые источники энергии, энергетические технологии и системы: приоритет социальных, климатических и природоохранных факторов

Юрген-Фридрих Хаке

Профессор, j.-f.hake@fz-juelich.de

Институт исследований в области энергетики и климата Исследовательского центра Юлиха (Institute of Energy and Climate Research — IEK, Forschungszentrum Jülich), Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich, Germany

Лилиана Проскурякова

Директор Национального контактного центра по международной мобильности ученых, lproskuryakova@hse.ru

Институт статистических исследований и экономики знаний Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (ИСИЭЗ НИУ ВШЭ), 101000, Москва, ул. Мясницкая, 11

Аннотация

Вступительная статья к специальному выпуску «Будущее энергетики» посвящена перспективным направлениям развития мирового энергетического комплекса, оценке их вклада в преодоление глобальных вызовов и обеспечение устойчивого развития. Рассматриваемые тренды существенно различаются по скорости эволюции. Перспективные траек-

тории развития представляют как возможности, так и риски, специфичные для топливно-энергетического комплекса той или иной страны. Успехи в использовании возникающих преимуществ и нивелировании угроз зависят от совокупности внутренних и внешних факторов, в том числе от выбора мер государственной политики и эффективности их реализации.

Ключевые слова: новые источники энергии; эволюция технологий; глобальные вызовы; тренды; устойчивое развитие; государственная энергетическая политика

Цитирование: Hake J.-F., Proskuryakova L. (2018) New Energy Sources, Technologies, and Systems: The Priority of Social, Climate, and Environmental Issues. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no 4, pp. 6–9. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.6.9

Рост энергопотребления в контексте социальных, климатических и природоохранных ограничений требует новых источников энергии. Перспективы развития энергетических систем определяются целым рядом разноплановых факторов, включая волатильность цен на энергоносители, стремительный технологический прогресс и геополитические сдвиги. Эти факторы, отличающиеся высокой степенью неопределенности, побуждают политиков и ученых анализировать будущее, прогнозировать и предвосхищать изменения, определять тенденции, готовиться к освоению новых рынков.

Среди разрабатываемых технологических направлений наивысшим потенциалом обладает **термоядерный синтез**, несмотря на отложенную коммерциализацию (ожидается в средне- или долгосрочной перспективе) и высокую стоимость. Запуск Международного экспериментального термоядерного реактора (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER) позволит оценить надежность и экономическую эффективность соответствующих технологий, которые одновременно апробируются и на других подобных реакторах. В случае успеха их можно будет применять на атомных электростанциях нового поколения [Rosanvallon et al., 2018]. Еще одно направление перспективных разработок в атомной энергетике — реакторы четвертого поколения с замкнутым ядерным топливным циклом, появление которых ожидается после 2030 г. Энергетические системы на их основе предусматривают утилизацию и повторное использование отработанного ядерного топлива, что обеспечивает более высокую надежность и безопасность [Lake, 2002; Grape et al., 2014]. Новые многоцелевые атомные энергетические системы способны генерировать одновременно тепло и электричество. Вместе с тем пока еще сохраняется неопределенность в отношении производственных затрат, от которых зависит конкурентоспособность с другими энергетическими технологиями. Международное сотрудничество и междисциплинарный подход играют решающую роль в развитии обоих направлений.

Не менее перспективная область — **водородная энергетика**. Ранее водород практически не применялся в качестве энергоносителя ввиду низкого уровня рентабельности, повышенной взрывоопасности и отсутствия экономически эффективных систем хранения и распределения. Эти проблемы решаются с применением водородных топливных элементов. Благодаря высокой энергетической плотности водород можно безопасно использовать в смеси с жидкостями, что позволяет транспортировать его по существующим трубопроводным сетям, используемым для ископаемого топлива. Способность аккумулировать значительный объем электроэнергии открывает возможность применения водородных топливных элементов пользователями, не подключенными к энергосетям.

Несмотря на обозначенные преимущества, масштабному использованию водорода по-прежнему препятствует ряд факторов. Среди них — недостаточные безопасность и долговечность топливных элементов и систем хранения водорода, отсутствие децентрализованной инфраструктуры, которая обеспечила бы привлекательность водородных автомобилей для пользователей, и высокая стоимость электролизеров для производства водорода. Сколько времени может потребоваться для их преодоления, пока неизвестно [Haseli, 2018].

В России в течение уже нескольких десятилетий ведутся работы по созданию технологии получения **геотермальной энергии** сухих горных пород (петротермальной энергетики). Выполнены необходимые исследования и разработки, готовится демонстрационный образец — экспериментальная электростанция. В основе этих решений лежат методы извлечения тепла, аккумулированного в сухих горных породах земной коры, что позволяет генерировать недорогую тепловую и электрическую энергию для бесперебойного снабжения регионов независимо от их удаленности. Существующие разработки полностью базируются на российском оборудовании и прошли промышленную апробацию. В создании геотермальных энергосистем участвовали научные центры, университеты и компании. Экспериментальные установки могут быть введены в эксплуатацию до 2020 г., а повсеместное их применение станет реальным технологически начиная с 2020–2025 гг. К их преимуществам относятся низкие производственные затраты, почти нулевые выбросы и возможность рекуперации избыточного тепла благодаря системе замкнутого цикла [Cui et al., 2017; Huang et al., 2018]. Кроме того, еще в 1940-е гг. начались работы над повышением эффективности **солнечной энергетики**, когда возникла идея запустить в космос автоматическую станцию для передачи на Землю энергии Солнца с помощью микроволн или лазерных лучей [Asimov, 1967].

В Индии, Китае, США и Японии разрабатываются роботизированные спутниковые солнечные электростанции для беспроводной передачи на Землю гигантских объемов чистой возобновляемой энергии. Главным препятствием, затрудняющим создание таких станций, является высокая стоимость вывода спутников на орбиту. По некоторым оценкам, затраты на построение пилотной станции могут составить до 20 млрд долл. Однако учитывая, что стоимость космических запусков снижается из-за конкуренции со стороны частных компаний, подобные оценки могут быть пересмотрены [Matsumoto, 2002; Potter et al., 2008].

Наименее изученным потенциальным источником энергии остается **темная материя**¹. Работы в данном направлении пока находятся на стадии фундаментальных исследований. Эксперименты по обнаружению темной материи проводятся на Большом адронном коллайдере в Европейской организации ядерных ис-

¹ Темная материя — одна из составляющих Вселенной. Ее нельзя обнаружить оптическими средствами, она не излучает световых или иных электромагнитных волн и не сжимается под действием гравитации. В соответствии с одной из гипотез на нее приходится примерно 25% общей массы Вселенной, тогда как на обычную материю — около 5%, а остальные 70% составляет «энергия вакуума» [Redd, 2017].

следований (European Organization for Nuclear Research, CERN, Швейцария). Обсуждаются возможности использования темной материи для энергообеспечения дальних полетов космических кораблей [Liu, 2009]. Предположительно темная материя способна выделять в 5 млрд раз больше энергии на единицу массы, чем диамит [Casalino et al., 2018].

Эти и другие аспекты технологического развития энергетики детально раскрываются в специальном выпуске журнала «Форсайт» «Будущее энергетики».

В статье **Дэниела и Дженифер Склэрью (Daniel and Jennifer Sklarew)** оценивается потенциальный вклад энергосистем будущего в достижение Целей устойчивого развития (ЦУР), утвержденных ООН в 2015 г. [UN, 2015]. Особое внимание уделяется социальным аспектам, вопросам безопасности, возможности гибкого реагирования [Schlör et al., 2018], ценовой доступности и сокращению воздействия на окружающую среду и климат, в частности, за счет комбинированных технологий использования водных, энергетических и сельскохозяйственных ресурсов [Märker et al., 2018]. Одна из этих целей непосредственно связана с поиском ответов на глобальные энергетические вызовы: обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным, устойчивым и современным энергоносителям; увеличение доли возобновляемых источников в мировом энергобалансе, удвоение глобальных темпов роста энергоэффективности. Другие цели также прямо либо косвенно касаются актуальных проблем в этой сфере в разных регионах мира [AlQattan et al., 2018]. Помимо обеспечения общественных благ обозначенные цели оказывают значительное влияние на бизнес, формируя основы устойчивой энергетики [Muff et al., 2017].

Требования к энергетике кардинально менялись с наступлением очередной технологической революции. Этот процесс детально рассматривается в статье **Сергея Филиппова**. Форсайт-исследования тенденций и технологий в энергетике выполняются во многих регионах мира, в частности в Северной Америке, Европейском союзе (ЕС) и странах БРИКС. Нередко они интегрированы в комплексные системы стратегического планирования национального и международного уровня. Полученные результаты учитываются при разработке научно-технологической и инновационной политики [Proskuryakova, 2017].

Методология Форсайт-исследований за последние десять лет существенно продвинулась. Применяются новейшие методы, включая анализ больших данных с использованием элементов искусственного интеллекта, усовершенствованное сценарное планирование, дополненное Дельфи-обследованиями в режиме реального времени, и др. [UNESCO, 2015; Miles et al., 2016]. Данная тема развивается в статье **Гильберта Ахамера (Gilbert Ahamer)**, посвященной формированию базы данных глобальных изменений (Global Change Data Base) и ее применению в энергетическом Форсайте, а также в публикации **Нуркан Килинч Аты (Nurcan Kilinc Ata)**, в которой оцениваются перспективы использования возобновляемых энергетических ресурсов в ряде стран.

Новая ключевая тенденция заключается в росте числа рыночных акторов: потребители активно вовлекаются в генерацию, хранение и торговлю энергией [Zafar et al., 2018]. Домохозяйства и предприятия становятся «потребителями» (*prosumers*), создают пользовательские инновации в энергетике. Бытовые устройства и промышленное оборудование, подключенные к интернету, «общаются» друг с другом и с поставщиками электроэнергии. Таким образом, обеспечивается оптимизация энергопотребления без участия человека. Отмеченные тренды обусловили стремительное развитие децентрализованных энергосистем, «умных» электросетей разного масштаба и «интернета энергии» [Hong et al., 2018; Mahmud et al., 2018].

Во многих крупных городах, например Токио, Берлине, Лос-Анджелесе, появились станции зарядки электромобилей и автомобилей, работающих на водородном топливе [ICCT, 2017]. Во всех странах ЕС доля возобновляемых источников, включая биомассу, должна составить не менее 10% в общей структуре потребления топлива транспортным сектором. Европейские производители уже предлагают дизельное топливо с 7%-м содержанием метиловых эфиров жирных кислот (*Fatty Acid Methyl Esters, FAME*) (B7) и бензин, в котором содержится до 5% этанола (E5). В 2015 г. бензин с максимальным содержанием этанола (10%) применялся в Болгарии, Финляндии, Франции, Германии, Литве и Словении [European Commission, 2017]. Ведущими производителями биотоплива являются США и Бразилия [RFA, 2018]. Некоторые страны, в частности Россия, обладают гигантским, пока недоиспользованным потенциалом генерации и экспорта биотоплива [IRENA, 2017], и на этом фоне расширяется потребление газомоторного топлива. В статье **Вячеслава Кулагина** и его коллег оцениваются перспективы межтопливной конкуренции на внутреннем автомобильном рынке.

Расчеты неоткрытых запасов ископаемого топлива пока носят приблизительный характер, определить их реальный объем весьма сложно. В литературе приводятся различные оценки доступности того или иного энергоресурса. Независимо от характера они являются важным параметром для планирования развития энергетической отрасли [U.S. EIA, 2015]. Неопределенность в отношении совокупного объема неоткрытых запасов усугубляется проблемами с оценкой себестоимости и коммерческой привлекательности добычи. Производство нетрадиционных и трудноизвлекаемых углеводородов может оказаться нерентабельным. Технологии, необходимые для добычи, обогащения и переработки ископаемого топлива (и энергоемкость соответствующих процессов), также могут существенно варьировать. Эти факторы непосредственно влияют на энергобаланс. Возможности извлечения нетрадиционных видов нефти на примере сланцевой анализируются в статье **Александра Маланичева**.

Скорость развития рассматриваемых глобальных трендов неодинакова. Создание термоядерных реакторов, возможно, займет десятилетия, в то время как новые способы добычи нетрадиционных запасов нефти

и газа уже существенно изменили облик мировых энергетических рынков. Как только будет решена проблема стоимости энергетических технологий, которая определяет их конкурентоспособность, новые разработки смогут обеспечить прорыв в разных направлениях прикладных исследований — от хранения энергии до новых материалов. Вместе с тем перспективные траектории развития — это не только открывающиеся возможности, но и потенциальные угрозы, специфичные

для конкретной страны и ее топливно-энергетического комплекса. Успех в использовании возможностей и противодействии угрозам зависит от совокупности внутренних и внешних факторов, включая выбор действенных мер государственной политики и формирование механизмов их эффективной реализации.

Статья подготовлена по результатам проекта, выполненного при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60117X0014.

Библиография

- AlQattan N., Acheampong M., Jaward F.M., Ertem F.C., Vijayakumar N., Bello T. (2018) Reviewing the potential of Waste-to-Energy (WTE) technologies for Sustainable Development Goal (SDG) numbers seven and eleven // *Renewable Energy Focus*. Vol. 27. P. 97–110.
- Asimov I. (1967) *Is Anyone There? Speculative Essays on the Known and Unknown*. New York: Doubleday.
- Casalino A., Rinaldi M., Sebastiani L., Vagnozzi S. (2018) Mimicking dark matter and dark energy in a mimetic model compatible with GW170817 // *Physics of the Dark Universe*. Vol. 22. P. 108–115.
- Cui G., Rena S., Zhang L., Ezekiel J., Enechukwu C., Wang Y., Zhang R. (2017) Geothermal exploitation from hot dry rocks via recycling heat transmission fluid in a horizontal well // *Energy*. Vol. 128. P. 366–377.
- European Commission (2017) Report from the Commission to the European Parliament and the Council in accordance with Article 9 of Directive 98/70/EC relating to the quality of petrol and diesel fuels. COM(2017) 284 final. Brussels: European Commission. Режим доступа: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52017DC0284>, дата обращения 23.10.2018.
- Grape S., Svärd S.J., Hellesen C., Jansson P., Lindell M.Å. (2014) New perspectives on nuclear power — Generation IV nuclear energy systems to strengthen nuclear non-proliferation and support nuclear disarmament // *Energy Policy*. Vol. 73. P. 815–819.
- Haseli Y. (2018) Maximum conversion efficiency of hydrogen fuel cells // *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 43. № 18. P. 9015–9021.
- Hong B., Zhang W., Zhou Y., Chen J., Xiang Y., Mu Y. (2018) Energy-Internet-oriented microgrid energy management system architecture and its application in China // *Applied Energy*. Vol. 228. P. 2153–2164.
- Huang W., Cao W., Jiang F. (2018) A novel single-well geothermal system for hot dry rock geothermal energy exploitation // *Energy*. Vol. 162. P. 630–644.
- ICCT (2017) Developing hydrogen fueling infrastructure for fuel cell vehicles: A status update. The International Council on Clean Transportation Briefing, October 2017. Режим доступа: https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Hydrogen-infrastructure-status-update_ICCT-briefing_04102017_vF.pdf, дата обращения 25.10.2018.
- IRENA (2017) *Renewable Energy Prospects for the Russian Federation*. ReMap Working Paper. Abu Dhabi: IRENA.
- Lake J.A. (2002) The fourth generation of nuclear power // *Progress in Nuclear Energy*. Vol. 40. № 3–4. P. 301–307.
- Liu J. (2009) Dark Matter as a Possible New Energy Source for Future Rocket Technology. ArXiv Paper 0908.1429 [astro-ph. co]. Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/0908.1429>, дата обращения 19.09.2018.
- Mahmud K., Town G.E., Morsalin S., Hossain M.J. (2018) Integration of electric vehicles and management in the internet of energy // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 82. Part 3. P. 4179–4203.
- Märker C., SandraVenghaus S., Hake J.-F. (2018) Integrated governance for the food – energy – water nexus — The scope of action for institutional change // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 97. P. 290–330.
- Matsumoto H. (2002) Research on solar power satellites and microwave power transmission in Japan // *IEEE Microwave Magazine*. Vol. 3. № 4. P. 36–45.
- Miles I., Saritas O., Sokolov A. (2016) *Foresight for Science, Technology and Innovation*. Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer.
- Muff K., Kapalka A., Dyllick T. (2017) The Gap Frame — Translating the SDGs into relevant national grand challenges for strategic business opportunities // *The International Journal of Management Education*. Vol. 15. № 2. Part 2. P. 363–383.
- Potter S., Henley M., Davis D., Born A., Howell J., Mankins J. (2008) Wireless Power Transmission Options for Space Solar Power. Paper presented at the NASA International Space Development Conference, Washington, D.C., 29 May — 1 June 2008. Режим доступа: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080036588.pdf>, дата обращения 23.04.2018.
- Proskuryakova L. (2017) Energy technology foresight in emerging economies // *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 119. P. 205–210.
- Redd N.T. (2017) What is Dark Matter? // *Space.Com*. 14.11.2017. Режим доступа: <https://www.space.com/20930-dark-matter.html>, дата обращения 04.12.2018.
- RFA (2018) Renewable Fuels Association Database. Режим доступа: <https://ethanolrfa.org/resources/industry/statistics/#1454098996479-8715d404-e546>, дата обращения 23.10.2018.
- Rosanvallon S., Elbez-Uzan J., Cortes P. (2018) Safety Provisions for the ITER Facility // *Fusion Engineering and Design*. Vol. 136. Part A. P. 540–544. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.03.016>, дата обращения 14.10.2018.
- Schlör H., Venghaus S., Hake J.-F. (2018) The FEW-Nexus city index — Measuring urban resilience // *Applied Energy*. Vol. 210. P. 382–392. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.026>, дата обращения 09.10.2018.
- UN (2015) Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015, A/RES/70/1. Geneva: United Nations. Режим доступа: http://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/70/1&Lang=E, дата обращения 23.10.2018.
- UNESCO (2015) *World Water Scenarios to 2050*. World Water Assessment Programme (WWAP). Paris: UNESCO.
- U.S. EIA (2015) *Annual Energy Outlook 2015 with projections to 2040*. Washington, D.C.: U.S. Energy Information Administration.
- Zafar R., Mahmood A., Razaq S., Ali W., Naeema U., Shehzada K. (2018) Prosumer based energy management and sharing in smart grid // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 82. Part 1. P. 1675–1684.

Интеграция водной и энергетической политики как основа для устойчивого развития

Дэниел Склэрю

Доцент, dsklarew@gmu.edu

Дженнифер Склэрю

Адъюнкт-профессор, jsklarew@masonlive.gmu.edu

Колледж естественных наук (College of Science) Университета Джорджа Мейсона
(George Mason University), США, Fairfax, Virginia, USA

Аннотация

Многочисленные исследования указывают на тесную взаимозависимость водной и энергетической сфер, поскольку производство энергии обычно характеризуется высокой водоемкостью, а повышение доступности водных ресурсов связано с существенными энергозатратами. Интеграция энергетической и водной политики на глобальном и национальном уровнях рассматривается как инструмент реализации Целей устойчивого развития. В статье анализируются возможности обеспечения равного доступа к чистой воде и электроэнергии в различных странах,

обусловленные такой интеграцией. Представлены кейсы трех стран — Индии, Ганы и Марокко, успешно реализующих комплексные инструменты политики в рассматриваемых сферах. Впервые проанализирована взаимосвязь глобальных целей в области обеспечения доступа к энергии и воде и возможностей национальных правительств внедрять синергетические решения. Предложенный подход к интегрированию сфер энергетики и водопользования может быть распространен на весь спектр целей устойчивого развития и будет иметь решающее значение для успеха стран в их реализации.

Ключевые слова: энергоснабжение; чистая энергия; водоснабжение; чистая вода; цели устойчивого развития; связь водоснабжения и энергетики; использование природных ресурсов; Организация Объединенных Наций

Цитирование: Sklarew D., Sklarew J. (2018) Integrated Water-Energy Policy for Sustainable Development. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no 4, pp. 10–19. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.10.19

Концепция устойчивого развития, сформулированная в «Декларации Рио» [UNESCO, 1992], стала основой для масштабного международного сотрудничества, направленного на удовлетворение ключевых потребностей и повышение благосостояния нынешнего и будущих поколений [UN, 2015]. Успех в этом направлении будет во многом зависеть от того, удастся ли реализовать ряд обязательных условий, включая ликвидацию дефицита чистой питьевой воды и обеспечение надежных, экологичных источников энергии при одновременной нейтрализации негативных экстерналий, таких как влияние выбросов парниковых газов на биоразнообразие и изменение климата. Эти задачи входят в число «Целей устойчивого развития» (ЦУР), принятых ООН в 2015 г., с планируемым горизонтом реализации до 2030 г. [Sachs et al., 2018]:

1. Ликвидация нищеты
2. Ликвидация голода
3. Хорошее здоровье и благополучие
4. Качественное образование
5. Гендерное равенство
6. Чистая вода и санитария
7. Недорогая и чистая энергия
8. Достойная работа и экономический рост
9. Индустриализация, развитие инноваций и инфраструктуры
10. Уменьшение неравенства
11. Устойчивое развитие городов и других поселений
12. Ответственное потребление и производство
13. Борьба с изменением климата
14. Сохранение морских экосистем
15. Сохранение экосистем суши
16. Мир, правосудие и эффективные институты
17. Партнерство в интересах устойчивого развития.

Задача нашей статьи — оценить перспективу всемирной и синхронной реализации глобальных целей в отношении энергии (цель 7) и воды (цель 6) без причинения ущерба жизненно важным экосистемам (цели 13–15).

В абсолютном значении мировые запасы чистой энергии и воды перекрывают текущие потребности. Объем солнечной энергии, ежегодно поступающей на Землю, примерно в 7500 раз превышает потребление первичной энергии (450 ЭДж/г) [World Energy Council, 2013]. Только в озере Байкал содержится в десять раз больше пресной воды, чем человечество потребляет за год [ILEC, UNEP, 1993; Cosgrove, Rijsberman, 2000]. В 2015 г. была использована примерно 1/8 часть имеющихся ресурсов пресной воды [UN, 2018]. Следовательно, вызов, на который должно ответить наше поколение (в отношении чистой энергии и воды), заключается не в дефиците, а в обеспечении глобальной доступности этих ресурсов.

На протяжении 2000–2015 гг. сложились ощутимые предпосылки для достижения обозначенных целей к запланированному горизонту — к 2030 г. За это время население планеты увеличилось на 38%, а доля людей, обеспеченных электроэнергией, — на 10% (до 87%) [UN DESA, 2017; World Bank, 2018a]. На возобновляемые источники энергии — современную биоэнергетику, геотермальные и гидроэлектростанции, солнечную и ветровую энергию, традиционные дрова и древесный

уголь — приходится 17% глобального энергопотребления [World Bank, 2018a]. Чистый прирост выбросов парниковых газов за тот же период превысил 40% [IEA, 2018]. При сохранении таких тенденций тотальный доступ к электроэнергии будет обеспечен до 2040 г. Однако представляется, что еще нескольких поколений не получают возможности использовать чистую энергию из возобновляемых источников, дающих незначительные выбросы парниковых газов.

Расширенный доступ к чистой питьевой воде отмечен и в докладе по совместной программе мониторинга Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) и Детского фонда ООН (United Nations Children's Fund) [WHO, UNICEF, 2017].

Как и в отношении электричества, в 2000–2015 гг. доля населения, стабильно обеспеченного водой по месту жительства, выросла на 10% — до отметки 71%. Еще 20% имеют доступ к базовому водоснабжению (вода улучшенного качества из источников, расположенных поблизости от дома — в пределах 30 минут туда и обратно). Таким образом, можно спрогнозировать обеспечение всеобщего доступа к базовым источникам водоснабжения примерно к 2030 г. С учетом прогресса, достигнутого в последние годы, всеобщая обеспеченность чистой водой по месту жительства ожидается в районе 2060 г. Тем не менее текущие темпы развития не позволяют рассчитывать на одновременную и всеобщую доступность чистой воды и энергии в 2030 г. В достижении поставленных целей нельзя делать ставку лишь на появление новых технологий. В связи с этим предстоит выявить, смоделировать и оперативно масштабировать практические решения, позволяющие реализовать задачи без ущерба для глобальных экосистем.

В статье проанализированы вызовы и возможности, связанные с синхронизацией целей 6 и 7. Описывается динамика устойчивого развития в данных направлениях. Полученные результаты рассматриваются в контексте интеграции уровней управления — от локального к национальному и международному. Кейсы Индии, Ганы и Марокко демонстрируют действенные практики для достижения Целей устойчивого развития по воде и энергии, основанные на комплексном подходе. Заключительный раздел содержит рекомендации для политики стимулирования и, в оптимальном варианте, интеграции национальных инициатив по обеспечению всеобщего доступа к рассматриваемым ресурсам.

Устойчивое развитие энерго- и водоснабжения

Реализация Целей устойчивого развития по доступу к энергетическим и водным ресурсам предполагает согласованность национальной политики разных стран по соответствующим направлениям. В некоторых аспектах их координация достигла высокого уровня, а по другим ее необходимо усиливать. Только при таких условиях возможен успех в достижении указанных целей к 2030 г. Интегральный подход подразумевает признание взаимосвязи систем энерго- и водоснабжения. Например, производство оборудования для добычи

и переработки природных ресурсов, используемых для получения чистой энергии и питьевой воды (в частности, фотогальванических солнечных панелей, насосов и труб, ветровых и водяных турбин), может быть как энерго-, так и водоемким. На долю энергетики приходится около 15% мирового потребления воды [UNESCO, 2018], которая служит для добычи энергоресурсов и генерации электричества [IEA, 2013; Mekonnen et al., 2015; Tan, Zhi, 2016]. На начальном этапе производства энергии взаимосвязь проявляется в потреблении (и загрязнении) воды для добычи ископаемого топлива, производств ядерного топлива и биотоплива из кукурузы. Указанные источники первичной энергии характеризуются высокой водоемкостью.

Вода необходима и для производства энергии на гидро- и тепловых электростанциях. К наиболее водоемким энергетическим технологиям относятся концентрированные фотоэлектрические установки и угольные электростанции с системами улавливания и секвестрации углерода [Macknick et al., 2012]. Больше всего воды потребляют рециркуляционные системы охлаждения таких электростанций. Напротив, нетепловые возобновляемые источники энергии — ветровая и гидроэнергетика — характеризуются минимальной водоемкостью и, следовательно, предпочтительны для районов с дефицитом воды.

В свою очередь очистка воды — энергоемкий процесс. Обычно в ходе исследования взаимосвязи воды и энергии оцениваются энергопотребление в ходе забора, очистки, опреснения, контроля температуры воды и очистки стоков [Kahrl, Roland-Holst, 2008; International Energy Agency, 2016; Copeland, Carter, 2017]. Ряд исследователей фокусируются на связи этой деятельности с изменением климата [Rothausen, Conway, 2011; Pittock et al., 2015], способным нарушить исторически сложившийся водный цикл.

Глобальный характер взаимосвязи воды и энергии обуславливает необходимость интеграции международных целей в области энергетики и водопользова-

ния. Постановка комплексных ориентиров устойчивого развития в энергетике, водном хозяйстве и производстве продуктов питания повысит экономическую эффективность, устранив противоречия между этими сферами и обеспечит рациональное использование ресурсов [Weitz et al., 2014]. Это возможно при условии скоординированных действий в смежных областях и на всех уровнях реализации политики и финансирования [Yumkella, Yillia, 2015, p. 8]. Эрика Веинталь (Erica Weinthal) [Weinthal, 2018, p. 43] отмечает отсутствие фокуса на взаимосвязи водной и энергетической сфер в «Целях развития тысячелетия» ООН [UN, 2015] и указывает на необходимость учитывать опыт осуществления соответствующих мероприятий по водоснабжению в отношении энергетики. В попытках ответа на этот призыв нами составлена матрица, устанавливающая связь между типичными целями государственной политики в области энергетики и водоснабжения с соответствующими ЦУР (табл. 1).

Симметрия указанных целей обеспечивает четкую структуру для разработки комплексной политики по обеспечению всеобщей доступности, качества, эффективности использования природных ресурсов, стимулирования сотрудничества и трансфера технологий. Интеграция энергетической и водной политики внесет вклад в реализацию других ЦУР (в частности, 6.5, 6.6, 9.4, 12.2, 12.5, 13.2 и 15.9).

Многие страны уделяют внимание такой интеграции, при этом часто не учитывают определенных глобальных аспектов. Эксперты обращают внимание на необходимость усилить координацию и разработать соответствующие мероприятия. В работе [Scott et al., 2011] рассмотрены институциональные и политические аспекты взаимосвязи водоснабжения и энергетики на локальном и национальном уровнях в США, предложены ответы на связанные с этим вызовы. Китайские исследователи изучили синергетический потенциал от интеграции водной, энергетической и климатической политики [Fan et al., 2018]. Как показывает опыт

Табл. 1. Связь Целей устойчивого развития с комплексной государственной водно-энергетической политикой

Цели государственной политики	ЦУР 2030 в сфере энергетики	ЦУР 2030 в сфере водоснабжения
Всеобщая обеспеченность энергией и водой по доступным ценам	7.1. Обеспечение всеобщего доступа к недорогим, надежным и современным услугам энергоснабжения	6.1. Обеспечение всеобщего и равного доступа к безопасной питьевой воде по доступным ценам
Качество энергии и воды	7.2. Существенное увеличение доли возобновляемых источников в глобальном энергобалансе	6.3. Повышение качества воды путем снижения уровня загрязнения, прекращения сбросов и минимизации выбросов вредных химикатов и материалов, двукратного снижения доли неочищенных стоков, существенного повышения повторного использования воды в глобальном масштабе
Эффективное энерго- и водопотребление	7.3. Удвоение темпов глобального роста энергоэффективности	6.4. Существенное повышение эффективности водопотребления во всех секторах, обеспечение устойчивого водозабора и водоснабжения [...]
Международное сотрудничество и трансфер технологий	7.a. Активизация международного сотрудничества для расширения доступа к результатам исследований и технологиям чистой энергетики [...]	6.a. Активизация международного сотрудничества и [...] поддержка развивающихся стран в области реализации программ водоснабжения и водоотведения, включая [...] технологии

Источник: [UN General Assembly, 2017].

Израиля, при разработке комплексной переходной схемы управления энергетическими и водными системами следует принимать во внимание их взаимозависимость [Teschner et al., 2012]. В исследовании [Siddiqi, Anadon, 2011] оценивается энергопотребление водоемких отраслей в Ближневосточном регионе.

Разрозненность политики в водной и энергетической сферах препятствует выработке эффективных решений по их развитию [Hussey, Pittock, 2012; Pittock et al., 2015]. В специальном выпуске журнала *Ecology and Society* проанализированы аспекты взаимозависимости энергетических и водохозяйственных систем, предложения по комплексным мерам политики и барьеры, препятствующие интеграции. Авторы рассмотрели вызовы, возникающие на стыке энергетики и водного хозяйства в США, Нидерландах, Италии и других странах [Stillwell et al., 2011; Bonte et al., 2011], которые связаны с водопотреблением на тепловых электростанциях, выбросами парниковых газов в процессе водоочистки, рисками для водоносных горизонтов, подземными хранилищами тепловой энергии, потреблением энергии и воды при производстве биомассы [Bonte et al., 2011; Dalla-Marta et al., 2011]. Сравнение данных о водопотреблении энергетического сектора в более чем 150 странах указывает на необходимость повышения качества информации и стандартов отчетности в глобальном масштабе [Spang et al., 2014]. В ряде исследований подчеркивается необходимость увязывания энергетической и водной политики на национальном и локальном уровнях с реализацией международных целей [Rasul, 2016; Biermann et al., 2017; Rivera et al., 2017].

В Южной Азии слабая отраслевая координация и институциональная фрагментарность обуславливают неустойчивое потребление ресурсов, что в долгосрочной перспективе представляет угрозу для продовольственной, водной и энергетической безопасности региона, затрудняет реализацию ЦУР [Rasul, 2016, p. 14]. Успех в их достижении определяется институциональными факторами, в частности формализацией госу-

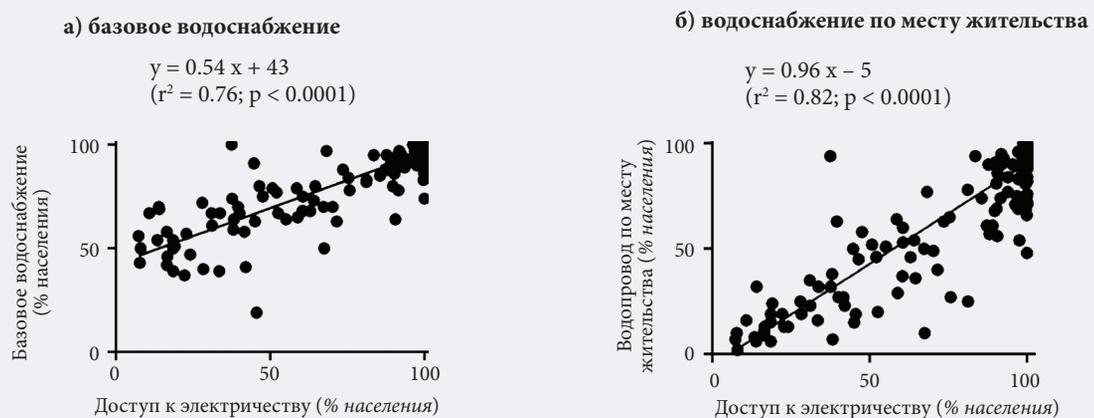
дарственных задач и обязательств, интеграцией отраслевой политики и эффективной увязкой глобальных и национальных целей [Biermann et al., 2017, p. 28]. Опыт Боготы (Колумбия) показывает, что применение глобальных стандартов устойчивого развития на городском уровне способствует легитимации локальных акторов и программ устойчивого развития [Rivera et al., 2017]. Авторы упомянутых работ отмечают потребность в изучении связи ЦУР, касающихся энергетики и водопользования, с интеграцией политики в этих сферах на национальном и местном уровнях.

Взаимодополняющие инициативы

Побочным эффектом мер по развитию энергетики может стать ограниченная доступность воды на региональном и локальном уровнях. Добыча и переработка ископаемого и ядерного топлива, орошение полей, на которых выращивается топливная биомасса, и тепловые электростанции являются крупными потребителями и/или загрязнителями водных ресурсов. Напомним, что опреснение, очистка и доставка воды в населенные пункты требуют энергии. Тем не менее в 2015 г., когда были приняты ЦУР, в 191 стране отмечался одновременный рост энерго- и водоснабжения (рис. 1). В государствах с минимальным доступом к электричеству лишь 40% населения обеспечено водой (рис. 1а). На рис. 1б видно, что процент домохозяйств, имеющих водопровод, остается незначительным до того, пока доля населения, снабжаемого электричеством, не достигнет 5%. Обеспеченность большинства людей электроэнергией коррелирует с показателями всеобщей доступности воды (базовой и по месту жительства). Эти данные подтверждают положение об эффективности целенаправленной, скоординированной межсекторальной политики, в данном случае — мероприятий на стыке энергетики и водного хозяйства.

Рекомендации по учету и практическому применению взаимосвязи систем энерго- и водоснабжения

Рис. 1. Соотношение доли населения, имеющего доступ к электричеству, с показателями обеспеченности водоснабжением, по видам (%)



Примечание: приведены данные по 191 стране за 2015 г.

Источники: [UNICEF, 2017; World Bank, 2018b].

обычно разрабатываются на национальном, региональном и локальном уровнях [Servert et al., 2016; Sklarew, Sklarew, 2017; Kumar et al., 2018]. Так, в работе [Al-Kharaghoul et al., 2009] проанализированы параметры опреснительных установок на ветровой и солнечной энергии, используемых в арабском регионе. На примере чилийской горнодобывающей промышленности исследованы преимущества, возникающие при опреснении морской воды с помощью установок, работающих на солнечной энергии, вместо опреснителей, подключенных к централизованной энергосети [Servert et al., 2016].

Значимая роль институциональной поддержки (на национальном и локальном уровнях) для внедрения микрогидротурбин, которые устанавливаются в обычные водопроводные трубы или системы ливневого водоотведения для выработки электроэнергии, отмечалась в нашей предыдущей работе [Sklarew, Sklarew, 2017]. В других публикациях описан комплексный эффект использования заякоренных плавучих платформ, на которых установлены фотоэлектрические преобразователи (*floatovoltaics*) [Kumar et al., 2018; Sengupta, 2017].

Ни одно из этих исследований не объясняет, как глобальные подходы к сфере энерго- и водоснабжения должны сочетаться с разработкой политических инициатив национального, регионального и локального уровней. Однако они создают основу для анализа того, каким образом глобальные цели повышения доступности энергии и воды могли бы повлиять на формирование комплексной водно-энергетической политики национальными правительствами. В нашей статье представлено пилотное исследование подобного рода, из которого следуют выводы в отношении разработки политики по расширению доступа к чистой энергии и воде, учитывающей взаимозависимость и комплементарность связанных с ними секторов.

Фокус водной и энергетической политики на устойчивое развитие

За четверть века с момента принятия Декларации Рио-де-Жанейро до установления ЦУР доля населения планеты, имеющая доступ к электричеству и качественным источникам воды, выросла на 15 п.п. — с 71 до 87% и с 76 до 91% соответственно [World Bank, 2018b]. Многие страны, существенно продвинувшиеся в области энерго- и водоснабжения в течение 1990–2015 гг., добились этого преимущественно через реализацию отдельных целевых инициатив. В первую двадцатку таких государств входят Индия и Гана, которые могут реализовать ЦУР по воде и энергии ранее 2030 г. Их программы предусматривают координацию водной и энергетической политики для широкого доступа к этим ресурсам в будущем.

За последние 25 лет доля населения Индии, обеспеченная базовыми источниками водоснабжения, выросла с 70 до 94% [Ritchie, Roser, 2018], доступность электричества удвоилась — с 43 до 88% [World Bank, 2018b]. Это стало возможным благодаря созданию индийским правительством в 1991 г. Национальной миссии водоснабжения им. Раджива Ганди (Rajiv Gandhi

National Drinking Water Mission), призванной повысить обеспеченность населения чистой водой. После принятия в 2005 г. программы «Bharat Nirman» основное внимание уделяется строительству водопроводов. Одновременно власти реализовывали проекты развития электросетей и производства энергии из возобновляемых источников. В 1989 г. инициирована программа индивидуального подключения к электросетям домашних хозяйств, находящихся за чертой бедности. В 2003 г. принят «Закон об электроэнергии» (Electricity Act), предписывающий увеличение электроснабжения сельских районов за счет расширения сетей и развития распределенной генерации. Инструментом его реализации стала утвержденная в 2005 г. правительством «Программа электрификации сельских районов им. Раджива Ганди Грэмина Видьютикарана Йоджаны» (Rajiv Gandhi Grameen Vidyutikaran Yojana (RGGVY) rural electrification program) [Nath, 2011].

В Гане доля населения, имеющего доступ к воде, в 2015 г. выросла на треть по сравнению с 1990 г. (89 и 56%, соответственно). Наряду с этим отмечен колоссальный рост доступности электричества — с 24 до 76%. Политика базировалась на соответствующей цели развития тысячелетия, определенной ООН в 2000 г.: к 2015 г. вдвое сократить численность населения, не имеющего доступа к питьевой воде [United Nations, 2015].

Развитие водоснабжения осуществлялось за счет бурения скважин, оборудования колодцев и строительства местных водопроводов. Обеспеченность электричеством расширялась путем развития крупных и мелких энергосетей и установки автономных преобразователей солнечной энергии. В 1988 г. правительство совместно с коммунальными службами запустило Национальную программу электрификации (National Electrification Programme), предусматривающую присоединение всех регионов и округов к электросетям. В 1989 г. основан Национальный фонд электрификации (National Electrification Fund) и принята Программа самостоятельной электрификации (Self-Help Electrification Programme, SHERP), призванная подключить к энергосети все поселения, расположенные в пределах 20 км от существующей инфраструктуры. Столбы для низковольтных линий населенные пункты предоставляли самостоятельно [Clark et al., 2005].

В соответствии с ЦУР, указанными в табл. 1, правительства Индии и Ганы реализовали ряд комплексных инициатив, направленных одновременно на консервацию водных ресурсов, расширение доступа к электричеству и снижение выбросов парниковых газов.

В Индии инициированы программы развития возобновляемой энергетики, которые не предполагают значительных масштабов водопотребления. Речь идет о крупных ветровых электростанциях, семейных биогазовых установках, уличном освещении на солнечной энергии и фотогальванических системах. Некоторые из технологий, например микрогидроэлектростанции, используют имеющуюся водную инфраструктуру, не требуют дополнительных ресурсов и не увеличивают нагрузку на окружающую среду [Arora et al., 2010]. После принятия ЦУР в 2017 г. была утверждена программа

«Saubhagya Scheme», нацеленная на электрификацию всех домохозяйств Индии к концу 2018 г. с бюджетом 2,5 млрд долл. [Government of India, 2017]. Местные органы власти совместно с частным сектором формируют миниэнергосети, работающие на возобновляемых источниках энергии, реализуют проекты водоочистки на основе технологий обратного осмоса и устанавливают упомянутые плавучие гальванические станции. В 2018 г. стартовали программы по развитию генерации энергии из биомассы, ветровой и солнечной энергетики.

В Гане в 2012 г. утвержден «План развития устойчивой энергетики для всех» (Sustainable Energy for All Action Plan), предусматривающий повсеместную электрификацию к 2020 г. [Energy Commission of Ghana, 2012]. Годом ранее принят «Закон о возобновляемой энергии» (Renewable Energy Act), предписывающий к 2020 г. вывести из эксплуатации крупные гидроэлектростанции. Он устанавливает регулятивные рамки для таких инструментов политики, как «зеленые тарифы» (*feed-in tariffs*) и системы «чистого измерения» (*net metering*) [IEA, 2014]. С 2013 г. действуют «зеленые тарифы» на энергию, произведенную ветровыми, солнечными и малыми гидростанциями, из биомассы, биогаза и геотермальных источников. После принятия ЦУР в Гане в 2018 г. инициированы программы установки солнечных панелей на крышах зданий по всей стране суммарной мощностью 200 МВт. Проекты, основанные на взаимодополняемости энерго- и водоснабжения, включают установку водяных насосов на солнечной энергии как альтернативы водопроводу.

На примере Марокко можно видеть, как всеобщая электрификация, достигнутая в стране в 2015 г., способствует расширению доступности воды. Комплексные водно-энергетические инициативы здесь начали реализовываться еще до принятия ЦУР. При этом что за разработку водной и энергетической политики отвечают разные ведомства, некоторые из этих программ предусматривают скоординированные мероприятия. В 1995 г. Национальное бюро по электроэнергии (National Office of Electricity) утвердило «Глобальный план электрификации сельских территорий» (Global Rural Electrification Plan). Началась работа по подключению отдаленных районов к единой энергосети с использованием автономных установок на возобновляемых источниках (ветровые, гидро- и солнечные электростанции). С 2004 г. действует государственно-частное партнерство по установке и эксплуатации 15 насосных станций на солнечной энергии для водоснабжения труднодоступных населенных пунктов. «Закон о возобновляемой энергетике» (Renewable Energy Law), принятый в 2009 г., регулирует производство и коммерциализацию солнечной (с помощью фотогальванических и термальных преобразователей) и ветровой энергии.

«Закон 58-15» (Law 58-15) от 2015 г. предписывает применение системы чистого измерения энергии, полученной от фотогальванических преобразователей и наземных ветровых электростанций, подключенных к централизованным сетям. В 2013 г. Министерством энергетики, горнодобывающей промышленности, водоснабжения и экологии Марокко (Ministry of Energy, Mining,

Water and Environment) разработана «Национальная программа использования насосов на солнечной энергии для водосберегающего орошения» (National Program for Solar Pumping in Irrigation Water Saving). Ее цель — снизить потребление бутана и стимулировать использование чистой энергии в системах орошения путем предоставления малым и средним фермам грантов на приобретение фотогальванических насосов для малой ирригации [Government of Morocco, 2016].

После принятия ЦУР и проведения в Марокко Всемирной конференции ООН по вопросам изменения климата в 2016 г. (Climate Change Conference of the Parties (COP 22)) марокканское правительство сфокусировалось на развитии солнечной энергетики. Совместно с Программой развития ООН (ПРООН) Национальное агентство по развитию возобновляемой энергетики и повышению энергоэффективности (Renewable Energy and Energy Efficiency National Development Agency) разрабатывает стандарты качества фотогальванических насосных систем, работающих по принципу «солнечной накачки» (*solar pumping*), стимулирует их применение в орошении, привлекает инвестиции в возобновляемую энергетику [UNDP, 2017a].

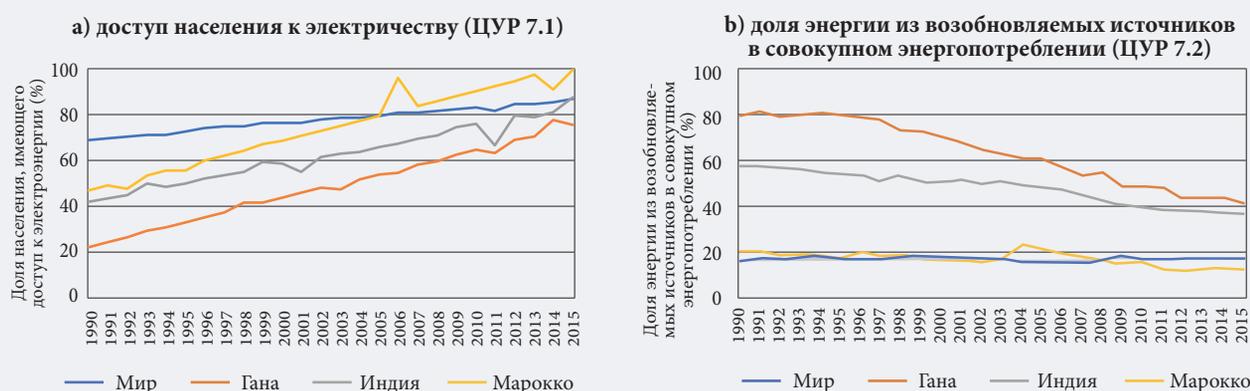
Комплексные решения по развитию энерго- и водоснабжения

На протяжении последних десятилетий Индия, Гана и Марокко инвестировали значительные средства в повышение доступности для населения чистой воды и электроэнергии. В той или иной степени они добились снижения водоемкости энергетики и энергоемкости водоснабжения, достигли одной (Марокко) или двух целей всеобщего доступа (6.1 и 7.1). Однако предпринимаемые этими и другими государствами усилия по развитию инфраструктуры недостаточны для того, чтобы к 2030 г. обеспечить безопасное водоснабжение всех домохозяйств. К тому же, несмотря на технологическое развитие и уменьшение цен в 1990–2015 гг., доля возобновляемых источников в энергобалансе каждой из упомянутых стран существенно снизилась.

Рис. 2 демонстрирует снижение потенциала для устойчивого производства чистой энергии, что приведет к катастрофическим последствиям в плане борьбы с изменением климата (цель 13), создания устойчивых инфраструктур (цель 9) и внедрения рациональных моделей производства и потребления (цель 12).

Ведется поиск возможностей преодоления отмеченного негативного тренда. Страны, которым пока не удалось обеспечить тотальный доступ к электричеству и чистой воде, могут извлечь уроки из практик Индии, Ганы и Марокко. Их опыт продемонстрировал, как интеграция программ в сфере чистой энергии и водной безопасности на национальном уровне способствует реализации локальных проектов по удовлетворению потребностей удаленных населенных пунктов в этих ресурсах. Синхронизация с глобальными целями, в частности ЦУР, могла бы повысить эффективность национальной политики, регулирующей подобные инициативы, и свести к минимуму конфликты между ними.

Рис. 2. Динамика показателей за 1990–2015 гг.



Источник: [World Bank, 2018a].

Оценивая прогресс стран в реализации цели 7 (всеобщий доступ к недорогим и чистым источникам энергии), ООН признает, что «для достижения целей в области энергетики на период до 2030 г. необходимо дальнейшее укрепление национальных приоритетов и политической воли» [UN, 2018]. Стратегический план ПРООН на 2018–2021 гг. предусматривает формирование двух глобальных платформ для оказания помощи государствам в разработке комплексной политики по реализации ЦУР [UNDP, 2017a], призванных синхронизировать глобальные и национальные цели. Первая платформа направлена на выработку адресных комплексных решений по преодолению экономических, социальных и экологических проблем в отдельных странах [UNDP, 2017b]. В функции второй входят техническая и политическая консультативная поддержка для национальных платформ и программ ПРООН, содействие формированию знаний, инновационной деятельности и выстраиванию отношений в рамках системы развития ООН с международными финансовыми организациями и другими партнерами [UNDP, 2017b].

Заключение

При сохранении тенденций, наметившихся в последние 25 лет, можно рассчитывать на достижение в мировом масштабе к 2030 г. базовой доступности чистой воды (в пределах 30 минут от места жительства, включая обратный путь), а к 2040 г. — электроэнергии. Однако для того, чтобы обеспечить каждое домохозяйство и водой, и электричеством, может потребоваться еще 25 лет. Решение этой задачи является основополагающим условием устойчивого развития, т. е. непрерывного удовлетворения потребностей в рассматриваемых ресурсах. Например, в случае Ганы подобные решения высвободят для женщин дополнительное время, дающее им возможность выполнять оплачиваемую работу [Costa et al.,

2009]. Таким образом, одновременная обеспеченность домохозяйств чистой водой (цель 6) и энергией (цель 7) позволит уменьшить уровень бедности (цель 1), в чем особенно заинтересованы ряд международных организаций (включая ПРООН и Всемирный банк), стремящихся полностью реализовать обозначенные цели к 2030 г. или даже раньше.

Комплексный подход к развитию энергетики и водного хозяйства способен ускорить достижение обеспеченности чистой энергией и водой в мировом масштабе. Он охватывает управление энергоемкостью производства и доставки чистой воды и соответственно «чистой водоемкостью» генерации и транспортировки энергии (включая потребление и загрязнение воды). Его применение подразумевает переход от компромиссных соглашений (ставки на обеспеченность водой при дефиците энергии либо наоборот) к поиску решений, раскрывающих потенциал одновременного развития обеих сфер по «бесприоритетным» сценариям (см. рис. 1).

Политика, основанная на подобном подходе, поможет сформировать комплексную водно-энергетическую инфраструктуру, состоящую из плавучих гальванических установок в водоемах, микрогидротурбин в водопроводах, опреснительных установок, работающих на метане, полученном в ходе очистки сточных вод, и батарей на водородных топливных элементах, восстанавливающих чистую воду из свежего воздуха. Государства, применяющие комбинированные водно-энергетические решения, смогут заметно увеличить долю возобновляемых источников в растущем объеме энергопотребления, которая за наблюдаемый период сохраняется на стабильно низком уровне (рис. 2). Например, Индия ставит задачу через два-три года удвоить генерацию энергии из возобновляемых источников по сравнению с уровнем 2016 г., а Марокко — повысить 13%-ю долю установленных мощностей (показатель 2015 г.) до 42% к 2020 г. [World Energy Council, 2018]. Однако этих усилий будет недостаточно — при разработке политики и стра-

тегий технологического развития целесообразно также учитывать эффекты и возможности, связанные с обеспечением водной безопасности, и другие экосистемные услуги (например, цели 13–15).

Структура политических целей и ЦУР, представленная в табл. 1, может использоваться для учета соответствующих приоритетов при разработке национальных стратегий. Глобальные цели служат критериями для комплексной, междисциплинарной оценки государственной политики. Однако предлагаемый набор критериев (доступные цены, качество, эффективность и техническое сотрудничество) носит не нормативный, а рекомендательный характер. Ведомствам, ответственным за эксплуатацию природных ресурсов, следует скорректировать деятельность или на основе указанных критериев разработать собственную структуру для формирования комплексной политики в рассматриваемых сферах.

Предыдущие исследования взаимозависимости энергетики и водопользования на глобальном и национальном уровнях выявили связанные с ними вызовы,

ответить на которые может комплексная государственная водно-энергетическая политика. Ее необходимо разрабатывать в контексте существующих глобальных структур (например, ЦУР), чтобы обеспечить интеграцию с более общими целями, устранить потенциальные конфликты, использовать синергию. Такой глобальный подход требует координации деятельности национальных правительств и международных организаций, в частности ПРООН и Всемирного банка. ПРООН заявила о намерении поддерживать реализацию национальных целей по обеспечению доступа к чистой энергии и воде путем обучения, создания необходимого потенциала и разработки интегративных инструментов политики. Поддержка ООН методологической интеграции устойчивого развития по всему спектру ЦУР, аналогично описанному выше подходу к взаимосвязанным сферам энергетики и водопользования, будет иметь решающее значение для успеха стран в реализации ЦУР к 2030 г. Подобная стратегия обеспечит непрерывное устойчивое развитие в мировом масштабе.

Библиография

- Al-Karaghoul A., Renne D., Kazmerski L.L. (2009) Solar and wind opportunities for water desalination in the Arab regions // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 13. № 9. P. 2397–2407.
- Arora D.S., Busche S., Cowlin S., Engelmeier T., Jaritz J., Milbrandt A., Wang S. (2010) Indian Renewable Energy Status Report: Background Report for DIREC 2010 (NREL/TP-6A20-48948, 991558). Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. Режим доступа: http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/Indian_RE_Status_Report.pdf, дата обращения 12.08.2018.
- Bieber N., Ker J.H., Wang X., Triantafyllidis C., van Dam K.H., Koppelaar R.H.E.M., Shah N. (2018) Sustainable planning of the energy-water-food nexus using decision making tools // *Energy Policy*. Vol. 113. P. 584–607. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.037>, дата обращения 25.09.2018.
- Biermann F., Kanie N., Kim R. (2017) Global governance by goal-setting: The novel approach of the UN Sustainable Development Goals // *Current Opinion in Environmental Sustainability*. Vol. 26–27. P. 26–31. DOI: 10.1016/j.cosust.2017.01.010.
- Bonte M., Stuyfzand P.J., Hulsmann A., Van Beelen P. (2011) Underground Thermal Energy Storage: Environmental Risks and Policy Developments in the Netherlands and European Union // *Ecology and Society*. Vol. 16. № 1. Article 22 [online]. Режим доступа: <http://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss1/art22/>, дата обращения 18.12.2017.
- Clark A., Davis M., Eberhard A., Gratwick K., Wamukonya N. (2005) Power Sector Reform in Africa: Assessing the Impact on Poor People. Report Prepared by the Graduate School of Business, University of Cape Town. Washington, D.C.: World Bank.
- Copeland C., Carter N.T. (2017) Energy-Water Nexus: The Water Sector's Energy Use. Washington, D.C.: Congressional Research Service.
- Cosgrove W.J., Rijsberman F.R. (2000) *World Water Vision: Making Water Everybody's Business*. London: Earthscan Publications.
- Costa J., Hailu D., Silva E., Tsukada R. (2009) The Implications of Water and Electric Supply for the Time Allocation of Women in Rural Ghana (Working Paper № 59). Brasilia: International Policy Centre for Inclusive Growth, United Nations Development Programme.
- Dalla-Marta A., Natali F., Mancini M., Ferrise R., Bindi M., Orlandini S. (2011) Energy and Water Use Related to the Cultivation of Energy Crops: A Case Study in the Tuscany Region // *Ecology and Society*. Vol. 16. № 2. Article 2 [online]. Режим доступа: <http://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss2/art2/>, дата обращения 17.10.2018.
- Energy Commission of Ghana (2012) Sustainable Energy for All Action Plan. Accra: Energy Commission of Ghana.
- Fan J.-L., Kong L.-S., Zhang X. (2018) Synergetic effects of water and climate policy on energy-water nexus in China: A computable general equilibrium analysis // *Energy Policy*. Vol. 123. P. 308–317. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.09.002>, дата обращения 18.12.2017.
- Government of India (2017) Guidelines for Pradhan Mantri Sahaj Bijli Har Ghar Yojana (Saubhagya). Delhi: Ministry of Power, Government of India.
- Government of Morocco (2016) Programme for Large-scale Deployment of Solar Pumping in Irrigation Water Saving Projects. Rabat: Ministry of Energy, Mining, Water and Environment, Government of the Kingdom of Morocco.
- Hussey K., Pittock J. (2012) The Energy-Water Nexus: Managing the Links between Energy and Water for a Sustainable Future // *Ecology and Society*. Vol. 17. № 1. Article 31 [online]. Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.5751/ES-04641-170131>, дата обращения 18.12.2017.

- IEA (2013) Renewable Energy Act. Law 13-09. Paris: International Energy Agency. Режим доступа: <https://www.iea.org/policiesandmeasures/renewableenergy/?country=Морocco>, дата обращения 18.12.2017.
- IEA (2014) Renewable Energy Act 2011. Paris: International Energy Agency. Режим доступа: <https://www.iea.org/policiesandmeasures/pams/ghana/name-130043-en.php>, дата обращения 18.12.2017.
- IEA (2016) World Energy Outlook 2016: Water-Energy Nexus. Paris: International Energy Agency.
- IEA (2018) Global Energy and CO₂ Status Report 2017. Paris: International Energy Agency. Режим доступа: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GECO2017.pdf>, дата обращения 10.05.2018.
- ILEC, UNEP (1993) Data Book of Lake Environments: A Survey of the State of World Lakes. Otsu, Japan: International Lake Environment Committee, United Nations Environmental Programme.
- Kahrl F., Roland-Holst D. (2008) China's water – energy nexus // *Water Policy*. Vol. 10. P. 51–65. Режим доступа: <https://doi.org/10.2166/wr.2008.052>, дата обращения 10.05.2018.
- Kumar N.M., Kanchikere J., Mallikarjun P. (2018) Floatovoltaics: Towards improved energy efficiency, land and water management // *International Journal of Civil Engineering and Technology*. Vol. 9. P. 1089–1096.
- Macknick J., Newmark R., Heath G., Hallett K.C. (2012) Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: A review of existing literature // *Environmental Research Letters*. Vol. 7. Article 045802 [online]. Режим доступа: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/045802>, дата обращения 17.10.2018.
- Mekonnen M., Gerbens-Leenes, P.W., Y. Hoekstra, A. (2015) The consumptive water footprint of electricity and heat: A global assessment // *Environmental Science: Water Research & Technology*. Vol. 1. P. 285–297. Режим доступа: <https://doi.org/10.1039/C5EW00026B>, дата обращения 17.10.2018.
- Nath A. (2011) India's Progress Toward Achieving the Millennium Development Goals // *Indian Journal of Community Medicine*. Vol. 36. № 2. P. 85–92.
- Pittock J., Hussey K., Dovers S. (2015) *Climate, Energy and Water*. New-York: Cambridge University Press.
- Rasul G. (2016) Managing the food, water, and energy nexus for achieving the Sustainable Development Goals in South Asia // *Environmental Development*. Vol. 18 (April). P. 14–25.
- Ritchie H., Roser M. (2018) Water Access, Resources & Sanitation [online]. Режим доступа: <https://ourworldindata.org/water-access-resources-sanitation>, дата обращения 10.06.2018.
- Rivera J.M., Munoz M.J., Moneva J.M. (2017) Revisiting the Relationship Between Corporate Stakeholder Commitment and Social and Financial Performance // *Sustainable Development*. Vol. 25. № 6. P. 482–494.
- Rothausen S.G.S.A., Conway D. (2011) Greenhouse-gas emissions from energy use in the water sector // *Nature Climate Change*. Vol. 1. P. 210–219. Режим доступа: <https://doi.org/10.1038/nclimate1147>, дата обращения 10.06.2018.
- Sachs J., Schmidt-Traub G., Kroll C., Lafortune G., Fuller G. (2018) *SDG Index and Dashboards Report 2018*. New York: Bertelsmann Stiftung and Sustainable Development Solutions Network (SDSN).
- Scott C.A., Pierce S.A., Pasqualetti M.J., Jones A.L., Montz B.E., Hoover J.H. (2011) Policy and institutional dimensions of the water–energy nexus // *Energy Policy*. Vol. 39. P. 6622–6630. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.013>, дата обращения 15.09.2018.
- Sengupta D. (2017) NTPC installs India's largest floating solar PV plant in Kerala // *The Economic Times*. 10.03.2017. Режим доступа: <https://economictimes.indiatimes.com/industry/energy/power/ntpc-installs-indias-largest-floating-solar-pv-plant-in-kerala/articleshow/57577004.cms>, дата обращения 28.06.2018.
- Servert J., Cerrajero E., Fuentealba E. (2016) Synergies of solar energy use in the desalination of seawater: A case study in northern Chile. Paper presented at the SOLARPACES 2015: AIP International Conference on Concentrating Solar Power and Chemical Energy Systems. Режим доступа: <https://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4949232>, дата обращения 28.06.2018.
- Siddiqi A., Anadon L.D. (2011) The water–energy nexus in Middle East and North Africa // *Energy Policy*. Vol. 39. P. 4529–4540. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.023>, дата обращения 10.06.2018.
- Sklarew J.F., Sklarew D.M. (2017) *Empowering Resilience in Energy and Water Systems: Addressing Barriers to Implementation of Urban Hydroelectric Micro-turbines*. The CIP Report. Fairfax, VA: George Mason University.
- Spang E.S., Moomaw W.R., Gallagher K.S., Kirshen P.H., Marks D.H. (2014) The water consumption of energy production: An international comparison // *Environmental Research Letters*. Vol. 9. № 10. Article 105002. Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/9/10/105002/pdf>, дата обращения 15.06.2018.
- Stillwell A.S., King C.W., Webber M.E., Duncan I.J., Hardberger A. (2011) The Energy-Water Nexus in Texas // *Ecology and Society*. Vol. 16. № 1. Article 2 [online]. Режим доступа: <http://www.ecologyandsociety.org/vol16/iss1/art2/>, дата обращения 19.07.2018.
- Tan C., Zhi Q. (2016) The Energy-Water Nexus: A Literature Review of the Dependence of Energy on Water // *Energy Procedia*. Vol. 88. P. 277–284. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.154>, дата обращения 24.08.2018.
- Teschner N., McDonald A., Foxon T.J., Paavola J. (2012) Integrated transitions toward sustainability: The case of water and energy policies in Israel // *Technological Forecasting and Social Change*. Vol. 79. № 3. P. 457–468.
- UN (2015) *Millennium Development Goals Report 2015*. New York: United Nations Publications.
- UN (2018) *The Sustainable Development Goals Report 2018*. New York: United Nations Publications.
- UN DESA (2017) *World Population Prospects: The 2017 Revision* [online]. Режим доступа: <http://www.un.org/en/development/desa/population/publications/database/index.shtml>, дата обращения 10.05.2018.
- UN General Assembly (2017) *Work of the Statistical Commission pertaining to the 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/71/313)*. Режим доступа: http://ggim.un.org/documents/A_RES_71_313.pdf, дата обращения 24.08.2018.
- UNDP (2017a) *Country programme document for the Kingdom of Morocco*. Geneva: United Nations.

- UNDP (2017b) United Nations Development Programme Strategic Plan 2018–21. Geneva: United Nations.
- UNESCO (2018) The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- UNICEF (2017) Drinking Water [online database]. Режим доступа: <https://data.unicef.org/topic/water-and-sanitation/drinking-water/>, дата обращения 10.05.2018.
- UNSD (2018) SDG Indicators [online database]. Режим доступа: <https://unstats.un.org/sdgs/indicators/database>, дата обращения 10.05.2018.
- Weinthal E. (2018) The Sustainable Development Goals in Global Environmental Politics // A Research Agenda for Global Environmental Politics / Eds. P. Dauvergne, J. Alger. Cheltenham: Edward Elgar Publishing. P. 39–49.
- Weitz N., Nilsson M., Davis M. (2014) A Nexus Approach to the Post-2015 Agenda: Formulating Integrated Water, Energy, and Food SDGs // SAIS Review of International Affairs. Vol. 34. P. 37–50. Режим доступа: <https://doi.org/10.1353/sais.2014.0022>, дата обращения 17.09.2018.
- WHO, UNICEF (2017) Joint Monitoring Programme for Water Supply, Sanitation and Hygiene. Program Data [online database]. Режим доступа: <https://washdata.org/data> дата обращения 10.06.2018.
- World Bank (2018a) Tracking SDG7: The Energy Progress Report 2018. Washington, D.C.: World Bank. Режим доступа: <https://trackingsdg7.esmap.org/>, дата обращения 22.10.2018.
- World Bank (2018b) World Bank Development Data Group Open Data [online database]. Режим доступа: <https://data.worldbank.org/>, дата обращения 10.06.2018.
- World Energy Council (2013) World Energy Resources 2013 Survey. London: World Energy Council.
- World Energy Council (2018) World Energy Trilemma Report 2018. London: World Energy Council.
- Yumkella K.K., Yillia P.T. (2015) Framing the Water-Energy Nexus for the Post-2015 Development Agenda // Aquatic Procedia. Vol. 5. P. 8–12. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.10.003>, дата обращения 17.09.2018.

Новая технологическая революция и требования к энергетике

Сергей Филиппов

Директор, fil@eriras.ru

Институт энергетических исследований (ИНЭИ) РАН, 117186, ул. Нагорная, 31–2

Аннотация

Разворачивающаяся на наших глазах новая технологическая революция радикально меняет облик и условия развития мировой энергетики. Растущий спрос на энергию и изменение его структуры обуславливают потребность в создании прорывных технологий и освоении новых энергоносителей, что сопряжено с затратами значительных ресурсов. Исследования и разработки в энергетической отрасли требуют своевременного предвидения социально-экономических изменений и формулирования траектории развития энергетики.

В статье анализируется возможное влияние новой технологической революции на мировую и отечественную энергетику. Оцениваются текущие и пер-

спективные тренды, такие как: изменение режимов энергопотребления ввиду растущего спроса со стороны домохозяйств и сферы услуг при сокращении потребностей крупной промышленности, цифровизация, формирование мобильной и портативной энергетики и др.

Автор показывает, что в России при сохранении спроса на централизованное энергоснабжение будут развиваться распределенная генерация и когенерация на основе возобновляемых источников энергии, технологий смартгридов (smart grid) и иных решений. В статье подчеркивается, что текущая структура национального топливно-энергетического комплекса остается уязвимой к масштабной электрификации транспорта и декарбонизации мировой энергетики.

Ключевые слова: научно-технический прогресс; новая технологическая революция; постиндустриальная экономика; постиндустриальное общество; энергетика; спрос на энергию; требования к энергетике; энергетические технологии; распределенная генерация; мобильная энергетика

Цитирование: Filippov S. (2018) New Technological Revolution and Energy Requirements. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no 4, pp. 20–33. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.20.33

В мире разворачивается новая технологическая революция. Об этом свидетельствуют многочисленные впечатляющие достижения в развитии науки и технологий, массированный вывод на рынок принципиально новых инновационных продуктов. Подобные изменения не могут не затронуть энергетический сектор, поскольку удовлетворить растущие потребности позволят лишь новые энергетические технологии и энергоносители. Для этого необходимы значительные ресурсы, а потому особенную актуальность приобретает задача вовремя предвидеть ожидаемые изменения в развитии экономики и общества и те требования, которые будут предъявлены к энергетике будущего.

Всякое прогнозирование основано на анализе предшествующего опыта, в данном случае — предыдущих технологических революций и их влияния на энергетику. Известны многочисленные попытки научного осмысления технологических революций и различные концепции технологического развития человечества. В их числе — теория волнового развития, технологические уклады, волны инноваций, технологические эры, технологические циклы [van Gelderen, 1913; Šmihula, 2011; Зворыкин и др., 1962; Кондратьев, 1989; Глазьев, 1993]. Предпринимались попытки объяснить феномен ускорения научно-технического прогресса (НТП) [Šmihula, 2011; Kurzweil, 2005; Vinge, 1993] через доступ к образованию и научной информации, экономическую востребованность инноваций [Koh, Leung, 2003]. Результаты упомянутых исследований полезны для формирования возможного облика новой экономики и общества.

Вместе с тем наблюдаемые научно-технологические преобразования настолько стремительны и масштабны, что исследование их последствий для мировой и российской энергетики требует дополнительных усилий. Разработка этого направления позволит уменьшить неопределенность технологического развития энергетики и успешно решить проблемы «черных лебедей» — неожиданных событий со значительными последствиями [Taleb, 2007]. Их появления нельзя исключить даже в случае такой высокоинерционной отрасли, как энергетика. Своевременно выявлять в ней «черных лебедей» позволит регулярный мониторинг и тщательный анализ достижений науки и технологий, включая смежные области, и развитие специфичных для энергетики методов технологического прогнозирования [Филиппов, Дильман, 2018]. Сохраняют актуальность и методы системного анализа, успешно применявшиеся ранее к решению исследовательских задач [Каганович и др., 1989] и основанные на физико-техническом и последующем технико-экономическом анализе. Развитие этих подходов может оказаться конструктивным за счет внедрения в них процедур своевременного выявления новых технологий путем регулярного сканирования сектора исследований и разработок (ИиР) с использованием новейших методов анализа «больших данных».

Описываемая технологическая революция особым образом отразится на энергетике России как одного из крупнейших экспортеров сырьевых ресурсов — около половины добываемых на ее территории. В этой связи

нас интересуют прежде всего влияние новой технологической революции на мировой спрос на энергию и состояние мировых топливных рынков, что, впрочем, не отменяет значимости оценки возможных изменений внутреннего спроса.

Ключевую роль в технологическом развитии энергетики играет электроэнергетика как крупнейший мировой потребитель органических топлив. В России на ее долю приходится около 40% используемого в стране природного газа и 50% угля. На развитие электроэнергетики вынуждены ориентироваться и топливные отрасли. Основным потребителем нефтяных моторных топлив выступает транспортный сектор, который уже в обозримой перспективе может претерпеть коренные изменения. Особого внимания поэтому заслуживает место электроэнергии и моторных топлив в экономике будущего.

Технологические революции: накопленный опыт

За последние три столетия мир пережил несколько технологических революций, отразившихся на различных сферах человеческой деятельности и породивших разнообразные отраслевые революции: промышленные, энергетические, транспортные, сельскохозяйственные и т. д. Масштабное внедрение революционных новаций сопровождалось бурным развитием соответствующих отраслей экономики и скачкообразным ростом в них производительности труда и его энерговооруженности. Технологические революции завершались, как правило, формированием в этих отраслях новых технологических укладов, под которыми обычно понимают особого рода структуры, представляющие собой совокупность тесно связанных друг с другом физически и функционально технологий и систем управления ими.

Технологические и промышленные революции часто отождествляют, несмотря на то что существуют различные интерпретации этих процессов, которые делают акцент на их хронологии, технологическом наполнении и полученных результатах [Toffler, 1970; Toffler, Toffler, 2006; Bell, 1973]. И, разумеется, все промышленные революции принципиально различались энергетической составляющей.

Первая промышленная революция (первая половина XVII — начало XIX в.) состояла в переходе от ручного труда к машинному производству. Она базировалась на широком применении водяного пара и паровых машин в промышленности, замещении древесного угля каменноугольным коксом в металлургии, переводе железнодорожного и морского транспорта на паровую тягу. Это позволило механизировать основные технологические процессы и резко повысить производительность труда, сократить производственные и транспортные издержки, расширить товарооборот. Освоение подземной добычи высококалорийного каменного угля и вывод его на рынок сняли ограничения на размещение крупных производств. Уголь стал базовым видом топлива.

Вторая промышленная революция (вторая половина XIX — начало XX в.) была связана с освоением конвейерного производства, обеспечившего выпуск дешевых товаров массового спроса. Это потребовало широкого использования энергоносителей высокой «плотности» (электроэнергии и нефтяных топлив) и двигателей нового типа с большой тягой (электродвигателей и двигателей внутреннего сгорания (ДВС)), а также развития крупнотоннажной органической химии, прежде всего на основе углей. Применение электродвигателей обеспечило высокую производительность труда на установках даже малой мощности. Использование ДВС способствовало дальнейшему развитию железнодорожного и водного транспорта и возникновению новых его видов — автомобильного и авиационного. Как следствие, резко расширилась география поставок сырья, сбыта продукции и повысилась мобильность населения. Благодаря достижениям в химии удалось заметно разнообразить спектр материалов, применяемых в промышленном производстве и бытовой сфере, и совершить «зеленую» революцию в сельском хозяйстве благодаря минеральным удобрениям и средствам защиты растений и животных. Так сформировались базовые отрасли современной экономики — промышленность, транспорт, сельское хозяйство.

Третья промышленная революция (середина XX — начало XXI в.) ассоциируется с расцветом крупной промышленности, массовым внедрением электроники и средств автоматизации технологических процессов, компьютерной техники, информационных и коммуникационных технологий (ИКТ), созданием сети Интернет, началом «цифровой» революции (*digital revolution*) [Toffler, Toffler, 2006]. ИКТ проникли во все сферы производственной и повседневной деятельности человека. Их применение позволило кардинально усовершенствовать управление производственными процессами, снизить издержки и повысить качество конечной продукции, изменить условия и формы организации труда. Конкурентные преимущества получили крупные корпорации, возросла эффективность международного разделения труда, что привело к глобализации производственных отношений и формированию мировых рынков товаров и услуг, в том числе в секторах энергоносителей, энергетического оборудования, нефтесервиса и т. д. [Toffler, Toffler, 2006; Bell, 1973].

Колоссальные изменения претерпела социальная сфера. Активизировались процессы урбанизации, рост мобильности, автомобилизация населения и т. д. Концентрация промышленного производства стимулировала укрупнение городов и образование мегалополисов. Резко повысились уровень и качество жизни людей, коренным образом изменился их бытовой уклад. Беспрецедентное развитие получила сфера услуг — медицина, образование и индустрия развлечений, превратившиеся в ключевые элементы современной экономики. Важнейшим атрибутом сформировавшегося на этой основе общества потребления (*consumer society*) [Baudrillard, 1998] стал безудержный рост спроса на энергию, прежде всего в глубоко преобразованных формах — моторных топлив и электроэнергии.

Ответом на экспоненциальный рост энергопотребления и концентрацию промышленности стали создание мощных установок и сосредоточение энергетического производства на крупных предприятиях (добывающих, перерабатывающих, генерирующих), формирование мощных электроэнергетических и трубопроводных систем, освоение принципиально нового источника энергии — деления тяжелых нестабильных ядер урана, т. е. создание ядерной энергетики.

Новая технологическая революция и ее особенности

В основе очередной технологической революции, по-видимому, будут лежать новые системы управления, материалы, производственные и транспортные технологии, зачастую тесно взаимосвязанные, а потому обеспечивающие значительный синергетический эффект при совокупном применении. Технологические инновации затрагивают все отрасли экономики, изменяя спрос на энергию и требования к поставляемым энергоносителям, т. е. в конечном счете сам вектор технологического развития энергетики.

Развитие науки и возможные последствия

При всякой технологической революции появление новых технологий и материалов базируется на достижениях науки, прежде всего фундаментальной. При становлении нового технологического уклада следует ожидать сохранения тренда на ускорение генерации новых знаний и их коммерциализации. Важнейшая роль при этом будет принадлежать математике, материаловедению, робототехнике и особенно наукам о жизни: физико-химической, молекулярной и клеточной биологии, нейробиологии, бионике и т. д. Успехи в геномике могут привести к созданию «синтетической жизни» (*synthetic life*) [Richardson et al., 2017]; развитие нейротехнологий позволит ускорить разработку нейросетей и нейрокомпьютеров [Горбань, 1998]. Большие надежды на дальнейшее развитие ИКТ и систем защиты информации связаны с созданием квантовых компьютеров и разработкой методов квантовой криптографии [Ladd, 2010].

Популярна гипотеза о приближающейся эре «технологической сингулярности» (*technological singularity*) — относительно коротком периоде времени с чрезвычайно высокими темпами научно-технологического развития [Kurzweil, 2005; Vinge, 1993]. Предполагается, что в этот момент произойдут слияние машин и людей путем интеграции машинных технологий и биологической оболочки человека, соединение его умственных способностей с возможностями искусственного интеллекта и формирование на этой основе человеко-машинных гибридов (киборгов) и их сообществ. Дальнейшие успехи наук о жизни могут привести к созданию андроидов — человекоподобных синтетических живых организмов (роботов-гуманоидов). Высококачественные химические энергоносители будут покрывать их потребности в энергии, в том числе обеспечивать функционирование таких энергоемких узлов, как искусственные мышцы,

наделяющие андроидов подвижностью и позволяющие совершать полезную работу. С этой задачей может справиться глюкоза — наиболее универсальный источник энергии для метаболических процессов всех живых организмов, включая человека. Глюкоза является высококалорийным веществом (около 15.7 МДж/кг) и эффективно производится промышленным путем из доступного сырья (гидролиз крахмала или целлюлозы) или с использованием механизма фотосинтеза из CO_2 , как это происходит в естественных условиях. Впрочем, сегодня трудно в полной мере оценить реальные перспективы создания и риски массового внедрения таких инноваций, их влияние на дальнейшее развитие человеческой цивилизации, экономики, общества и, в частности, энергетики.

Новые системы управления

Новые системы управления, получившие название киберфизических систем (*cyber-physical systems*), призваны синтезировать физический и цифровой миры (виртуальную реальность) посредством интеллектуальных сетевых технологий и сенсоров [Lee, 2008; Khaitan, McCally, 2014]. Ключевая роль в этом процессе отводится специализированным встраиваемым системам (*embedded systems*), в реальном времени управляющим большим числом разнородных объектов на основе высокопроизводительных алгоритмов, микропроцессорной техники, микро- и наноразмерных исполнительных механизмов (электро- и биомеханических), «интеллектуальных» измерителей/счетчиков (*smart meters*) и (био)сенсоров, встроенных непосредственно в объект управления [Heath, 2003; Elk, 2016]. Благодаря им управление станет интеллектуальным, т. е. требующим минимального участия человека, и будет включать аналитические и прогностические функции, принятие решений с использованием ресурсов искусственного интеллекта.

Важная роль будет принадлежать новым средствам коммуникации на базе мобильной связи следующего поколения со скоростью передачи данных в десятки Гбит/с, что сделает повсеместно доступной связь в формате «от устройства к устройству» (*device-to-device, D2D*). Широкое распространение получат интеллектуальные межмашинные интерфейсы (*machine-to-machine, M2M*) и технологии автоматической идентификации объектов, в частности, с использованием радиочастотных меток (*radio frequency identification, RFID*). Расширение функциональности RFID-меток путем интеграции их с сенсорами позволит создавать «умные» продукты (*smart products*). Рост вычислительных мощностей и емкости хранилищ данных в совокупности с повышением эффективности алгоритмов обработки больших объемов разнородной информации и ее защиты (блокчейн-технологии и др.) явится серьезным успехом цифровой революции.

Встраиваемые системы способны обеспечить в режиме реального времени мониторинг состояния объекта (продукта), прогнозирование ключевых его характеристик, в том числе остаточного ресурса, определение оптимального режима взаимодействия с окружением

и автоматическое принятие решений о продолжении использования (функционирования) объекта, его развитии (модернизации) или выводе из эксплуатации. В последнем случае объект в нужное время автоматически направляется на переработку либо захоронение с обеспечением оптимальной рециркуляции ценных компонентов (металлов, пластиков и т. д.), минимизации потребления невозобновляемых природных ресурсов, включая энергетические, и любого другого негативного воздействия на окружающую среду.

Реальную проблему для массового внедрения новых систем управления может представлять обеспечение должного уровня кибербезопасности. К традиционной задаче защиты данных здесь прибавляется новая, на порядок более сложная — защита самой системы управления объекта. Скрытое несанкционированное проникновение, не требующее больших энергетических или финансовых затрат, чревато колоссальным ущербом вплоть до полного разрушения объекта, примером чего служит разрушение центрифуг на заводе по обогащению урана в Иране.

Новые производственные технологии

Новая (четвертая) промышленная революция на базе встраиваемых систем, получившая наименование *Industry 4.0* [Hermann et al., 2015], предположительно позволит резко повысить эффективность производства и сократить потребность в природных ресурсах, в том числе энергетических. Новая промышленность будет формироваться на основе большого числа новых технологий, преимущественно «природоподобных» («дружественных» к окружающей среде и климату) — термин, понимать который следует с определенной долей условности. В природе действует широкий спектр условий: от «мягких» (развитие живых организмов, минерализация, выщелачивание и др.) до экстремальных (минералообразование при сверхвысоких температурах и давлениях и т. д.) — и воздействий (механические, физико-химические, электрофизические и др.).

К перспективным производственным технологиям относятся:

- биоинженерные («живые производственные системы»);
- безмашинные способы формообразования на основе аддитивных технологий и инжиниринг поверхностей с разнообразным высокоэнергетическим воздействием на вещество (излучение различного частотного диапазона, электрические и магнитные поля высокой интенсивности, ионы высоких энергий и др.), многократно повышающим качество продукции, производительность труда и эффективность использования ресурсов;
- интеллектуальные промышленные (био)роботы для конечной сборки компонентов в производственных циклах без участия человека;
- высокоэффективное разделение газообразных и жидких сред;
- высокочувствительные сенсоры для всеобъемлющего 4D-контроля параметров физических полей, свойств и химического состава различных сред

и биологических объектов («техническое зрение», «электронный нос» и др.);

- микро- и нанoeлектромеханические системы и их миниатюрные источники питания, биомеханические устройства («искусственная мышца») с «биохимическим питанием» и т. д.

На основе перечисленных технологий предполагается создание «умных» фабрик (*smart factories*) и «темных» производств (*lights out manufacturing*) — не требующих участия человека (а значит, и освещения), полностью автоматизированных и роботизированных, позволяющих выпускать товары по индивидуальным заказам с низкими затратами. Тем самым будут сокращены неоправданные траты природных ресурсов, характеризующие современное массовое производство, значительная часть продукции которого не находит сбыта и попросту утилизируется. «Умные» фабрики и продукты позволят в полной мере управлять всем производственным циклом — от разработки продукта до его утилизации. В более отдаленной перспективе возможно создание «самовоспроизводящихся машин» (*self-replicating machine*) [Freitas, Merkle, 2004] — «выращивание» необходимых компонентов с их последующей сборкой «на месте» с использованием передовых биотехнологий.

Революционные изменения ожидаются и в технологической платформе сельского хозяйства. Роботизация обработки земли, совершенствование систем мониторинга сельхозугодий, в том числе с применением дронов и космических аппаратов, разработка новых типов сенсоров для контроля состояния почв и выращиваемых культур укладываются в концепцию «точного» (координатного) земледелия (*precision agriculture*) [Zhang et al., 2002; McBratney et al., 2005; Балабанов и др., 2013; Якушев, 2016]. Роботы, системы освещения с регулируемым спектром, светопрозрачные конструкции с большим термическим сопротивлением открывают новые возможности для развития круглогодичного тепличного земледелия. Точное земледелие в совокупности с роботизированным животноводством входит в концепцию интеллектуального сельскохозяйственного производства (*smart farming*). В более отдаленной перспективе можно ожидать массового тиражирования технологий производства натуральных высококачественных белковых продуктов питания (молока, мяса и др.) из растительного сырья с использованием искусственных организмов, включая функциональные элементы сельскохозяйственных животных. Соответствующие технологии уже активно разрабатываются.

Новые производственные технологии требуют серьезного смещения баланса потребляемой энергии в пользу электричества и ужесточения критериев качества энергии и надежности поставок.

Новые материалы

Достижения науки вкупе с новыми производственными технологиями способствуют появлению целого спектра инновационных конструкционных и функциональных материалов с уникальными свойствами. Повсеместное ужесточение природоохранного законодательства обуславливает их использование новыми

требованиями, такими как природоподобность (дружественность к окружающей среде, биосовместимость и биобезопасность при длительном нахождении в естественных условиях, т. е. (био)разложимость на безопасные компоненты (отходы) в относительно короткие сроки. В этой связи можно прогнозировать наибольшую востребованность биоматериалов и их прекурсоров (биосырье для последующей производственной переработки в промышленные товары, продукты питания, фармпрепараты и т. д.). Высоким потенциалом обладают «умные» материалы (со свойствами, изменяющимися под внешним воздействием, т. е. «материалы-хамелеоны», адаптирующиеся к условиям окружающей среды).

Энергетика испытывает острую потребность в разнообразных новых материалах. Разрабатываемые сегодня жаропрочные сплавы и термобарьерные покрытия позволяют довести температуру газов на входе в газовую турбину до 1700–1900°C, что делает возможным увеличение КПД парогазовых установок до 66–68%, а температуры пара на входе в паровую — до 720–750°C. Итогом станет рост КПД паротурбинных установок до 53–55%. 3D-печать в энергомашиностроении нуждается в диспергированных материалах узкофракционного состава, в том числе в тугоплавких (нанопорошки, наночернила).

Электроэнергетика предъявляет спрос на материалы экстремально высокой проводимости для создания новых классов проводников, включая «теплые сверхпроводники» — материалы со сверхпроводящими свойствами при комнатной температуре. Их применение будет способствовать сокращению потерь электроэнергии в сетях. Существует потребность в полупроводниковых и оптических материалах для фотопреобразователей и силовой электроники, электрокатализаторах для повышения КПД электрохимических генераторов и емкости аккумуляторов, высокопористых материалах для более эффективной теплоизоляции.

Добыча трудноизвлекаемых запасов углеводородного сырья требует новых скважинных материалов (в целях снижения вязкости флюидов и увеличения пористости вмещающих пород). «Скользкие» пластики и керамики (материалы с высокой гидрофобностью, малой шероховатостью и большой адгезией к конструкционным материалам) обеспечат значительное снижение гидравлического сопротивления трубопроводов и, следовательно, сокращение расхода энергии на перекачку нефти и других жидкостей. В нефте- и газохимии понадобятся новые высокопроизводительные катализаторы для всех базовых процессов переработки, а также мембранные материалы с управляемыми характеристиками для высокоселективного разделения жидких и газовых сред.

Для повышения безопасности ядерных технологий и достижения термоядерного синтеза необходимы новые радиационно стойкие материалы. Большие ожидания в этом отношении возлагаются на сплавы на основе корректировки изотопного состава исходных компонентов.

С разработкой новых конструкционных материалов связаны надежды на принципиально более высокие уровни энергосбережения. Так, новое поколение композитных материалов на базе синтетических биополиме-

ров, чрезвычайно прочных и легких, обещает революцию в авто- и авиастроении, приведет к существенному сокращению расхода энергии транспортными средствами. Примером может служить разрабатываемая компанией AmSilk «биосталь» — биополимерный, синтетический аналог паучьей нити (*synthetic spider silk*). Преимуществом подобных материалов являются биоразложимость и экологичность — синтезирование генномодифицированными бактериями в биореакторе с питательной средой при температуре около 37°C [Sadowy, 2018].

Создание большей части новых материалов сопряжено с широким применением электрофизических и электрохимических процессов, что означает рост спроса на электроэнергию. Для масштабного выпуска разнообразных углепластиков и иных углеродсодержащих материалов требуются мощные источники углерода. Ими могут выступать ископаемые органические топлива (уголь, природный газ, нефть) и биомасса природного или искусственного происхождения. Использование сложных биомолекул из биомассы в качестве прекурсоров промышленных биоматериалов позволяет сэкономить энергию на синтезе их из простых компонентов.

Новые транспортные технологии

Новая технологическая революция характеризуется следующими основными тенденциями в сфере транспорта:

- увеличение объемов и скорости перемещения людей и грузов;
- широкое распространение электрического и гибридного транспорта, прежде всего в городах, в целях снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду;
- высокие темпы прироста парка «легких» индивидуальных электротранспортных средств (электроскутеры, электросамокаты и т. п.);
- активное освоение воздушного пространства индивидуальным (аэромобили), легковым общественным (воздушные такси) и малотоннажным грузовым (грузовые дроны) транспортом;
- расширение использования беспилотных транспортных средств.

Реализация этих тенденций тем отчетливее, чем больше появляется новых транспортных технологий и систем управления движением разнообразных транспортных средств, в том числе беспилотных в 4D-пространстве (в реальных дорожных и воздушных условиях и реальном времени) [OECD, IEA, 2017]. Ведущие мировые автопроизводители уже вступили в новую технологическую гонку [Toyota, 2017], сосредоточившись на разработке полностью электрических (с внешне подзаряжаемыми аккумуляторами) и гибридных (с электроэнергией, генерируемой *in situ* водородными топливными элементами) автомобилей. Аналогичные схемы энергоснабжения предлагаются для легких пассажирских и грузовых летательных аппаратов. В то время как разработка новых дизельных двигателей для легковых автомобилей постепенно сворачивается, расширяются масштабы использования

традиционного городского электротранспорта — равно под- и наземного, что актуализирует вопрос оптимального соотношения общественного и индивидуального транспорта.

Популярность «умных» продуктов и дальнейшее развитие интернет-торговли вкупе с роботизированными транспортными средствами могут полностью изменить логистические схемы как на производстве, так и за его пределами. «Умные» продукты расширяют возможности отслеживания (трекинга) их временного и пространственного распространения, принципиально преобразуя характер планирования производства и сбыта товаров, сбора и переработки отслуживших свой срок изделий, утилизации отходов в сторону ресурсосбережения и охраны природной среды. Результатом массового применения «умной» логистики станут трансформация существующих и формирование новых рынков.

Развитие традиционного городского электротранспорта, массовый выпуск электромобилей и легких индивидуальных средств передвижения увеличат объемы потребления электроэнергии в городах и потребуют коренной трансформации городской электросетевой инфраструктуры. Встанет вопрос о массовом возведении дорогостоящих «быстрых электрозаправок» (использующих высокоамперный постоянный ток, мощные аккумуляторы и силовую электронику), усилении городской электросети и повышении ее надежности, «глубоком» вводе больших электрических мощностей в города, внедрении новых технологий управления сложными энергорегимами.

Постиндустриальное общество

Роль промышленного производства в экономике неуклонно сокращается на фоне неукротимого роста сферы услуг, особенно медицинских и образовательных, индустрии красоты и развлечений. Подобная динамика позволила назвать общество будущего постиндустриальным (*post-industrial society*) [Bell, 1973], синонимами которого также служат постиндустриальная экономика, экономика или общество знаний.

Такие технологии, как интернет вещей (*internet of things, IoT*) или услуг (*internet of services, IoS*), преобразуют весь сервисный и бытовой технологический ландшафт. Роботы могут постепенно вытеснить людей даже из пока еще трудно алгоритмизируемой ниши «ручного» труда: медицинского обслуживания (младший персонал), воспитания (няни, младшие воспитатели дошкольных учреждений), социального обслуживания (сиделки) и т. д. Можно ожидать дальнейшей роботизации бытовой сферы, изменения сервисов с внедрением технологии «умных» продуктов, что в конечном счете трансформирует жизненный уклад людей. У них появится больше свободного времени, возрастут их мобильность и, как следствие, спрос на транспортные услуги.

Повышение уровня жизни населения, связанное с улучшением жилищных условий, расширением использования бытовых электроприборов, осветительной и климатической техники, обеспечивающей комфортные условия вне зависимости от времени года и географиче-

ской точки планеты, приведет к росту спроса на электроэнергию и будет оказывать влияние на сезонную динамику энергопотребления. Тем самым новые технологии способны в очередной раз коренным образом преобразовать антропогенную среду, сделать ее дружелюбной, что является первоочередной, но весьма непростой задачей. Вместе с тем массовая роботизация услуг и быта, внедрение систем «умный дом», удаленное управление бытовыми приборами актуализируют проблему кибербезопасности, ответом на которую может стать концепция «умного и безопасного города» (*smart and safety city*).

Заметной тенденцией постиндустриального развития общества выступает массовое внедрение разнообразных носимых гаджетов (информационно-коммуникационных, развлекательных и др.), рынок которых достиг гигантских размеров. По данным на 2016 г., в мире активно использовалось около 5 млрд мобильных телефонов, т. е. обеспеченность жителей планеты ими превосходила 68% [Ahonen, 2016]. Примерно половина из имеющихся мобильных телефонов относится к классу смартфонов, и их удельный вес неуклонно растет. Годовые продажи смартфонов в мире в 2017 г. составили 1.46 млрд шт., а выручка превысила 300 млрд долл. Еще около 60 млрд долл. потребители потратили на приобретение сопутствующих приложений. К 2020 г. количество активных смартфонов предположительно достигнет 6 млрд шт., а обеспеченность ими — 76%. Кроме мобильных телефонов в мире эксплуатируются более 1 млрд ноутбуков и 230 млн планшетных компьютеров. Мировые продажи ноутбуков в 2017 г. превысили 162 млн шт. [T-Adviser, 2018a].

В русле глобальных тенденций находится и Россия. В 2017 г. в стране было приобретено около 28.5 млн смартфонов на общую сумму 3.6 млрд долл. [T-Adviser,

2018b]. Число активно используемых телефонов превышает 100 млн шт. Продажи ноутбуков в 2017 г. составили около 2.5 млн шт. на сумму 79.9 млрд руб. [T-Adviser, 2018a].

Аккумуляторы носимых гаджетов совокупно потребляют колоссальные объемы электроэнергии и лежат в основе так называемой портативной энергетики. Ими в существенной мере определяется рост мобильного трафика, требующего развития сетей мобильной связи и соответственно систем их энергоснабжения.

Энергетика постиндустриального периода и условия ее развития

Важными последствиями новой технологической революции для энергетики станут: а) продолжение электрификации производственной сферы, транспорта и быта и б) углубление сегментирования спроса на энергию со стороны различных страт с варьирующимися тенденциями динамики его объемов и структуры. Дальнейшему сегментированию в свою очередь подвергнется технологическая структура энергетики, подчиненная цели максимально эффективного удовлетворения будущего спроса. Наиболее ярко эта тенденция будет проявляться в электроэнергетике, в структуре которой можно выделить портативную и мобильную энергетику, распределенную генерацию и централизованное энергоснабжение. Очевидно, эти сегменты будут нуждаться в совершенно различных технологиях.

Электрификация экономики и общества

Одним из ключевых индикаторов экономического развития страны и достигнутого уровня жизни ее населения выступает величина душевого потребления

Табл. 1. Удельное электропотребление по странам мира: 2015 г.

Страна	Население (млн чел.)	Площадь суши (млн км ²)	Плотность населения (чел/км ²)	Плотность электропотребления (кВт·ч/км ² в год)	Потери в сетях (%)	Душевое электропотребление (тыс. кВт·ч/чел. в год)				
						Всего	ТЭК	Сектор конечного потребления	в том числе домохозяйства	
Развитые страны										
США	320	9.5	33.6	454	5.9	13.5	1.7	11.8	4.4	
Канада	36	10.0	3.6	61	10.0	17.0	3.0	14.0	4.7	
Япония	128	0.4	338.6	2738	4.1	8.1	0.7	7.4	2.1	
Германия	82	0.4	228.9	1678	4.0	7.3	1.0	6.3	1.6	
Франция	64	0.5	117.8	912	6.4	7.7	1.1	6.6	2.4	
Корея	51	0.1	513.7	5575	3.4	10.9	1.1	9.8	1.3	
Развивающиеся страны										
Россия	147	17.1	8.6	62	10.1	7.2	2.3	5.0	1.0	
Бразилия	206	8.5	24.2	72	16.0	3.0	0.6	2.4	0.6	
ЮАР	55	1.2	45.3	202	8.1	4.5	0.9	3.6	0.5	
Китай	1397	9.6	145.6	608	5.1	4.2	0.7	3.5	0.5	
Индия	1309	3.3	398.1	421	18.6	1.1	0.3	0.8	0.2	
Мир	7383	137.4	53.7	176	8.2	3.3	0.5	2.7	0.7	

Источник: ИНЭИ РАН.

Табл. 2. Удельное электропотребление по регионам России: 2017 г.

Регионы России	Население (млн чел.)	Площадь суши (млн км ²)	Плотность населения (чел/км ²)	Плотность электропотребления (кВт·ч/км ² в год)	Потери в сетях (%)	Душевое электропотребление (тыс. кВт·ч/чел. в год)			
						Всего	ТЭК	Сектор конечного потребления	в том числе домохозяйства
Россия	146.9	17 125.2	8.6	64	9.5	7.4	2.3	5.1	1.1
Федеральные округа									
Центральный	39.3	650.2	60.5	346	10.2	5.7	1.3	4.5	1.1
Северо-Западный	14.0	1687.0	8.3	68	9.3	8.2	2.0	6.2	1.1
Южный	16.4	447.8	36.7	154	16.0	4.2	1.2	3.0	1.0
Северо-Кавказский	9.8	170.4	57.6	145	8.5	2.5	0.7	1.8	0.7
Приволжский	29.5	1037.0	28.5	194	7.1	6.8	2.3	4.5	0.9
Уральский	12.4	1818.5	6.8	102	8.0	15.0	8.3	6.7	1.2
Сибирский	19.3	5145.0	3.7	43	12.1	11.5	2.7	8.8	1.2
Дальневосточный	6.2	6169.3	1.0	8	14.7	7.9	2.9	5.0	1.4
Субъекты РФ									
Московская область	7.5	44.3	169.4	1065	14.3	6.3	1.6	4.6	1.1
Ленинградская область	1.8	83.9	21.6	236	10.5	10.9	3.5	7.5	1.4
Москва	12.5	2.6	4810.2	21 783	7.9	4.5	0.8	3.8	1.1
Санкт-Петербург	5.4	1.4	3822.8	20 146	12.6	5.3	1.0	4.3	1.0

Источник: ИНЭИ РАН.

электроэнергии с акцентом на секторе конечного потребления и его субъектах — домохозяйствах. По этим показателям Россия существенно, в 1.5–2.5 раза, отстает от наиболее развитых стран (табл. 1), а значит, сохраняет значительный потенциал роста спроса на электроэнергию.

Характерен заметный разброс обсуждаемых показателей по регионам страны (табл. 2). Россия традиционно располагает мощным топливно-энергетическим комплексом (ТЭК) с высоким уровнем электропотребления. Отрасли ТЭК (прежде всего нефтедобыча) используют около трети производимой в стране электроэнергии, а в Уральском федеральном округе эта доля превышает половину.

Спрос на электроэнергию в большинстве ведущих стран растет опережающими темпами по сравнению с другими вторичными энергоносителями. Россия — не исключение, однако в силу активной автомобилизации высокую динамику роста здесь показывает также спрос на моторные топлива (рис. 1).

Отечественная энергетика характеризуется традиционно значительными масштабами централизованного теплоснабжения. Тепловая энергия превалирует в структуре потребления вторичных энергоносителей: ее доля превышает 42%, хотя и неуклонно сокращается (в 2000 г. она составляла более 53%). Планируемое интенсивное жилищное строительство способно переломить тенденцию к сокращению спроса на централизованное тепло, основным субъектом которого выступают домашние хозяйства с долей около 37%.

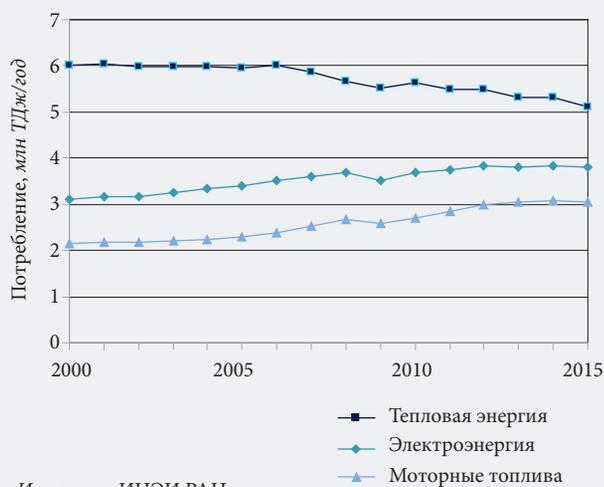
Развитие энергетики России непосредственно зависит от корректного определения перспектив когенерации и требований к разрабатываемым когенерационным установкам, обусловленных соотношением спроса на электрическую и тепловую энергию. Можно ожидать сохранения тенденции к росту данного соотношения, которое за период с 1990 г. увеличилось в 1.8 раза (рис. 2). При разработке новых когенерационных технологий необходимо стремиться к повышению не только коэффициента использования топлива, но и электрического КПД.

Ключевыми факторами роста электропотребления в постиндустриальный период станут увеличение парка портативных устройств, электрификация быта и транспорта, расширение использования электрофизических и электрохимических процессов в промышленности, повышение электроемкости сельского хозяйства. Увеличение потребления электроэнергии и расширение сфер ее применения в рамках концепции «электрического мира», сформулированной четверть века назад, предполагают удовлетворение основных потребностей человечества в энергии именно за счет электричества [Каганович и др., 1989].

Портативная энергетика

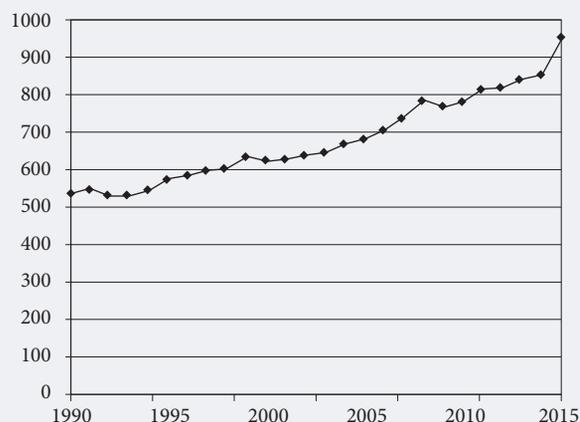
Наблюдаемый в современном мире бум портативной энергетики стал следствием массового использования различных девайсов, систем мониторинга и безопасности, ИКТ и мобильной связи. Портативные устройства могут быть как стационарными, так и носимыми.

Рис. 1. Потребление вторичных энергоносителей в России (млн ТДж/год)



Источник: ИНЭИ РАН.

Рис. 2. Соотношение потребления электрической (E) и тепловой (Q) энергии в России (кВтч/Гкал)



Источник: ИНЭИ РАН.

Соответствующим требованиям должны удовлетворять и источники их электропитания, которыми первоначально служили химические источники тока, позже вытесненные во многих сферах электрохимическими аккумуляторами.

Суммарная мировая емкость аккумуляторных батарей наиболее массовых портативных устройств — мобильных телефонов и ноутбуков — приблизительно в равных пропорциях распределена между первыми и вторыми: 50 и 40–50 ГВт·ч соответственно. На их зарядку расходуется около 10 и 15 ТВт·ч электроэнергии в год. Вытеснение мобильных телефонов предыдущих поколений смартфонами с большим экраном сопряжено с требованием повышенной емкости аккумуляторных батарей и электропотребления. В России емкость аккумуляторов активно используемых мобильных телефонов равна приблизительно 1 ГВт·ч, ноутбуков — 0.8 ГВт·ч, что в годовом выражении составляет около 0.2 и 0.25 ТВт·ч соответственно.

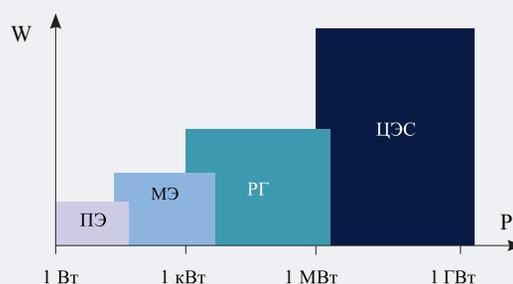
Дополнительный мощный импульс развитию портативной энергетики придаст внедрение новых систем управления с их многочисленными интеллектуальными датчиками и исполнительными механизмами, а также развитие сферы развлечений, включающей в себя разнообразные электронные девайсы.

Портативная энергетика занимает нижний сегмент в мощностном ряду электрогенерирующих установок, который варьирует от долей до нескольких сотен ватт (рис. 3). Ее технологическую основу составят химические источники тока нового поколения, электрохимические аккумуляторы, суперконденсаторы, низкотемпературные водородные топливные элементы, удерживающие водород в связанном состоянии (в интерметаллах, углеродных наноматериалах и др.) либо под высоким давлением в баллонах. В настоящее время активно ведутся разработки метанольных топливных элементов.

Мобильная (транспортная) энергетика

Массовое применение электромобилей, легкого индивидуального и промышленного электротранспорта, промышленных и бытовых автономных роботов позволяет говорить о формировании «мобильной» (транспортной) энергетики. Ее технологическую базу составят электрохимические аккумуляторы, низкотемпературные топливные элементы и суперконденсаторы, а энергетическую — электроэнергия (в «чистых» электромобилях) и водород (в гибридах). Водород может поступать извне либо производиться непосредственно «на борту» из углеводов, спиртов, эфиров или других водородсодержащих энергоносителей. Требуемая мощность электрогенерирующих установок мобильной энергетики находится в диапазоне от сотен ватт (инди-

Рис. 3. Диапазоны единичных мощностей (P) электрогенерирующих установок в различных сегментах энергетики и суммарные объемы их применения (W)



Условные обозначения: ПЭ — портативная энергетика, МЭ — мобильная энергетика, РГ — распределенная генерация, ЦЭС — централизованное электроснабжение.

Источник: ИНЭИ РАН.

видуальные электротранспортные средства, «легкие» роботы и т. д.) до сотен киловатт (электромобили, промышленный электротранспорт, «тяжелые» роботы).

Рост мобильной энергетики предполагает развитие соответствующей энергетической инфраструктуры: зарядных электрических и водородных заправочных станций, водородной логистики и т. д. Нужны будут новые типы электротехнических устройств, средства силовой электроники (преобразователи тока и напряжения, коммуникационная аппаратура и др.) и системы управления ими. Неопределенной остается будущая роль водорода в силу сложностей с обеспечением надлежащего уровня безопасности при его широком обращении. С этим связаны поиски альтернативных водородсодержащих энергоносителей для массового использования на транспорте.

Со временем по суммарной электрической мощности мобильная энергетика может превзойти «большую» электрогенерацию и начать играть значимую роль в ее развитии и функционировании. Сегодня общая мощность двигателей легковых автомобилей в России превышает 5 ТВт при электрической мощности всех электростанций страны около 0.27 ТВт. Таким образом, замещение электромобилями лишь 5–10% легковых автомобилей и подключение их в реверсном режиме к электрической сети позволят первым стать существенным фактором (в том числе экономическим) в управлении энергосистемой. Аккумуляторы электромобилей могут заряжаться более дешевой электроэнергией в ночное время или в периоды избыточной выработки возобновляемыми источниками энергии (ВИЭ), возвращая дорожающую в периоды пиковых нагрузок электроэнергию обратно в сеть. Тем самым электромобили могут эффективно совмещать функции потребителей-регуляторов и пиковых генераторов, заняв уникальную нишу в электроэнергетической системе. Сглаживание с их помощью кривой электрических нагрузок благоприятно скажется на работе тепловых и атомных станций.

Подключение к электроэнергетической системе большого парка электромобилей может потребовать кардинального изменения структуры электрогенерации и конфигурации сети, причем не только в технологическом, но и в пространственном отношении. Основная масса электромобилей будет сосредоточена в городах, где проблема управления энергорезжимами стоит наиболее остро.

Развитие мобильной энергетики чревато драматическими переменами на рынках нефти и моторных топлив. Последние будут постепенно вытесняться электроэнергией и водородом при крупномасштабном внедрении электротранспортных средств, что выразится в резком снижении спроса с разрушительными последствиями для мирового нефтяного рынка. Неактуальными могут оказаться многие активно продвигаемые в настоящее время в России проекты добычи и переработки тяжелой нефти, освоения углеводородных запасов арктического шельфа — чрезвычайно капиталоемкие и сомнительные с точки зрения экономической целесообразности.

Распределенная генерация

Под распределенной генерацией в общем случае понимаются электростанции всех типов мощностью 25 МВт и менее, работающие:

- автономно (децентрализованное электроснабжение);
- в составе электроэнергетических систем (ЭЭС) (вертикальное управление режимами);
- в «островном» режиме — автономно, но с подключением к ЭЭС в целях резервирования мощности, покрытия за счет сети пиковых нагрузок либо возвращения в нее излишков мощностей;
- в составе микрогридов (горизонтальное управление режимами).

Своеобразными элементами распределенной генерации выступают электроаккумуляторы — как «сетевые» (включенные в электросетевой комплекс и предназначенные для решения системных задач), так и «потребительские» (источники бесперебойного питания и резервирования, электромобили и др.). Иногда разделяют также автономную и распределенную генерацию.

В России в децентрализованной зоне сосредоточено около 18 ГВт электрических мощностей. Значительные объемы распределенной генерации находятся в зоне централизованного энергоснабжения: примерно 7 ГВт приходится на газотурбинные и 3 ГВт — на паротурбинные установки малой мощности [Filippov et al., 2015]. В так называемой серой зоне сконцентрированы плохо отражаемые в статистике дизельные и газопоршневые электростанции небольшой мощности, используемые преимущественно в качестве источников резервного и пикового питания. Только за период 2001–2007 гг. таких электрогенераторов в стране было установлено около 13.4 ГВт против 9.7 ГВт за тот же период в большой энергетике [Filippov, 2009].

Развитию распределенной генерации благоприятствуют следующие условия:

- интенсификация экономической деятельности на территориях с низкой плотностью населения и соответственно электрических нагрузок;
- инфраструктурные ограничения в зоне централизованного электроснабжения (отсутствие технических условий для подключения новых потребителей);
- необходимость повышения качества электроэнергии и надежности снабжения (бесперебойное питание, резервирование и т. д.);
- развитие возобновляемой энергетики на основе повсеместно доступных ресурсов солнечной и ветровой энергии, биомассы;
- снижение стоимости потребляемой электроэнергии за счет более эффективной генерации и исключения так называемой «сетевой» составляющей;
- хозяйственное освоение новых территорий без транспортной и энергетической инфраструктуры.

Указанным критериям отвечают огромные части территории России, характеризующиеся низкой плотностью населения и электропотребления, по сравнению с многими ведущими зарубежными странами (см. табл. 1). Особенно выделяются в этом отношении восточные ре-

гионы России (см. табл. 2). Около 2/3 территории страны не имеет централизованного электроснабжения, а 3/4 — централизованного трубопроводного газоснабжения. Создание на этой территории больших сетей электроснабжения оказывается экономически нецелесообразным и сопряжено с большими энергопотерями.

Развитию распределенной генерации будут благоприятствовать децентрализация промышленного производства и рост сельского хозяйства. В частности, наличие в России хорошей минерально-сырьевой базы и энергетических мощностей открывает широкие возможности для развития высокотехнологичного производства новых наукоемких материалов с высокой добавленной стоимостью. Страна имеет шанс выйти в мировые лидеры в данной области. Развитие малотоннажных производств не требует сооружения огромных комбинатов, а потому может стать привлекательным направлением использования технологий распределенной генерации. Последняя позволяет снизить стоимость потребляемой электроэнергии в централизованной зоне за счет более эффективного ее производства и исключения так называемой сетевой составляющей.

Новыми быстрорастущими секторами экономики, привлекательными для распределенной генерации, становятся мобильная связь и обработка больших данных. Развертывание сетей связи четвертого поколения и интернета создало условия для быстрого роста мобильного трафика, прежде всего за счет мультимедийного контента. Мобильный трафик утроился в России за 2015–2017 гг., вплотную приблизившись к показателям западноевропейских стран [T-Adviser, 2018b]. Не за горами ввод в эксплуатацию существенно более производительных, но и более энергоемких сетей 5G. Дальнейшее развитие мобильной связи будет стимулировать спрос на автономные источники электропитания небольшой мощности (менее 100 кВт) и ужесточение требований к их рабочему ресурсу и надежности.

Рост спроса на удаленные («облачные») хранилища данных, развлекательные, вычислительные и прочие ресурсы обусловил взлет числа центров обработки данных и объемов потребляемой ими электроэнергии. По оценкам компании EvoSwitch, в 2015 г. потребление электроэнергии дата-центрами достигло 416 ТВт·ч, что примерно равно 3% ее совокупного мирового потребления [Лебедев, 2018]. Вследствие стремительного увеличения объемов «тяжелых» данных (поток видео развлекательных сервисов, интернет вещей, системы безопасности и мониторинга промышленных объектов и т. д.) в ближайшее десятилетие прогнозируется трехкратный рост электропотребления дата-центрами, обремененными весьма жесткими требованиями к надежности и качеству поставок. Обязательным поэтому становится их оборудование резервными источниками электропитания (электрогенераторами и/или накопителями) и системами кондиционирования. Все эти задачи требуют развития силовой электроники и электротехнического оборудования, средств аккумулирования электроэнергии.

Серьезные глобальные ограничения на выбросы парниковых газов усугубляют неопределенность тех-

нологического будущего энергетики. Изменения могут коснуться состава используемых первичных энергоресурсов и ускорят переход от крупной энергетики на основе органических топлив к распределенной — на базе безуглеродных ВИЭ.

Централизованное энергоснабжение

Системы централизованного энергоснабжения составляют основу современной электроэнергетики и эксплуатируются практически всеми развитыми странами. В современной России в централизованной зоне сосредоточено около 93% электрогенерирующих мощностей (249 ГВт), 88% (236 ГВт) из которых входят в Единую электроэнергетическую систему.

Ожидаемая децентрализация спроса на энергию и интенсивное развитие распределенной генерации не приведут к отказу от централизованного энергоснабжения в обозримом будущем. Спрос на него будут предъявлять прежде всего крупная промышленность и мегаполисы — районы с высокой плотностью энергетических нагрузок, где централизованное энергоснабжение остается выгодным по экономическим и экологическим причинам.

По-видимому, значительная часть современной крупной промышленности (металлургические, машиностроительные, химические и нефтехимические, целлюлозно-бумажные предприятия и т. д.) еще долго будет сохранять востребованность и конкурентоспособность. Сегодня на этот сектор приходится около 20% потребляемой в России электроэнергии, однако данная категория потребителей крайне чувствительна к цене и при достаточных финансовых ресурсах зачастую обзаводится собственной (распределенной) электрогенерацией.

Значимый вклад в сохранение централизованного электроснабжения может внести продолжающийся глобальный процесс урбанизации. В России не ожидается заметного роста численности населения, чего не скажешь о тенденции к перемещению жителей небольших населенных пунктов в крупные города и мегаполисы. Плотность электропотребления в Москве и Санкт-Петербурге превышает 20 тыс. кВт·ч/км² в год (см. табл. 2). В промышленно развитых регионах, прилегающих к мегаполисам либо входящих в их состав (Московская область), она снижается до 1000 кВт·ч/км² в год, а в регионах с высокой плотностью населения — до 150–200 кВт·ч/км² в год. При этом в Дальневосточном федеральном округе, к примеру, отмеченная величина не достигает и 10 кВт·ч/км² в год. Ввод в мегаполисы значительных объемов «чистой» энергии вместе с электроэнергией и развитие электротранспорта позволяют кардинально решить экологическую проблему, не считая таких частных ее аспектов, как допустимый уровень электромагнитного загрязнения и электромагнитной совместимости используемых приборов и устройств, что требует отдельных усилий.

Распределенная генерация предлагает серьезные технологические альтернативы централизованному электроснабжению в крупных городах и мегаполисах, связанные с разработкой и массовым внедрением эко-

логически чистых топливных элементов на природном газе и электрохимических аккумуляторов [Бредихин и др., 2017]. Наибольшего эффекта можно достичь с помощью когенерационных установок, интегрированных в интеллектуальные микрогриды. Но прежде предстоит решить сложнейшую научно-технологическую задачу кратного снижения стоимости соответствующего оборудования и повышения его рабочего ресурса.

Потребность в централизованном электроснабжении может возрасти с появлением в энергобалансе крупных объемов высокоэффективных ресурсов ВИЭ, удаленных от центров потребления. Современные установки на ВИЭ обладают значительной единичной мощностью, а сетевые решения позволяют эффективно передавать электроэнергию на большие расстояния (в частности, с помощью линий электропередачи с переменным и постоянным током ультравысокого напряжения — в диапазоне 800–1000 кВ и более). Благодаря этому в местах концентрации ВИЭ с высоким потенциалом стали создаваться мощные — в десятки и сотни мегаватт — «ветряные фермы» и «солнечные поля», интегрируемые в электроэнергетические системы. В настоящее время основной прирост вводов электрогенерации на базе ВИЭ приходится на сетевые установки.

Возможное введение жестких, юридически обязывающих международных ограничений на выбросы парниковых газов потребует ускоренной декарбонизации мировой энергетики — и российской, как ее части. Достижение этой цели связано с переходом на безуглеродные природные источники энергии — ядерный синтез и ВИЭ. Термоядерные электростанции вряд ли получат коммерческое применение в ближайшие десятилетия, равно как и технологии электрогенерации на базе органических топлив с улавливанием CO₂, поскольку эффективных способов надежной и долгосрочной (в геологическом масштабе) утилизации колоссальных объемов углекислого газа пока не предложено. Ситуация осложняется плохой репутацией ядерной энергетики во многих странах мира, что вынуждает признать разговоры о ее «ренессансе» несколько преждевременными. Замещение органических топлив ВИЭ в сопоставимых масштабах в свою очередь связано с освоением пустынь и больших прибрежных акваторий, что требует формирования глобальной электроэнергетической системы и развития региональных централизованных энергосистем. Технологическим вызовом станут освоение напряжения в 1500 кВ и создание соответствующих подводных кабелей.

Развитие электросетевого комплекса сопряжено с ростом потерь в электрических сетях в процессе передачи и трансформации электроэнергии. В развитых странах с высокой плотностью электропотребления такие потери удалось снизить до 4–6% (см. табл. 1). В России они примерно вдвое выше (около 10%) и сильно варьируют по территории (см. табл. 2).

Функционирование и развитие электросетевого комплекса требуют значительных затрат, вклад которых в цену электроэнергии для конечного потребителя сегодня зачастую превышает 50–60%. Надежды на существенное снижение таких расходов за счет сете-

вой составляющей цены электроэнергии связаны лишь с некоторыми технологиями. Прорыва можно ожидать от массового применения недорогих «теплых» сверхпроводников (работающих при комнатной температуре), хотя разработка необходимых материалов продвигается крайне медленно.

Заключение

Все технологические революции оказывали определяющее влияние на развитие энергетики, причем как непосредственно — путем создания новых энергетических технологий, так и косвенно — через формирование спроса на энергию, в том числе требований к его объемам, структуре и качеству энергоносителей. Не станет исключением и новая технологическая революция, которая вместе с формирующимися на ее основе постиндустриальными экономикой и обществом предъявляет новые требования к энергетике. Речь прежде всего идет о существенном увеличении спроса на электроэнергию и ужесточении требований к ее качеству и надежности поставок.

Следует ожидать дальнейшего сегментирования технологической структуры энергетики для максимального эффективного удовлетворения будущего спроса на энергию. Особенно ярко эта тенденция будет проявляться в электроэнергетике, в структуре которой достаточно четко выделяются портативная и мобильная энергетика, распределенная генерация и централизованное энергоснабжение. Рост объемов генерации и потребления постоянного тока в первых трех сегментах и создание мощных магистральных сетей постоянного тока в последнем могут возродить интерес к системам электроснабжения на постоянном токе.

Востребованность централизованного энергоснабжения может быть связана с концентрированными энергетическими нагрузками со стороны крупной промышленности, а также с процессами урбанизации и формирования мегаполисов. Запрос на дальнейшее развитие централизованных систем энергоснабжения может быть обусловлен требованиями по декарбонизации энергетики. В этом случае необходимыми станут освоение отдаленных ресурсов ВИЭ в пустынях и прибрежных акваториях дальних морей и, возможно, развитие ядерной энергетики.

Децентрализация, экономическая деятельность в регионах с низкой плотностью энергопотребления, хозяйственное освоение новых территорий и повсеместное использование доступных ресурсов ВИЭ будут благоприятствовать развитию распределенной генерации. Ожидаемое массовое распространение электромобилей, легкого индивидуального электротранспорта и автономных роботов различного функционального назначения может привести к взрывному росту мобильной энергетики. Интеграция миллионов электромобилей в электроэнергетические системы окажет сильное воздействие на развитие «большой» энергетики, поскольку потребует существенной корректировки ее технологической и пространственной структуры. Рост масштабов применения разнообразных девайсов и дру-

гих маломощных автономных устройств подтолкнет к развитию портативную энергетику, а вслед за этим — производство электрохимических аккумуляторов, в свою очередь чреватое дефицитом некоторых материалов и скачком цен на них. Цифровизация энергетики обострит проблему обеспечения кибербезопасности энергетических объектов и систем.

Особенности России, обусловленные структурой спроса на энергию, суровым климатом и огромной территорией, будут предъявлять дополнительные требования к технологическому развитию энергетики страны. В частности, востребованными останутся системы централизованного энергоснабжения, однако спрос на технологии распределенной генерации, в том числе на основе ВИЭ, также будет расти. К числу важнейших от-

носится задача развития когенерации с использованием электрохимических генераторов, технологий смарт-гридов и т. п.

Сложившаяся структура ТЭК России оказывается крайне уязвимой к масштабам электрификации транспорта и декарбонизации мировой энергетики. Широкое применение в мире электромобилей и ВИЭ и вызванное этим снижение спроса на нефть могут оказать разрушительное действие на мировой рынок углеводородов, что негативно отразится на энергетике и экономике страны в целом.

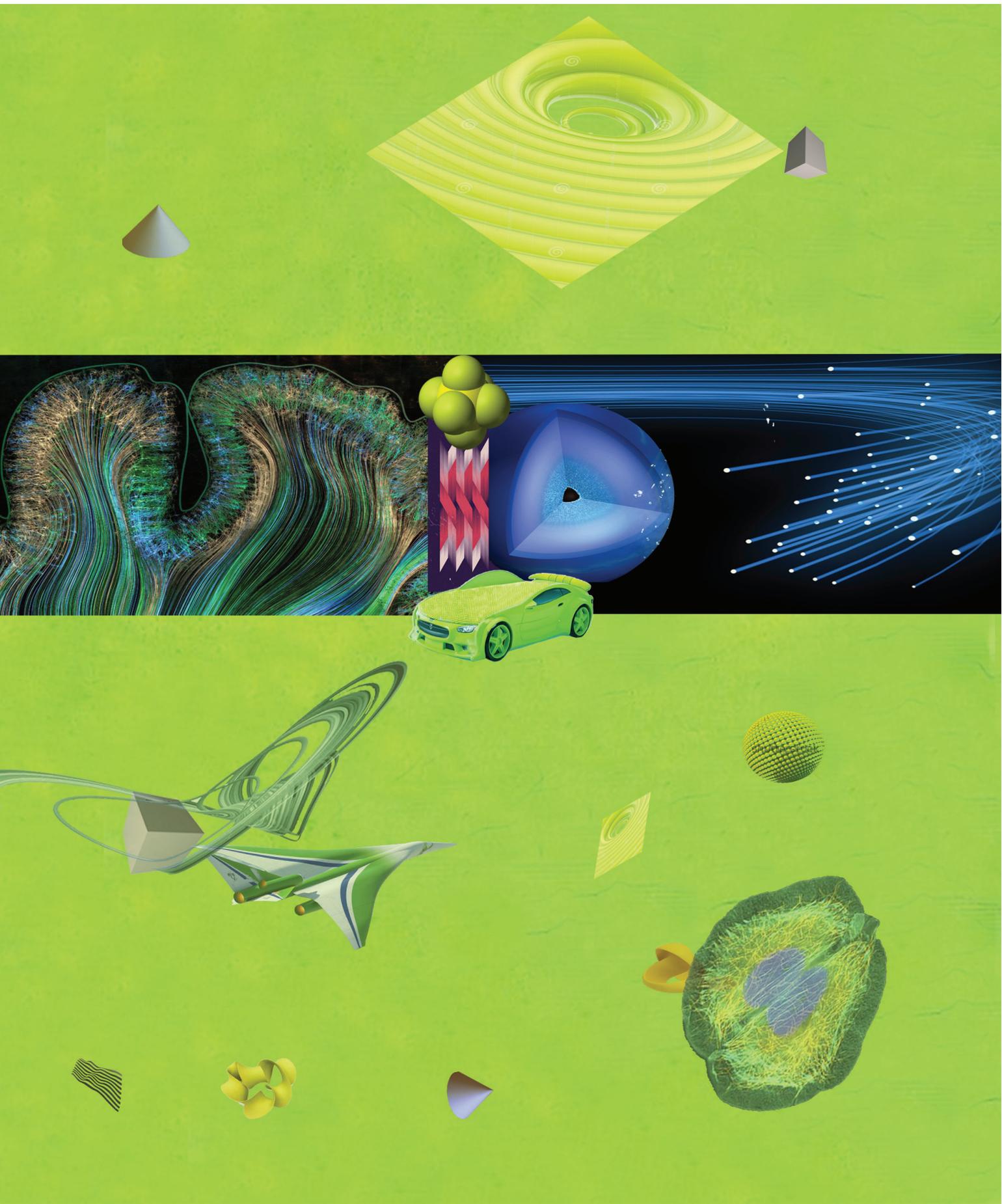
Статья подготовлена по результатам проекта, выполненного при финансовой поддержке Минобрнауки России, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60117X0014.

Библиография

- Балабанов В.И., Железова С.В., Березовский Е.В., Беленков А.И., Егоров В.В. (2013) Навигационные технологии в сельском хозяйстве. Координатное земледелие. М.: РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева.
- Бредихин С.И., Голодницкий А.Э., Дрожжин О.А., Истомин С.Я., Ковалевский В.П., Филиппов С.П. (2017) Стационарные энергетические установки с топливными элементами: материалы, технологии, рынки. М.: НТФ «Энергопрогресс». ISBN 978-5-905918-06-3.
- Глазьев С.Ю. (1993) Теория долгосрочного технико-экономического развития. М.: ВладДар.
- Горбань А.Н., Дунин-Барковский В.Л., Кирдин А.Н., Миркес Е.М., Новоходько А.Ю., Россиев Д.А., Терехов С.А., Сенашова М.Ю., Царегородцев В.Г. (1998) Нейроинформатика. Новосибирск: Наука — Сибирское предприятие РАН.
- Зворыкин А.А., Осьмова Н.Н., Чернышев В.И., Шухардин С.В. (1962) История техники. М.: Издательство социально-экономической литературы.
- Каганович Б.М., Филиппов С.П., Анциферов Е.Г. (1989) Эффективность энергетических технологий: термодинамика, экономика, прогнозы. Новосибирск: Наука.
- Кондратьев Н.Д. (1989) Большие циклы экономической конъюнктуры // Проблемы экономической динамики / Под ред. Л.И. Абалкина. М.: Экономика. С. 172–226.
- Лебедев П. (2018) Приживется ли в России «зеленый» ЦОД? Режим доступа: http://www.cnews.ru/reviews/infrastructure2017/articles/prizhivetsya_li_v_rossii_zelenyj_tsod; дата обращения 29.09.2018.
- Филиппов С.П., Дильман М.Д. (2018) Системные исследования приоритетов технологического развития энергетики: методологические аспекты // Системные исследования в энергетике: методология и результаты / Под ред. А.А. Макарова, Н.И. Воропая. М.: МЭИ. С. 63–86.
- Якушев В.В. (2016) Точное земледелие: теория и практика. СПб.: ФГБНУ АФИ. ISBN 978-5-905200-31-1.
- Ahonen T. (2016) TomiAhonen Phone Book 2016. Statistical Review of Handset Industry. Режим доступа: <http://www.tomiahonen.com/ebook/phonebook.html>, дата обращения 08.10.2018.
- Baudrillard J. (1998) The Consumer Society. Myths & Structures. London, Thousand Oaks, New York, Delhi: SAGE Publications. ISBN 0-7619-5691-3.
- Bell D. (1973) The coming of post-industrial society: A venture of social forecasting. New York: Basic Books. ISBN 0-465-01281-7.
- Elk K. (2016) Embedded Software Development for the Internet of Things: The Basics, The Technologies and Best Practices. Seattle: Create Space Independent Publishing Platform. ISBN 978-1534602533.
- Filippov S.P. (2009) Small-Capacity Power Engineering in Russia // Thermal Engineering. Vol. 56. № 8. P. 665–672.
- Filippov S.P., Dilman M.D., Ionov M.S. (2015) Demand of the Power Industry of Russia for Gas Turbines: The Current State and Prospects // Thermal Engineering. Vol. 64. № 11. P. 829–840. DOI: 10.1134/S0040601517110052.
- Freitas R.A., Merkle R.C. (2004) Kinematic Self-Replicating Machines. Georgetown, TX: Landes Bioscience. ISBN: 978-1570596902.
- Heath S. (2003) Embedded systems design. EDN series for design engineers (2nd ed.). Oxford: Newnes. ISBN 978-0-7506-5546-0.
- Hermann M., Tobias P., Boris O. (2015) Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review (Working Paper no 01). Dortmund: Technische Universität Dortmund.
- Khaitan S.K., McCally J.D. (2014) Design Techniques and Applications of Cyber Physical Systems: A Survey // IEEE Systems Journal. Vol. 9. № 2. P. 1–16. Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/275381502_Design_Techniques_and_Applications_of_Cyberphysical_Systems_A_Survey, дата обращения 17.07.2017.
- Koh W.T.H., Leung H.-M. (2003) Education, Technological Progress and Economic Growth. Singapore: Singapore Management University.
- Kurzweil R. (2005) The Singularity Is Near. New York: Viking Adult.
- Ladd D., Jelezko F., Laflamme R., Nakamura Y., Monroe C., O'Brien J.L. (2010) Quantum Computing // Nature. Vol. 464. № 7285. P. 45–53.
- Lee E. (2008) Cyber Physical Systems: Design Challenges. Technical Report No. UCB/EECS-2008-8. Berkeley: University of California. Режим доступа: <https://www2.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2008/EECS-2008-8.pdf>, дата обращения 17.07.2017.

- McBratney A., Brett W., Tihomir A., Johan B. (2005) Future Directions of Precision Agriculture // Precision Agriculture. № 6. P. 7–23.
- OECD, IEA (2017) The Future of Trucks: Implications for Energy and the Environment. Paris: OECD, IEA.
- Richardson S.M., Mitchell L.A., Stracquadiano G., Yang K., Dymond J.S., DiCarlo J.E., Lee D., Huang C.L.V., Chandrasegaran S., Cai Y., Boeke J.D., Bader J.S. (2017) Design of a synthetic yeast genome // Science. Vol. 355. № 6329. P. 1040–1044. Режим доступа: <http://science.sciencemag.org/content/355/6329/1040>, дата обращения 10.03.2017.
- Sadowy B. (2018) Airbus Partners with Amsilk on Synthetic Spider Silk Technology. Режим доступа: <http://compositesmanufacturingmagazine.com/2018/09/airbus-partners-with-amsilk-on-synthetic-spider-silk-technology/>, дата обращения 27.09.2018.
- Šmihula D. (2011) Long waves of technological innovations // Studia Politica Slovaca. № 2. P. 50–69.
- T-Adviser (2018a) Ноутбуки: мировой рынок — 2017. Режим доступа: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Ноутбуки_\(мировой_рынок\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Ноутбуки_(мировой_рынок)), дата обращения 19.10.2018.
- T-Adviser (2018b) Смартфоны: рынок России — 2018. Режим доступа: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Смартфоны_\(рынок_России\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Смартфоны_(рынок_России)), дата обращения 19.10.2018.
- Taleb N.N. (2007) The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable. New York: Random House. ISBN 978-1-4000-6351-2.
- Toffler A. (1970) Future Shock. New York: Bantam Books. ISBN 0-553-27737-5.
- Toffler A., Toffler H. (2006) Revolutionary Wealth. New York: Knopf Doubleday Publishing. ISBN 0-375-40174-1.
- Toyota (2017) Environmental Report 2017: Toward the Toyota Environmental Challenge 2050. Toyota, Aichi: Toyota Motor Corporation. Режим доступа: http://www.toyota-global.com/sustainability/report/archive/er17/pdf/er17_full_en.pdf, дата обращения 06.11.2017.
- van Gelderen J. (1913) Springvloed Beschouwingen over industrielle Ontwikkelingen prijsbeweging // De Nieuwe Tijd. Vol. 184. № 4–6. P. 253–277; 369–384; 445–464.
- Vinge V. (1993) The Coming Technological Singularity. Paper presented at the VISION-21 Symposium sponsored by NASA Lewis Research Center and the Ohio Aerospace Institute, March 30-31, 1993. Режим доступа: <http://www.accelerating.org/articles/comingtechsingularity.html>, дата обращения 05.03.2017.
- Zhang N., Wang M., Wang N. (2002) Precision Agriculture: A Worldwide Overview // Computers and Electronics in Agriculture. Vol. 36. № 2–3. P. 113–132.

ИННОВАЦИИ



Энергопотребление российского автомобильного сектора: роль технологических инноваций в межтопливной конкуренции

Дмитрий Грушевенко

Научный сотрудник^а; ведущий эксперт^б, grushevenkod@gmail.com

Екатерина Грушевенко

Научный сотрудник^а; эксперт^с, e.grushevenko@gmail.com

Вячеслав Кулагин

Начальник отдела^а; директор^б, vakulagin@hse.ru

^а Институт энергетических исследований Российской академии наук (ИНЭИ РАН),
117186, Москва, Нагорная ул., 31, каб. 2

^б Центр энергетических исследований Института проблем ценообразования и регулирования естественных монополий Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (ИПЦиРЕМ НИУ ВШЭ),
117312, Москва, ул. Вавилова, 7

^с Энергетический центр Московской школы управления «Сколково», 143025, Московская область,
Одинцовский район, дер. Сколково, ул. Новая, д. 100

Аннотация

Распространение альтернативных источников энергии в мировой индустрии дорожных перевозок повышает устойчивость внутреннего рынка, улучшает экологическую ситуацию в крупных городах, расширяет экспортный потенциал энергетического сектора. Однако межтопливная конкуренция определяется не только уровнем технологического развития, но и стоимостью топлив, особенностями регулирования внутренних рынков и потребительскими предпочтениями. Как следствие, спрос на одни и те же технологии сильно варьирует по странам и регионам.

В статье оцениваются текущее состояние межтопливной конкуренции в автомобильной промышленности России, ключевые стимулы к диверсификации ее топливной корзины и перспективы распространения альтернативной энергетики. Успех в реализации предложенных сценариев во многом будет зависеть от эффективности государственной политики, направленной на поддержку развития инфраструктуры и налоговых механизмов, побуждающих владельцев транспортных средств использовать альтернативные виды топлива.

Ключевые слова: межтопливная конкуренция; автомобильный транспорт; технологические инновации; альтернативные топлива; энергопотребление; сценарное планирование

Цитирование: Grushevenko D., Grushevenko E., Kulagin V. (2018) Energy Consumption of the Russian Road Transportation Sector: Prospects for Inter-Fuel Competition in Terms of Technological Innovation. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no 4, pp. 35–44. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.35.44

Диверсификация топливной корзины сектора дорожных перевозок лежит в русле глобальных трендов. За период с 1990 по 2013 г. мировая доля нефтепродуктов, исторически преваляровавших в секторе, сократилась с 99 до 95% [IEA, 2014], несмотря на значительный рост совокупного объема потребления. Происходит это на фоне увеличения спроса на электроэнергию, природный газ, биологические и синтетические топлива, производимые из газа и угля, которые применяются в качестве моторных. С каждым годом интерес к новым видам энергии в секторе возрастает как у потребителей, так и у производителей автотранспорта.

Подобная диверсификация наблюдается не только в развитых странах, которые исторически входят в число крупных импортеров нефтепродуктов и сырья и в чьих интересах снизить зависимость от внешних поставок, но и среди самих производителей. Так, в 2013 г. газомоторное топливо покрывало 14% общего объема спроса на энергию в сегменте дорожных перевозок в Иране, а биотоплива и природный газ — порядка 19% в Бразилии [IEA, 2014]. Если для стран-экспортеров диверсификация топливной корзины служит инструментом высвобождения дополнительных объемов нефтяных топлив, то для всех остальных это прежде всего инструмент экологической политики, поскольку любые альтернативы позволяют существенно снизить транспортные выборы (без учета процесса производства энергоносителя).

Россия пока отстает от большинства стран в вопросах диверсификации энергетической корзины сектора дорожных перевозок, на 99% заполненной нефтепродуктами и лишь в незначительной степени (1.4 млн тонн нефтяного эквивалента, т н. э.) — газомоторным топливом и электроэнергией. При этом на транспортный сектор в России приходится до 90% внутреннего спроса на нефтепродукты [IEA 2014], однако эффективное прогнозирование структуры его энергетической корзины практически не ведется. Отдельные работы [Бобылёв и др., 2006; Брагинский, 2012; Миловидов и др., 2006] содержат те или иные методологические подходы, но не предлагают подробного и комплексного исследования перспектив спроса на энергоносители в сегменте дорожных перевозок.

В настоящей статье изложены результаты применения уникального инструментария прогнозирования спроса на моторные топлива, теоретическая и методологическая база которого была подробно описана ранее в работах [Mitrova et al., 2015; Grushevenko et al., 2015]. С помощью разработанного нами инструментария экономико-математического моделирования мы попытались решить следующие задачи: выявить ключевые стимулы к диверсификации топливной корзины в отечественном секторе дорожных перевозок, определить текущее состояние межтопливной конкуренции и потенциал развития альтернативной энергетики в нем, дать прогноз динамики спроса на энергию на транспорте в России.

Структура спроса на энергию в российском транспортном секторе: стимулы для диверсификации

По состоянию на 2015 г. транспортный сектор России ежегодно потреблял порядка 65 млн т н. э. энергии, из них 99% приходится на нефтяные топлива (сжиженные углеводородные газы, бензин, дизельное топливо), 60% которых в свою очередь составляют автомобильные бензины [IEA, 2014]. Оставшийся процент суммарного спроса на энергию в сегменте дорожного транспорта практически полностью поглощен сжатым (компримированным) природным газом. На первый взгляд, подобная структура выглядит естественной для одного из крупнейших в мире производителей и экспортеров нефти, особенно с учетом практически вдвое более низких, чем в Европе, розничных цен на нефтепродукты. Однако несколько причин позволяют поставить оптимальность данной структуры под сомнение.

Первая причина связана с регулярными перебоями в поставках на внутренний рынок превалярующих в энергетической корзине транспортного сектора качественных высокооктановых бензинов. Наиболее заметные кризисы такого рода наблюдались в 2011 г. в момент постановки на внеплановый ремонт Омского нефтеперерабатывающего завода (НПЗ) и Ангарской нефтехимической компании, в 2012 г. — после аварии на Московском НПЗ, а также в 2014 г. — после аварии на Ачинском НПЗ, совпавшей с задержкой ввода в эксплуатацию прошедшего ремонт Ярославского НПЗ. Механизм воспроизводства указанных кризисов довольно прост и обусловлен потенциальной нехваткой мощностей по облагораживанию бензина. Так, по состоянию на 2016 г. предел технических возможностей российских НПЗ по производству высокооктановых бензинов стандарта Евро-5¹ при условии полной загрузки вторичных процессов (т. е. без простоя, ремонта и технического обслуживания установок в течение года) составляет порядка 40 млн т в год, тогда как спрос на них достиг отметки в 39 млн т (подробнее о производственных возможностях российских НПЗ, их текущем состоянии и перспективах развития см.: [Kapustin, Grushevenko, 2016; Kapustin, Осипова, 2015]).

В случае дальнейшего роста спроса на бензины (а он продолжает расти, даже несмотря на сложную экономическую ситуацию в стране) для расширения и реконструкции мощностей, необходимых для его производства и функционирования перерабатывающего комплекса, потребуются значительные инвестиции. Речь может идти о 20 млрд долл. [Kapustin, 2011] в течение ближайших 5–10 лет, что сопоставимо с инвестициями в развитие газозаправочной инфраструктуры (переоборудование автозаправочных станций под газомоторные топлива), оцениваемыми в 12.6–31.5 млрд долл. [Промэкспертиза, 2016]. Поскольку российские перерабатывающие заводы сильно зависят от импортного оборудования и расходных материалов (например, от 50 до 100% катализаторов, используемых

¹ Применение топлив более низких экологических классов запрещено в России с июля 2016 г.

в производстве товарного бензина, ввозятся из-за рубежа [Кулагин и др., 2015]), снижение курса рубля, усугубленное падением экспортной выручки от продажи нефти, заметно отразилось как на их расходах, так и на энергобезопасности страны. Собственный выпуск тех же катализаторов потребует значительных затрат, но и они не позволят полностью отказаться от импорта даже к 2020 г. [Kapustin, Grushevenko, 2016]. Возникает вопрос о целесообразности инвестиций в переработку нефти преимущественно для удовлетворения растущего внутреннего спроса на бензин, причем исключительно силами нефтяных компаний. Более предпочтительной может оказаться стратегия распределения рисков между множеством игроков рынка и инвестиций в снижение спроса на бензин, в том числе за счет диверсификации топливной корзины.

Вторая причина, заставляющая усомниться в оптимальности структуры топливной корзины российского сектора дорожных перевозок, связана с экологическими проблемами некоторых российских городов-миллионников, обусловленными в том числе превалированием в секторе таких «грязных» энергоносителей, как нефтепродукты. Так, выбросы CO₂ от газовых легковых автомобилей ниже, чем от аналогичных бензиновых, в среднем на 20–25%, а крайне токсичных оксидов азота — на 90% по сравнению с дизельным автомобилем [Curran et al., 2014]. Применение электрокаров также позволяет существенно снизить объемы выбросов парниковых газов без учета эмиссии в процессе производства электроэнергии.

В-третьих, нефть и нефтепродукты — основной источник экспортных валютных поступлений Российской Федерации. По данным Росстата, их доля в стоимостной структуре экспорта даже в кризисном 2015 г. превышала 46%². Расширение использования альтернативных топлив в секторе дорожного транспорта позволит увеличить экспорт нефти и нефтепродуктов и укрепить экспортный потенциал страны по примеру Ирана. Вместе с тем в европейской части России наблюдается огромный переизбыток действующих мощностей по добыче газа, и уровень производства сдерживается лишь отсутствием рынков сбыта. Россия располагает потенциалом для существенного наращивания производства газа, который может быть использован для выработки электроэнергии или непосредственно на транспорте. Усилия в этом направлении позволят увеличить экспорт нефти и нефтепродуктов как более дорогих товаров, что особенно актуально в условиях сужения ниши внутреннего потребления и экспорта газа, тогда как возможности прироста его добычи значительно выше нефтяных [Mitrova, 2016].

Изложенные причины актуализируют задачу разработки механизмов государственной поддержки замещения нефтепродуктов на дорожном транспорте альтернативными источниками энергии. Объемы такого перехода будут во многом определяться потребительскими предпочтениями, а именно привлекательностью

с точки зрения затрат, удобством использования и экологическими характеристиками. Оценка дальнейших перспектив формирования корзины энергоносителей в сегменте дорожных перевозок требует анализа параметров межтопливной конкуренции с учетом мнений потребителей и ожидаемых мер государственного регулирования.

Межтопливная конкуренция в секторе дорожного транспорта России

В современном мире межтопливная конкуренция в транспортном секторе переживает острую фазу. Традиционным нефтепродуктам (автомобильному бензину, дизельному топливу и, в меньшей степени, сжиженным углеводородным газам) противостоят альтернативные энергоносители, которые можно разделить на прямые и непрямые субституты (детали классификации раскрыты в работе [Митрова и др., 2015]):

1. Прямые субституты, применение которых не требует принципиальных конструктивных изменений автомобильных двигателей:

- биотоплива, производимые из растительного сырья, — биоэтанол и биодизель [Mussatto, 2016];
- жидкие топлива, производимые из угля и газа по технологиям Coal-to-Liquids (CTL) и Gas-to-Liquids (GTL) [Höök, Aleklett, 2010; Glebova, 2013].

2. Непрямые субституты, применение которых требуют принципиального конструктивного изменения транспортных средств и потребительской инфраструктуры:

- электроэнергия, используемая в электродвигателях или гибридных автомобилях;
- топливо для ячеек, преобразующих энергию водорода в электрическую [Sorensen, 2012];
- газомоторное топливо, производимое из природного газа, или биометана.

Далеко не все эти альтернативы широко востребованы в мире. Так, высокая себестоимость делает неконкурентоспособными по цене в глобальном масштабе синтетические топлива, производимые по технологиям GTL и CTL. По оценкам авторов работы [Höök, Aleklett, 2010], стоимость производства одного барреля таких топлив составляет 48–75 долл. без учета закупки сырья и налогового бремени производителей. Аналогичные издержки производства барреля нефтепродуктов в мире колеблются в диапазоне 5–15 долл. В дальнейшем подобное соотношение затрат на производство нефтяных и не нефтяных топлив, скорее всего, сохранится.

Масштабное распространение топливных элементов на транспорте пока остается вопросом будущего. Так, цена поступившего на рынок водородного автомобиля Toyota Mirai превышает 55 тыс. долл., что сопоставимо со стоимостью автомобилей класса «люкс». При этом каждая проданная единица, по оценкам экспертов, приносит компании Toyota не прибыль, а убытки в размере до 100 тыс. долл. [Voelcker, 2014]. Столь высокая цена ав-

² Рассчитано авторами на основе данных Центрального банка Российской Федерации. Режим доступа: <http://www.cbr.ru/statistics/?PrtlId=svs>, дата обращения 11.12.2017.

томобили и отсутствие заправочной инфраструктуры лишают актуальности вопрос прогнозирования спроса на водород в России.

Ключевым ограничением для распространения биотоплив служит также их высокая стоимость. Согласно российскому законодательству³ биотоплива классифицируются не как энергоноситель, а как этиловый спирт и облагаются акцизом в размере 102 руб./л. (1.6 долл.). При розничной стоимости топливных нефтепродуктов в 40 руб./л. (0.6 долл.) (по состоянию на 2016 г.), подобная политика регулятора делает биотоплива неконкурентоспособными в ценовом отношении.

Неустойчивыми остаются и позиции электроэнергии как альтернативного топлива в секторе дорожных перевозок в России. В отличие от европейского рынка, где, как показывают наши расчеты, электроэнергия способна не только потеснить традиционные нефтяные моторные топлива, но и сдержать рост спроса на компримированный природный газ (КПГ) [Grushevenko et al., 2016], в России практически 100% ее потребления в секторе приходится на крупнотоннажный общественный транспорт: троллейбусы и трамваи. С начала 2000-х гг. объем пассажироперевозок этими видами транспорта, по данным профильного министерства, снижается [АЦ, 2015]. Многие крупные города постепенно отказываются от общественного электротранспорта. Так, с 2005 по 2014 г. троллейбусный парк Санкт-Петербурга сократился на 12%, трамвайный — на 30%. В последние годы в Москве приняты решения по сокращению троллейбусного парка в пользу дизельных автобусов, что расширяет потребление нефтепродуктов в данном сегменте, однако стоит отметить, что параллельно появляются существенные планы по закупке электробусов. Сохранение этой тенденции повлечет за собой дальнейшее снижение спроса на электроэнергию в сегменте крупнотоннажного дорожного транспорта в среднесрочной перспективе, но есть основания для его расширения впоследствии на базе электробусной техники.

Потребление электроэнергии со стороны растущего отечественного рынка легковых электрокаров сдерживается несколькими факторами. Так, до 90% продаж новых легковых автомобилей в России приходится на бюджетный сегмент (до 13 тыс. долл.) [Автостат, 2016], тогда как представленные на рынке электрокары (всего шесть моделей) и даже гибридные автомобили (всего семь моделей) относятся к среднему и премиальному ценовым сегментам (от 16 тыс. долл.⁴) и остаются попросту недоступными для широкого потребителя. Кроме того, крайне низким остается уровень развития сервисной инфраструктуры. Обслуживанием электрокаров и гибридов занимаются только официальные дилеры, поскольку другие сервисы попросту не имеют оборудования и квалифицированных кадров для ре-

монта подобных автомобилей. Практически полностью отсутствует в России и общественная заправочная инфраструктура для электромобилей, что делает их гораздо менее привлекательными в глазах потребителей по сравнению с традиционными автомобилями, даже несмотря на более низкую стоимость топлива (в среднем в 3–6 раз дешевле нефтепродуктов). Без инфраструктуры (общественных электрозаправок в России лишь около 60) единственной возможностью для потребителя остается заправка в домашних условиях, крайне затруднительная в городах с многоэтажной застройкой без прилегающих к домам паркингов с достаточно мощными энергоустановками. И хотя «Россет» анонсировала строительство 1 тыс. электрозаправочных станций к 2018 г. [Воронов и др., 2016], даже эти планы выглядят слишком оптимистичными: проект предполагает увеличение числа электрозаправочных станций в 16 раз в течение двух лет.

Меры государственного стимулирования покупки электромобилей, такие как обнуление импортных пошлин на территории ЕАЭС до сентября 2017 г. [Интерфакс, 2016], бесплатная парковка и резидентский статус в платных зонах Москвы, бесплатная зарядка до конца 2016 г. [Москва 24, 2016] или плановое оснащение автозаправочных станций (АЗС) электрорядными станциями с 1 ноября 2016 г.⁵, представляются недостаточными. Ключевым же ограничением в использовании электромобилей на нынешнем этапе служит их стоимость — в среднем по миру ближайший электрический аналог минимум на 25–50% дороже дизельного или бензинового автомобиля, причем такое соотношение верно и для легкового, и для грузового сегментов, тогда как в среднетоннажном сегменте предложение фактически отсутствует. По нашим расчетам, среднегодовая стоимость владения электромобилем в 2016 г. вдвое превышала таковую для двигателя внутреннего сгорания. Ситуацию в России усугубляет крайне скудный ассортимент электромобилей: рынок предлагает либо сравнительно непопулярный сверхмалый класс, либо недоступный для широкого потребителя «люкс».

Автомобили на газомоторном топливе выглядят наиболее привлекательной альтернативой во всех сегментах по совокупности экологических, эксплуатационных и потребительских свойств. Помимо значительной денежной экономии (по нашим подсчетам — до 2.5 раз на 100 км пробега в сравнении с нефтепродуктами), при умеренной разнице в цене с автомобилями сходных характеристик в различных сегментах использование природного газа благотворно сказывается на моторесурсе двигателя внутреннего сгорания и значительно повышает межремонтный пробег. По сравнению с бензином и сжиженными углеводородными газами природный газ обеспечивает более низкую взрыво- и

³ Федеральный закон № 171-ФЗ от 22.11.1995 г. «О государственном регулировании производства и оборота этилового спирта, алкогольной и спиртосодержащей продукции и об ограничении потребления (распития) алкогольной продукции». Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8368/, дата обращения 24.10.2018.

⁴ Цена Mitsubishi i-MiEV.

⁵ Постановление Правительства РФ № 890 от 27.08.2015 г. «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации по вопросам предоставления возможности воспользоваться на автозаправочных станциях зарядными колонками (станциями) для транспортных средств с электродвигателями». Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_185210/, дата обращения 24.10.2018.

Табл. 1. Нормы использования газобаллонного транспорта в городах

Численность населения (тыс. чел.)	Доля единиц газобаллонной техники (%)
Более 1000	< 50
Более 300	< 30
Более 100	< 10

Источник: составлено авторами по материалам Распоряжения Правительства РФ № 767-р от 13.05.2013 г. «О регулировании отношений в сфере использования газового моторного топлива». Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_146288/, дата обращения 24.10.2018.

пожароопасность. Температура самовоспламенения и нижний предел взрываемости у него значительно выше, чем, например, у бензина: в случае утечки газ просто улечучивается, тогда как бензин растекается под автомобилем, образуя в приземном слое взрывоопасную смесь с воздухом. Установка газобаллонного оборудования при этом не исключает использования традиционных топлив. Даже серийные модели газовых автомобилей оснащаются топливным баком и могут работать попеременно на газе и бензине/дизеле, что заметно повышает удобство их эксплуатации и запас хода. Тем не менее в России по состоянию на 2015 г. газомоторное топливо занимает лишь около 0,5% в энергопотреблении сегмента дорожных перевозок, а уровень использования не превышает 0,4 млн т н. э. [IEA, 2014].

Одной из ключевых причин низких темпов газификации отечественного автотранспортного сектора остается инфраструктурная недостаточность. На территории России функционируют около 280 автомобильных газонаполнительных компрессорных станций [НГА, 2016] при 24 тыс. традиционных АЗС. Большая часть газовых станций, построенных в конце 1980-х — начале 1990-х гг., требуют модернизации. Проектная производительность заправочных мощностей составляет более 2 млрд м³ КПП, однако средняя загрузка колеблется на уровне 20% в силу скромного парка газобаллонного транспорта — 110 тыс. ед., или около 2% всего автопарка. Складывается классический инфраструктурный парадокс: «потребители не покупают автомобили из-за отсутствия заправочной сети, а бизнес не вкладывается в заправки из-за отсутствия потребительского спроса» [Митрова, Галкина, 2013].

Низкое предложение непосредственно влияет на медленный рост парка газобаллонного транспорта. По данным за 2016 г., он фактически не представлен в сегменте легковых и легких коммерческих автомобилей и крайне ограниченно представлен среди грузовиков и автобусов. Для перехода на природный газ большинство потребителей вынуждены прибегать к относительно дорогостоящему переоборудованию, что в большинстве случаев влечет за собой отказ производителей от гарантийного обслуживания автомобиля. Неопределенными

остаются и перспективы ценообразования на КПП. Изменения в российском законодательстве⁶ отменили привязку цен метана к бензину А-76 (в дальнейшем — к А-80 и АИ-92). В отсутствие официального верхнего предела стоимости газомоторного топлива пользователи газобаллонного транспорта лишились гарантий рентабельности его использования в будущем, а среди производителей было посеяно сомнение в оправданности инвестиций в компрессорные станции.

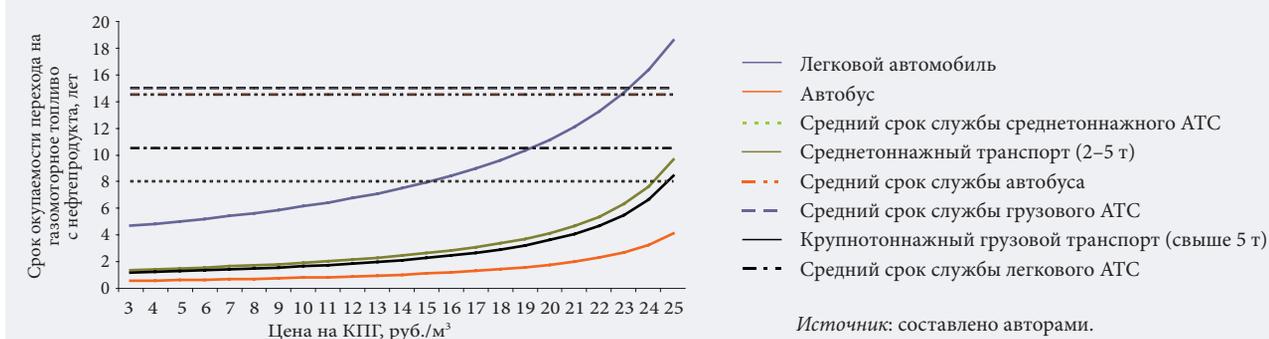
Проблеме развития отечественной газомоторной инфраструктуры и преодоления негативной конъюнктуры уделяют большое внимание на государственном уровне. Энергетическая стратегия России на период до 2030 г. [Минэнерго, 2009] и проект стратегии до 2035 г. [АЦ, 2014] одним из перспективных направлений развития энергетического комплекса называют наращивание потребления газа на транспорте, в частности доведение доли газобаллонных автомобилей до 7% от общего автопарка к 2035 г.

Для стимулирования рынка КПП Правительством РФ установлены нормы использования этого вида топлива в городах (табл. 1). В 2012 г. была создана специализированная компания «Газпром газомоторное топливо», миссия которой состоит в комплексном развитии отечественного рынка газомоторного топлива. Для достижения целевых показателей «Газпром» при финансовой поддержке региональных властей возводит объекты газомоторной инфраструктуры и переоборудует автопарки. В связи с этим комплектуется парк газобаллонной техники для государственных и муниципальных нужд, формируется производственно-техническая база эксплуатационных предприятий и осуществляется подготовка профильного инженерно-технического персонала. К сентябрю 2016 г. соответствующие соглашения были заключены с 38 регионами, десять из которых признаны приоритетными: Санкт-Петербург и Ленинградская область, Москва и Московская область, Краснодарский и Ставропольский края, Ростовская и Свердловская области, Республики Татарстан и Башкортостан. В том же 2016 г. было проинвестировано строительство 35 газозаправочных станций, а до конца 2018 г. их федеральную сеть предполагалось довести до 488 ед. [Газпром, 2016].

Для увеличения парка газобаллонного транспорта в России «Газпром» заключил соглашения о взаимодействии с большим числом отечественных и иностранных автопроизводителей. Цель подобного партнерства состоит в формировании «гарантированного спроса» на газобаллонное оборудование со стороны муниципальных автотранспортных предприятий, исключая частный сектор. Для последнего критически важным фактором перехода на альтернативное топливо, помимо инфраструктурных ограничений, служит цена. Снижение стоимости перехода на газомоторное топливо требует разработки соответствующих механизмов субсидирования, снижения, вплоть до обнуления, им-

⁶ Постановление Правительства РФ № 338 от 10.04.2015 г. «О признании утратившим силу постановления Правительства Российской Федерации от 15 января 1993 г. № 31». Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_177973/, дата обращения 24.10.2018.

Рис. 1. Окупаемость газобаллонного транспорта в зависимости от средней цены на компримированный природный газ при ценах на нефтепродукты в 40 руб./л



Источник: составлено авторами.

портных пошлин на оборудование для строительства газозаправочных станций и производства автомобилей на метановых двигателях. Региональным властям рекомендовано снизить ставки транспортного налога для газобаллонного транспорта⁷.

Перечисленных мер, однако, недостаточно для привлечения потребителей из частного сектора в условиях неопределенности ценообразования на газ, а главное — на компримированный метан. Анализ окупаемости газобаллонного транспорта показывает, что наиболее чувствительными к колебаниям цен на топливо оказываются преобладающие в частном секторе легковые автомобили в силу их низкой стоимости и малого пробега. При цене на бензин и дизельное топливо около 40 руб./л. верхний предел цен на газ, при котором эксплуатация газобаллонного легкового автомобиля остается рентабельной, составляет 19–20 руб./м³ (рис. 1).

Существует и нижний ценовой предел на уровне тех же 19 руб./м³, по достижении которого газозаправочный бизнес становится нерентабельным. При текущих

оптовых ценах на газ и полной пропускной загрузке срок окупаемости таких станций в России составляет порядка 2,5 года, что близко к аналогичному показателю традиционных АЗС.

Несмотря на упразднение формальной привязки цен на газомоторное топливо к нефтепродуктам (19 руб./л эквивалентно примерно 50% цен на нефтепродукты), именно эту величину мы будем использовать в дальнейших расчетах и при оценке перспектив межтопливной конкуренции в России. Долгосрочный комплексный анализ требует также учета электроэнергии как еще одного перспективного для российского рынка субститута нефтепродуктов в секторе дорожных перевозок. При оценке конкурентоспособности и других расчетах мы опирались на следующие ключевые характеристики (сценарные предпосылки): стоимость топлива, базовая цена автомобиля, уровень обеспеченности инфраструктурой, экологические параметры. Текущие значения показателей для автомобилей различного типа приведены в табл. 2.

Табл. 2. Ключевые потребительские характеристики автомобилей на различных видах альтернативных топлив в России в 2015 г.

Параметры	Топливо			
	Нефтепродукты	Газомоторное топливо	Электроэнергия	Биотоплива
Стоимость топлива (руб. на 100 км пробега)	300–400	130–160	70–150	800–1000
Стоимость автомобиля на определенном виде топлива (% к самому дешевому автомобилю в основном классе потребления)	100	120	150–350	100
Обеспеченность инфраструктурой	24 000 АЗС	250 АГНКС	40 АЗС*	24 000 АЗС**
Эмиссия CO ₂ (г/км)	290–320	200–250	0***	95–114

Примечания:
 * Общественные «быстрые заправки» (*fast charger*) без учета зарядки в частных домах или на общедоступных паркингах;
 ** При допущении о наличии на каждой АЗС дополнительного резервуара для хранения биотоплива или их использовании в смеси с нефтепродуктами;
 *** Без учета выбросов в процессе производстве электроэнергии.
 Цветографическая схема показывает (от самого светлого к наиболее темному), какое топливо оказывается предпочтительнее по определенному параметру в сравнении с другими.
 Источник: составлено авторами.

⁷ Распоряжение Правительства РФ № 767-р от 13.05.2013 г. «О регулировании отношений в сфере использования газового моторного топлива». Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_146288/, дата обращения 24.10.2018.

Формирование сценариев

Основой прогнозирования спроса на энергию в сегменте дорожных перевозок послужили два сценария — «Базовый» и «Стимулирование альтернативных топлив», — объединенные общими макроэкономическими предпосылками (объем ВВП, численность населения, динамика цен на нефть, нефтепродукты, электроэнергию и природный газ), но по-разному оценивающие степень успешности политики поддержки и внедрения альтернативных моторных топлив в России. Основные закладываемые в сценарии макроэкономические показатели представлены в табл. 3.

Оба сценария сходятся в оценке динамики эффективности транспортных средств, которая за ближайшие 25 лет вырастет в случае автомобилей, использующих жидкие и газовые топлива, на 20–25% (за счет оптимизации двигателей внутреннего сгорания, в том числе с помощью гибридных технологий, улучшения материалов кузова и шин⁸), а в случае электромобилей — на 5% (за счет улучшения материалов кузова и шин при неизменном КПД электромоторов — порядка 90%). Ни один из сценариев не подразумевает также существенных изменений в условиях межтопливной конкуренции нефтепродуктов, электроэнергии и природного газа с синтетическими топливами из газа, угля и биомассы. Последние едва ли в обозримом будущем станут конкурентоспособными с точки зрения производственных затрат. Отказ от их масштабного производства закономерно приведет к отсутствию предложения на рынке альтернативных топлив, что в свою очередь делает невозможным переход на них для потребителя. Отсутствуют и условия для коммерциализации и масштабного внедрения автомобилей, использующих для движения энергию топливных элементов. Редкие закупки топлива для концепт-каров и опытных образцов либо автомобилей премиального и люксового сегментов не окажут существенного влияния на энергобаланс транспортного сектора в перспективе до 2040 г.

Ключевое различие между сценариями связано с прогнозируемыми условиями межтопливной конкуренции нефтепродуктов и их непрямым субститутам — природного газа и электроэнергии. «Базовый сценарий» предполагает выполнение правительственных распо-

ряжений в части газификации общественного транспорта — о серийном производстве крупнотоннажных газобаллонных автомобилей, отказе от субсидий на переоборудование легкового и среднетоннажного транспорта или выпуск отечественных газобаллонных автомобилей. В части развития электротранспорта исключается поддержка строительства общественных заправочных станций, а имеющиеся правительственные инициативы, такие как обнуление транспортного налога, разрешение на проезд по выделенным полосам и отмена импортных пошлин, останутся без движения. Между тем доступность электроэнергии будет постепенно расти, по мере того как заправки будут точно оборудоваться на паркингах и в общественных местах.

Сценарий «Стимулирование альтернативных топлив» предполагает расширение к 2030 г. заправочной сети для газобаллонного транспорта на базе действующих и новых АЗС вплоть до полного преодоления инфраструктурного отставания. Субсидирование переоборудования на газомоторное топливо в легковом и среднетоннажном сегментах (силами самих потребителей либо посредством масштабного серийного выпуска отечественного газобаллонного транспорта) позволит к 2025 г. полностью нивелировать ценовую разницу с бензиновыми или дизельными аналогами. В части электротранспорта после 2025 г. в сценарий заложено строительство общественной инфраструктуры «быстрых заправок», рост доступности зарядки автомобилей в домашних условиях за счет оборудования розеток на подземных паркингах и в частных домах. В целом к 2040 г. альтернативная заправочная инфраструктура по уровню развитости приблизится к традиционной. Цены на электрокары снизятся вслед за импортными пошлинами и налаживанием собственного производства с 25% стоимости автомобиля до 0% — после 2025 г. Маркетинговая привлекательность автомобилей на альтернативном топливе повысится за счет активной рекламы и движения по выделенным полосам в крупных городах.

Результаты моделирования

Расчеты показали, что в обоих сценариях численность автопарка в России возрастет более чем вдвое — с 43 до

Табл. 3. Прогнозируемая динамика основных макроэкономических показателей России в период с 2014 до 2040 г.

Показатель	2014 г.	2040 г.
Среднегодовые темпы роста ВВП	Увеличение на 2.4% в год	
Численность населения	Снижение на 0.4%, соответствующее прогнозу ООН [UN, 2015].	
Внутренние цены на нефтепродукты (руб./л)*	40	60
Цены на природный газ, реализуемый на заправках (руб./м ³)	20	40
Цены на электроэнергию (руб./кВт·ч)	4.5	7.7
* Учет цен в национальной валюте особенно важен, поскольку большая часть населения принимает экономически обоснованные решения (моделируемые в расчетах) исходя из покупательной способности национальной валюты.		
Источник: составлено авторами.		

⁸ Подробнее об условиях повышения топливной эффективности автомобилей см.: [Макаров и др., 2014].

Рис. 2. Размеры автопарка по видам и совокупное потребление энергии в секторе дорожного транспорта



Рис. 3. Структура спроса на энергию по видам топлива в «Базовом сценарии»



97 млн ед., что в силу заложенного в них повышения энергоэффективности не приведет к удвоению совокупного спроса на энергию. Последний в секторе дорожных перевозок к 2040 г. составит 109 млн т н. э. против 64 млн в 2015 г. (рис. 2).

Даже при сохранении текущего уровня стимулирования альтернативных топлив тренд на расширение межтопливной конкуренции в российском сегменте дорожных перевозок останется неизменным, а роль основной альтернативы нефтепродуктам сохранится за КПГ. Его доля в структуре топливной корзины даже в сравнительно пессимистичном «Базовом сценарии» составит к 2040 г. 11%, или 11.5 млн т н. э., что сопоставимо с объемом бензина, потребленного за 2014 г. Центральным и Северо-Западными федеральными округами вместе взятыми. 35% этого газа придется на крупнотоннажный транспорт, характеризующийся максимальной эмиссией CO₂, что позволит существенно снизить вред, наносимый окружающей среде, по сравнению с ситуацией до замещения.

В отсутствие дополнительного стимулирования электроэнергия показывает гораздо более скромный нефтесамозаместительный потенциал. В «Базовом сценарии» на ее долю к 2040 г. придется не более 1% общего объема потребляемой транспортом энергии, или чуть более 1 млн т н. э. Впрочем, даже этого бы хватило для покрытия спроса на бензин в 2014 г. в традиционно дефицитном в части снабжения нефтепродуктами Дальневосточном федеральном округе.

Нефтепродукты сохраняют господствующее положение в сегменте дорожных перевозок при неизменных условиях регулирования. Совокупный спрос на них в сегменте дорожной транспортировки к 2040 г. достигнет 95.8 млн т н. э. (рис. 3). В условиях «Базового сценария» рост спроса на автомобильные бензины по сравнению с нынешним уровнем к 2040 г. составит 12.3 млн т н. э., что потребует от российской нефтяной

отрасли модернизации, а возможно, и расширения имеющихся перерабатывающих мощностей ценой значительных технологических и инвестиционных усилий.

От дополнительных мер поддержки использования альтернативных топлив в сегменте дорожных перевозок, предусмотренных сценарием «Стимулирование альтернативных топлив», ожидают существенного реструктурирования спроса на энергию. Доля газомоторного топлива в общем его объеме увеличится к 2040 г. до 21%, а в абсолютном выражении достигнет 23 млн т н. э., вытеснив нефтепродукты, в первую очередь наиболее дорогой бензин.

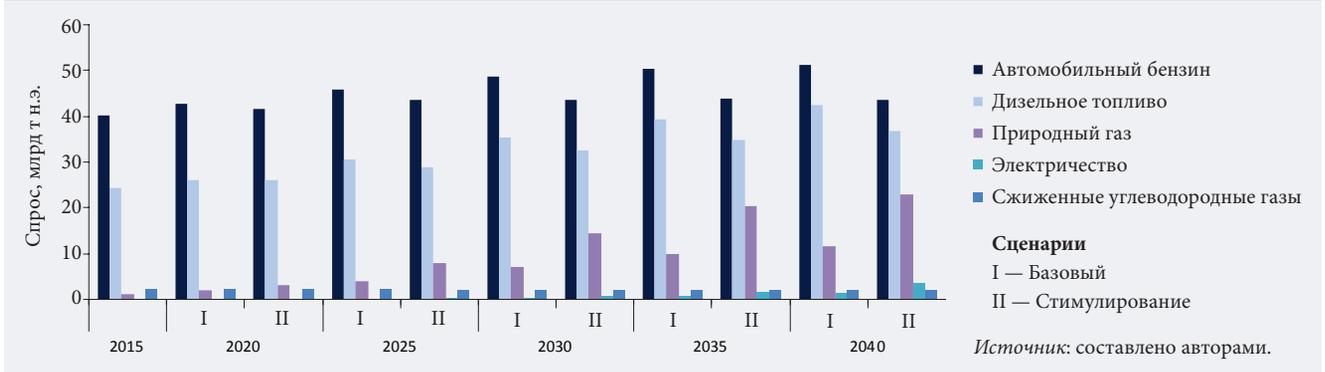
Доля электроэнергии в общем объеме спроса в этом варианте оценивается к 2040 г. на уровне 3%, а абсолютные объемы достигнут 3.5 млн т н. э. против 1 млн — в «Базовом сценарии» (рис. 4). В диверсификационном сценарии бензин под давлением альтернативных топлив практически сохранится в объеме текущих нефтеперерабатывающих мощностей.

Заключение

Исследование позволило установить, что в России сложились объективные условия для диверсификации топливной корзины в секторе дорожных перевозок.

1. *Структурный фактор.* Превалирующий в топливной корзине сектора автомобильный бензин по состоянию на 2015 г. импортируется в крайне незначительных объемах, тогда как дальнейший рост его производства сдерживается достигнутым пределом производительности российских НПЗ, нехваткой инвестиций и отечественных технологий. Требуемые инвестиции оцениваются примерно в 20 млрд долл. [Капустин, 2011], что сопоставимо с затратами на развитие газомоторной инфраструктуры — 12.6–31.5 млрд долл. на оборудование всех АЗС газозаправочными установками [Промэкспертиза, 2016]. Рост спроса в отсутствие но-

Рис. 4. Структура спроса российского сектора дорожных перевозок в «Базовом сценарии» (I) и в сценарии «Стимулирование альтернативных топлив» (II)



вых перерабатывающих мощностей поставит Россию — одного из крупнейших в мире производителей нефти и нефтепродуктов — перед необходимостью импорта топлива.

2. *Экологический фактор.* Нефтепродукты — самое неэкологичное топливо из всех. Применение КПП вместо традиционного дизеля и бензина позволит на четверть сократить объемы вредных выбросов городского транспорта в атмосферу, а переход на электрокары снизит непосредственную эмиссию автомобилей.

3. *Экспортный фактор.* Снижение спроса на нефтепродукты на внутреннем рынке позволит России максимизировать экспорт нефти и нефтепродуктов за рубеж — стратегия, успешно реализованная Ираном, сумевшим перевести значительную часть парка на газомоторное топливо за счет локализации в стране производства газобаллонного транспорта.

4. *Газовый фактор.* Развитие внутреннего газового рынка откроет новую нишу для реализации продукции национальных игроков, что особенно актуально в условиях сжатия спроса на внутреннем и ключевом европейском экспортном рынке при большом потенциале расширения добычи газа [Кулагин, Митрова, 2015].

Перечисленные факторы намекают потенциальные направления государственной поддержки диверсификации топливной корзины и повышения потребительской привлекательности отдельных видов топлив. От последней в конечном счете зависит, произойдет ли фактический переход с традиционных нефтепродуктов на альтернативные виды топлива.

Технико-эксплуатационные характеристики теоретически позволяют газомоторному топливу уже сегодня составить реальную конкуренцию нефтепродуктам на российском рынке. Масштаб замещения во многом зависит от мер регулирования и стимулов, прежде всего в части ценообразования на газомоторное топливо, развития инфраструктуры и субсидирования переоборудования традиционных автомобилей под газовые баллоны.

Сценарный анализ показывает, что активно захватывающие рынки развитых, в частности европейских, стран электрокары в России пока имеют весьма скромный потенциал внедрения в силу крайне высокой

в сравнении с другими автомобилями базовой стоимости. Таким образом, если залогом востребованности природного газа как альтернативного топлива служат регуляторные условия, то для успеха электромобилей необходимо дальнейшее технологическое совершенствование, направленное на удешевление их производства.

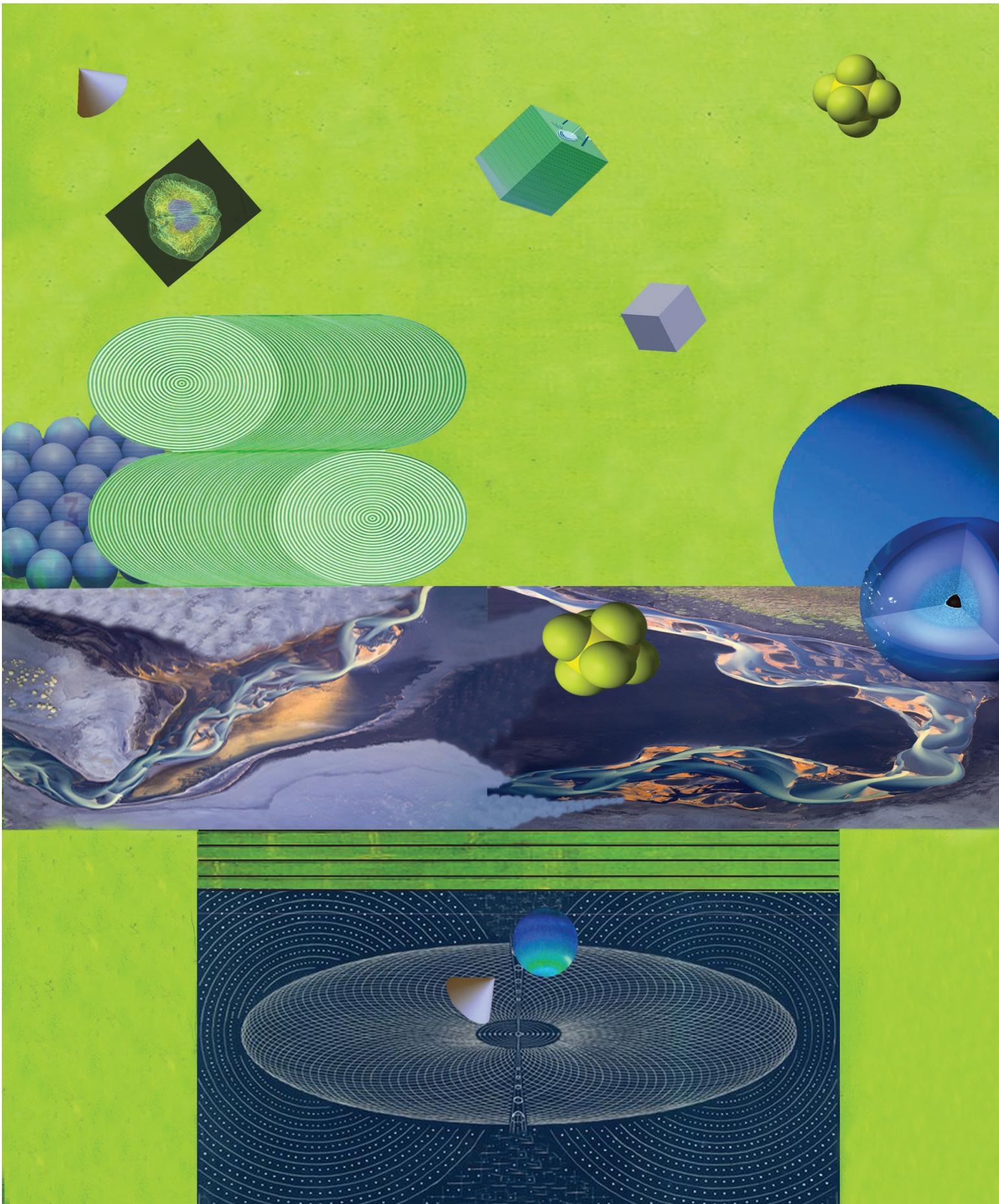
Российское правительство в настоящее время реализует стратегию диверсификации топливной корзины исключительно за счет внедрения газомоторного топлива на общественном крупнотоннажном автотранспорте. Расчеты показывают, что для заметного вытеснения нефтепродуктов из энергетической корзины транспортного сектора в легковом или среднетоннажном сегментах этих мер заведомо недостаточно. Раскрыть потенциал альтернативной энергетики на транспорте в России и сдержать рост спроса на нефтепродукты позволят комплексные усилия по существенному развитию потребительской инфраструктуры (газонаполнительных компрессорных станций) в сочетании со снижением стоимости транспортных средств на альтернативном топливе. В случае с газобаллонным транспортом речь может идти об организации собственных конвейерных производств или предоставлении налоговых вычетов.

Комплекс стимулирующих мер позволит сэкономить к 2040 г. на 13 млн т н. э. нефтепродуктов больше по сравнению с «Базовым сценарием», которые могут быть направлены на экспортные рынки. Подобная стратегия может оказаться крайне затратной и потребует значительных инвестиций, которые сложно привлечь в кризисный период. Впрочем, эти затраты сопоставимы с масштабной модернизацией нефтепереработки, а в случае реализации комплексной государственной политики топливной диверсификации издержки будут распределены между не только нефтяными, но и газовыми, электроэнергетическими компаниями, городскими и муниципальными образованияами, потребителями и автопроизводителями. Сама же диверсификация послужит заметному улучшению экологической обстановки в крупных городах и стране в целом.

Статья подготовлена при грантовой поддержке Российского научного фонда, проект №14-19-01459.

Библиография

- Автостат (2016) За 10 лет средняя цена легкового автомобиля в России выросла в 3 раза // Автостат. 09.06.2016. Режим доступа: <https://www.autostat.ru/news/26250/>, дата обращения 25.09.2016.
- АЦ (2014) Энергетическая стратегия России на период до 2035 года (основные положения). М.: Аналитический центр при Правительстве РФ. Режим доступа: <http://ac.gov.ru/files/content/1578/11-02-14-energostrategy-2035-pdf.pdf>, дата обращения 15.02.2016.
- АЦ (2015) Активность населения в использовании транспортных услуг. Бюллетень социально-экономического кризиса в России. Вып. 7 (ноябрь). М.: Аналитический центр при Правительстве РФ. Режим доступа: <http://ac.gov.ru/files/publication/a/7059.pdf>, дата обращения 25.09.2016.
- Бобылев Ю.Н., Приходько С.В., Дробышевский С.М., Тагор С.В. (2006) Факторы формирования цен на нефть. М.: Институт экономики переходного периода.
- Брагинский О.Б. (2012) Прогнозирование российского рынка автомобильных видов топлива: доклад для открытого семинара «Экономические проблемы энергетического комплекса» 24 апреля 2012 г. М.: РАНХиГС. Режим доступа: <http://ecfor.ru/wp-content/uploads/seminar/energo/z129.pdf>, дата обращения 18.04.2016.
- Воронов А., Цинова Я., Дятел Т. (2016) Электромобили подзаряжают льготами // Коммерсантъ. № 123 (12.07.2016). Режим доступа: <https://www.kommersant.ru/doc/3036078>, дата обращения 21.09.2017.
- Газпром (2016) В текущем году «Газпром» построит 35 новых АГНКС // Официальный сайт ПАО «Газпром». 02.08.2016. Режим доступа: <http://www.gazprom.ru/press/news/2016/august/article280185/>, дата обращения 17.01.2017.
- Интерфакс (2016) ЕЭК продлила сниженные пошлины на электромобили до сентября 2017 года. Режим доступа: <http://www.interfax.ru/business/518259>, дата обращения 24.05.2017.
- ИНЭИ, АЦ (2014) Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года / Под ред. А.А. Макарова, Л.М. Григорьева, Т.А. Митровой. М.: Институт энергетических исследований РАН, Аналитический центр при Правительстве РФ.
- Капустин В. (2011) Ренессанс в нефтепереработке отменяется? // Нефтегазовая вертикаль. № 21. Режим доступа: <http://www.ngv.ru/magazines/article/renessans-v-neftepererabotke-otmenyaetsya/>, дата обращения 17.01.2017.
- Капустин Н.О., Осипова Е.Д. (2015) Системный анализ мероприятий четырехстороннего соглашения // Нефть, газ и бизнес. № 6. С. 13–18.
- Кулагин В.А., Грушевенко Д.А., Козина Е.О. (2015) Эффективное импортозамещение // Энергетика и геополитика. № 1 (49). С. 49–57.
- Кулагин В.А., Митрова Т.А. (2015) Газовый рынок Европы: утраченные иллюзии и робкие надежды. М.: ИНЭИ РАН, НИУ ВШЭ.
- Миловидов К.Н., Коржубаев А.Г., Эдер Л.В. (2006) Нефтегазообеспечение глобальной экономики. М.: ЦентрЛитНефтеГаз.
- Минэнерго (2009) Энергетическая стратегия России на период до 2030 года (утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 13.11.2009 г. № 1715-р). М.: Министерство энергетики РФ. Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/1026>, дата обращения 15.02.2016.
- Митрова Т.А., Галкина А.А. (2013) Межтопливная конкуренция // Экономический журнал ВШЭ. № 3. С. 394–413.
- Митрова Т.А., Кулагин В.А., Грушевенко Д.А., Грушевенко Е.В. (2015) Технологические инновации как фактор спроса на энергоносители в секторе автомобильного транспорта // Форсайт. Т. 9. № 4. С. 18–31.
- Москва 24 (2016) Две бесплатные станции зарядки электромобилей открылись в Москве // Москва 24. 22.04.2016. Режим доступа: goo.gl/whb639, дата обращения 05.11.2016.
- НГА (2015) Мировой рынок КПП по состоянию на ноябрь 2015 г. // Официальный сайт Национальной газомоторной ассоциации. Режим доступа: <http://www.ngvrus.ru/statistics.html>, дата обращения 17.01.2017.
- Промэкспертиза (2016) Правительство РФ обязало АЗС продавать газомоторное топливо // Официальный сайт ГК «Промэкспертиза». Режим доступа: http://promexpertiza.ru/pravitelstvo_rf_obyazalo_azs_prodatav_gazomotornoe_topливо/, дата обращения 17.01.2017.
- Curran S.J., Wagner R.M., Graves R.L., Keller M., Green J.B. Jr. (2014) Well-to-wheel analysis of direct and indirect use of natural gas in passenger vehicles // Energy. № 75. P. 194–203.
- Glebova O. (2013) Gas to Liquids: Historical Development and Future Prospects. Oxford: Oxford Institute for Energy Studies.
- Grushevenko E., Grushevenko D., Kulagin V. (2016) Long-term impact of technological development on European road transportation sector's fuel mix: Focus on electric vehicles. Paper presented at the 10th International Conference on Electric Power Quality and Supply Reliability. Режим доступа: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=7724107>, дата обращения 20.07.2017.
- Höök M., Aleklett K. (2010) A review on coal to liquid fuels and its coal consumption // International Journal of Energy Research. Vol. 34. № 10. P. 848–864.
- IEA (2014) World Energy Outlook 2014. Paris: International Energy Agency.
- Kapustin N., Grushevenko D. (2016) Russia refines on // Energy Focus. № 26 (Spring). P. 89–94.
- Mitrova T. (2016) Shifting Political Economy of Russian Oil and Gas. A Report of the CSIS Energy and National Security Program. Lanham; Boulder; New York; London: Rowman & Littlefield.
- Mitrova T., Kulagin V., Grushevenko D., Grushevenko E., Galkina A. (2015) Integrated method of petroleum products demand forecasting considering economic, demographic and technological factors // Economics and Business Letters. Vol. 4. № 3. P. 98–107.
- Mussatto S.I. (2016) A closer look at the developments and impact of biofuels in transport and environment; what are the next steps? // Biofuel Research Journal. Vol. 3. № 1. P. 331. DOI: 10.18331/BRJ2016.3.1.2.
- Sørensen B. (2012) Hydrogen and Fuel Cells. Emerging Technologies and Applications (2nd ed.). Amsterdam; Boston; Heidelberg; London; New York; Oxford; Paris; San Diego; San Francisco; Singapore; Sydney; Tokyo: Elsevier.
- UN (2015) World Population Prospects: 2015 Revision. UN Population Division Report. Geneva: United Nations.
- Voelcker J. (2014) How Much Money Does the 2016 Toyota Mirai Lose? A Lot, Perhaps // Green Car Reports. Режим доступа: http://www.greencarreports.com/news/1095773_how-much-money-does-the-2016-toyota-mirai-lose-a-lot-perhaps, дата обращения 20.09.2017.



Применение глобальных баз данных в Форсайт-исследованиях энергетики и землепользования: метод GCDB

Гильберт Ахамер

Старший научный сотрудник, gilbert.ahamer@chello.at

Центр изучения климата и глобальных изменений им. Вегенера Университета Граца (Wegener Centre for Climate and Global Change, Graz University), Macherstrasse 15, 8047 Graz, Austria

Аннотация

Состояние национальных экономик во многом зависит от энергетических трендов, которые, как показывает практика, носят нелинейный характер. В статье предлагается эффективный метод прогнозирования таких трендов. Он основан на географическом подходе и комбинирует биосферно-энергетическую модель с базой данных глобальных изменений. Преимущество рассматриваемого метода перед «чистым моделированием» заключается в его эвристичности, оперировании реальной исторической динамикой техно-социально-экономических систем. Предлагаемый инструментарий применим для характеристики новых явлений и процессов и оценки

эффекта насыщения, в частности, с использованием первых и вторых производных. Его научная новизна заключается в учете корреляции динамических рядов, а не единичных данных. Это позволяет сделать важные выводы в ходе анализа массивов данных и проверить распространенную гипотезу «зависимости от выбранного пути» применительно к экономике энергетики и экономическому развитию в целом.

По мнению автора, применение предложенного метода повысит объективность собираемых данных, обогатит знания в области «теории роста», расширит информационную базу и увеличит эффективность государственной климатической политики.

Ключевые слова: Форсайт энергетики; глобальное моделирование; база данных глобальных изменений; сценарии; экстраполяция трендов; эвристическое моделирование; сценарий «обычная динамика»; энергия биомассы; изменения в сфере землепользования; насыщение.

Цитирование: Ahamer G. (2018) Applying Global Databases to Foresight for Energy and Land Use: The GCDB Method. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no 4, pp. 46–61. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.46.61

Введение: картирование энергетических трендов с позиций системной динамики

Производство энергии определяет развитие экономики любого государства. Например, в постсоветских странах, в частности в Казахстане, основным источником энергии остаются ископаемые виды топлива. Здесь, несмотря на нерешенные проблемы безопасности, включая утилизацию радиоактивных отходов, динамично развивается ядерная энергетика [WNA, 2018; Ахамер, 2012]. Однако масштабное потребление ископаемых топлив может сократиться ввиду ограниченности их запасов и участия Казахстана в международных соглашениях о защите климата. Это способно привести к радикальному изменению структуры национальной экономики, которая определяет позиции страны в среднеазиатском регионе [Gürgen et al., 1999; IMF, 2009].

Для превентивной оценки подобных изменений и реагирования на них в ряде государств составляются карты энергетических трендов (см., например, [IPCC, 2002; ИАСА, WEC, 1998; Foster, Rosenzweig, 2003; Barro, 1991]). Их экстраполяция, независимо от методов (линейные, экспоненциальные или иные), описывается аналитической кривой, вид которой представлен на рис. 1а. С помощью этого алгоритма оцениваются сравнительно короткие временные горизонты. Для проецирования тренда на несколько десятилетий выявляются *эффекты насыщения* (*saturation effects*) и *новые качества* (*new qualities*) (рис. 1б).

С точки зрения системной динамики [Sterman, 2000] оба типа развития, отраженные на рис. 1, рассматриваются как предсказуемые. Они прогнозируются путем наблюдений за нарастающей скоростью изменений. На стартовых этапах перемены могут иметь незначительную величину, а потому не прочитываться (речь идет о «слабых сигналах») [Steinmuller, 2012; Hiltunen, 2006]). Реальность рассматривается как сверхсложная система взаимосвязанных дифференциальных уравнений.

Изучая системную динамику, можно также выявить переломные моменты и «джокеры» (*wildcards*) — маловероятные события, радикально меняющие траекторию развития системы [Nikolova, 2017; Walsh et al., 2015; Mehrabanfar, 2014].

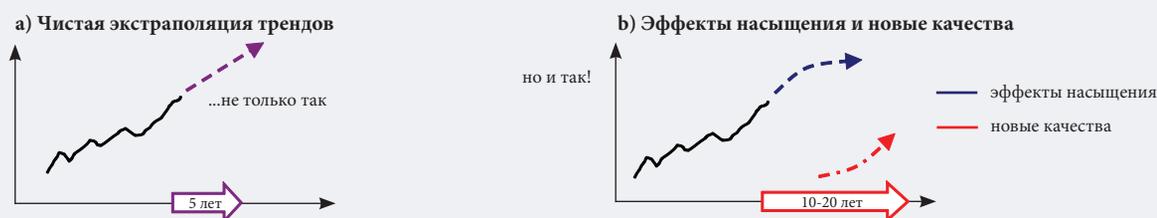
Различные трактовки Форсайта в литературе

Термин «Форсайт» часто используется компаниями при поиске перспективных возможностей, для обоснования оптимальных инвестиционных стратегий [Foresight Group, 2018] либо выявления технологических трендов в отдельных областях, например молекулярных нанотехнологий [Foresight Institute, 2018; Drexler, 1986] или транспорта [Foresight Automotive, 2018]. Ряд исследований посвящены оценке стратегий, сопоставлению экспертных мнений о сценариях будущего [Futurezone, 2013] или разработке государственной политики на основе технологического Форсайта [BMBF, 2012; Austrian Parliament, 2018]. Компании, предлагающие услуги на динамичном рынке Форсайт-исследований, не ограничиваются «суждениями в отношении ожидаемых событий и планированием действий на основании этих знаний», согласно традиционному словарному определению [Cambridge, 2018], а предлагают для анализа многовариантные сценарии будущего [Horx, 2018; Z-Punkt, 2018].

«Чистая» экстраполяция трендов базируется на фиксированных значениях (*values*) (обозначим их как «х»). Анализ первых и вторых производных (∂x и $\partial^2 x$) позволяет рассчитать эффекты насыщения и новые качества. Каждый из вариантов (x , ∂x и $\partial^2 x$) рассмотрим подробнее.

Основные подходы к Форсайту энергетики и землепользования, такие как картирование и проецирование энергетических аспектов на будущее, проявляются во многих формах. Задача нашей статьи — оценить перспективы эволюции глобального спроса на электроэнергию и способы его удовлетворения. В основу анализа положены классические карты потребления энергии и потенциала энергообеспечения, а структурные переменные, характеризующие энергетическую отрасль, сопоставляются с показателем среднедушевого валового национального продукта (ВНП) (GNP/cap). Объектами картирования служат пространственные и временные аспекты спроса и предложения, а также определяющие их факторы. Комбинирование обоих подходов позволяет построить карты и проекции динамических структур, которые составляют основу для национального Форсайта [Ахамер, 2019].

Рис. 1. Нелинейный прогноз долгосрочных трендов на основе принципа волновой эволюции



Источник: составлено автором.

Многие дисциплины, такие как физика, история и экономика, оперируют преимущественно временными категориями. В отличие от них география, опирающаяся на пространственные аспекты, рассматривает реальность с идеализированных позиций (обобщенный взгляд с высоты «птичьего полета» (*generalized bird-eye view*) [Ahamer, 2019]). На практике данный подход учитывается редко, тем не менее он позволяет увидеть и преодолеть существующие различия в индивидуальных восприятиях. Подобное «наведение мостов» способствует формированию консенсуса в любой области [Schmitz, 2009, p. 9; Schmitz, 2003, p. 21; Knizhnikov, 2018].

Картирование пространственного распределения спроса на энергию

В экономике энергетики при расчетах объема выбросов CO₂ и разработке мер по защите климата используется простая базовая формула, часто называемая «тождеством Кая» (*Kaya identity*) [Kaya, 1990; Kaya et al., 1997; Rosa, Dietz, 2012], которая имеет вид [IPCC, 2002; IIASA, WEC, 1998; WEC, 2003]:

$$CO_2 = (CO_2 / E) \times (E / GNP) \times (GNP/capita) \times P, \quad (1)$$

где:

- CO₂ — уровень выбросов углекислого газа;
- E — спрос на конечную энергию (для конкретного энергоносителя);
- GNP — валовый национальный продукт (для конкретного экономического сектора);
- P — численность населения.

С точки зрения системного анализа [Sterman, 2000; Bentley et al., 2004; Vester, von Hesler, 1980; Meadows et al., 1972] развитие экономики как сложной динамической системы во многом определяется ее политической, технологической и социальной структурой [Heylighen,

1996; Chan, 2001]. Если структура остается устойчивой, темпы роста также сохраняются¹. Однако в реальности структура любой системы в процессе эволюции меняется, следовательно, все коэффициенты формулы (1) движутся по «траектории развития» и определяют «сценарии выбросов».

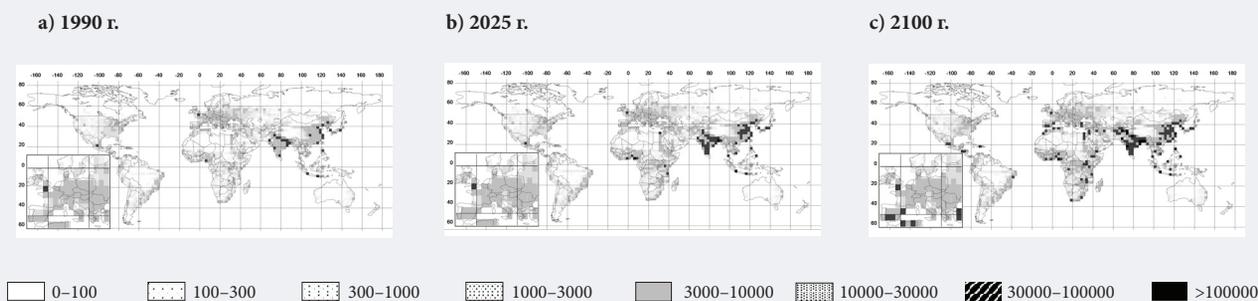
На рис. 2–5 представлены карты величин для каждой из четырех магнитуд драйверов, отраженных в формуле (1): население, валовой национальный продукт (ВНП), потребление первичной энергии и спрос на конечную энергию (по состоянию на 1990 г. и прогнозные на 2025 и 2100 гг.). Зависимая переменная в левой части формулы характеризует расчетные значения итогового объема эмиссии CO₂ (рис. 6, 7). В картах ключевых драйверов используется специальная координатная сетка размером 2.5° × 2.5°, предусмотренная «комбинированной энергетической и биосферной моделью» (*Combined Energy and Biosphere Model, CEBM*) для проецирования статистических данных Международного энергетического агентства (МЭА)².

Представленные на картах величины Pop, GNP, E и CO₂ имеют экстенсивную природу. Эти показатели соответствуют классическим географическим картам, основанным на пространственных структурах. В частности наблюдается сдвиг динамики выбросов углекислого газа из европейских стран, СНГ и Северной Америки в сторону Китая, Индии и частично Африки. В целом эта тенденция коррелирует с изменением национальных стратегий, политических курсов и другими эволюционными процессами.

На картах (рис. 2–7) отражены количественные показатели, измеряемые в денежном выражении и в единицах энергопотребления, которые в связи с их материальной природой часто называют экстенсивными магнитудами.

Вопреки гипотезе о зависимости от пройденного пути (*path dependence*), которые придерживают-

Рис. 2. Численность населения в 1990, 2025 и 2100 гг. в соответствии со сценарием СЕВМ (тыс. чел.)



Примечание: этот и последующие рисунки основываются на собственных разработках автора, детально описываемых в работе [Ahamer, 2019].

¹ Этот принцип можно назвать «ньютоновской парадигмой Форсайта» (*Newtonian foresight paradigm*) по аналогии с известным базовым законом механики, сформулированным Исааком Ньютоном: при отсутствии ускорения скорость материального объекта не меняется.

² Методология модели СЕВМ разработана автором в период сотрудничества с Международным институтом прикладного системного анализа (International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA) [Ahamer, 1994].

Рис. 3. Валовой национальный продукт (ВНП) в 1990, 2025 и 2100 гг. в соответствии со сценарием СЕВМ (млн долл./год)

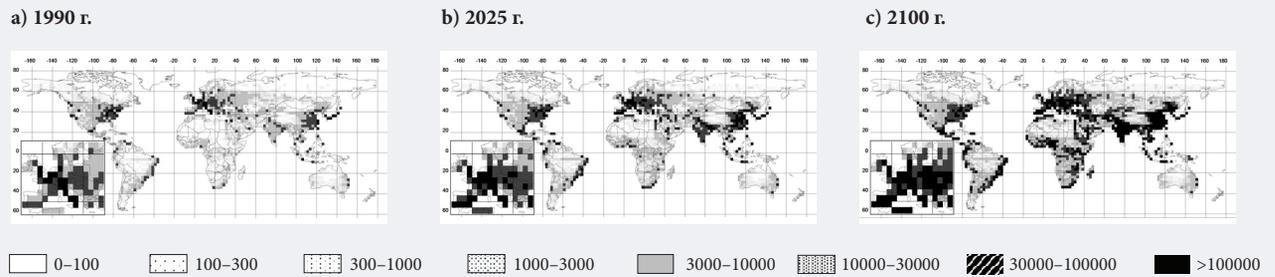


Рис. 4. Потребление энергии в 1990, 2025, 2100 гг. в соответствии со сценарием СЕВМ (ПДж/г.)

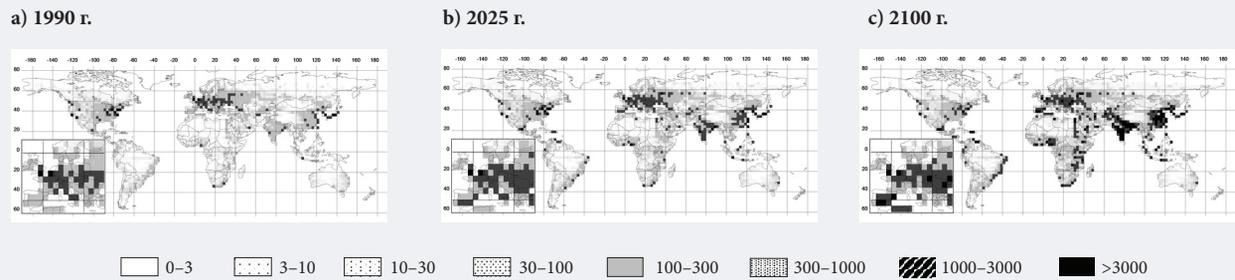


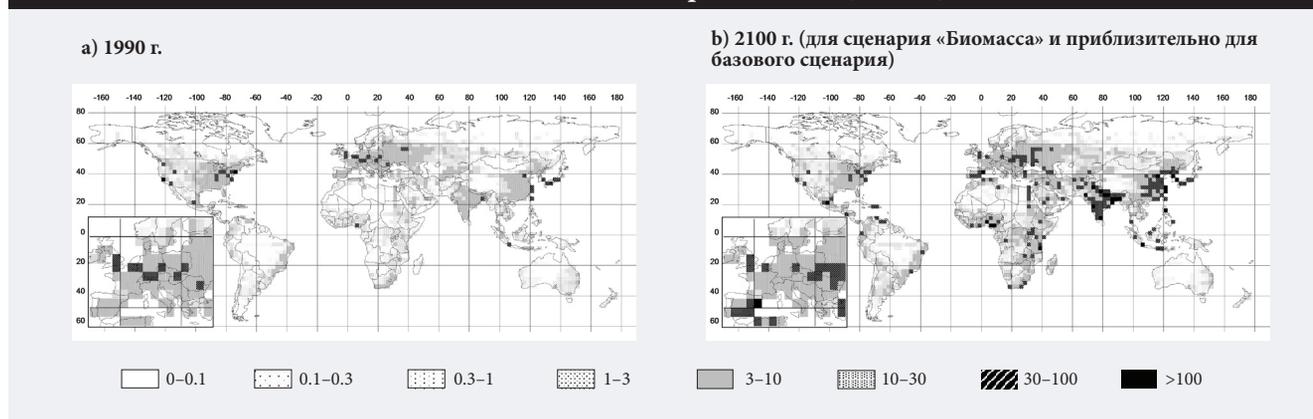
Рис. 5. Структура топливного баланса в 1990 г. согласно модели СЕВМ (%/100)



Рис. 6. Объем выбросов CO₂ из разных источников в 1990 г. по данным СЕВМ (квт С/г.)



Рис. 7. Объем выбросов CO₂ от сжигания ископаемого топлива в 1990 и 2100 гг. в соответствии со сценарием СЕВМ (Mt/г.)



ся представители отдельных секторов, экстенсивные магнитуды не следуют плавным траекториям [Ahamer, 2013, 2019]. Плавные траектории и масштабируемые тренды с наибольшей вероятностью наблюдаются в системных переменных, описывающих внутреннюю структуру системы (в данном случае энергетической), ее взаимосвязи и временную динамику. Исходя из этого, тренды анализируются с позиций интенсивных, а не экстенсивных магнитуд. Это обусловлено прагматическими соображениями (тренды в интенсивных переменных выглядят более стабильными) и характеристиками системы (под влиянием ежегодно меняющихся внешних факторов ее

программная архитектура, культура и организационная структура характеризуются большей стабильностью, чем ожидаемое поведение).

Таким образом, описанные выше формула и методология проецирования предполагают использование коэффициентов косвенных экстенсивных факторов — драйверов, определяющих выбросы CO₂ (GNP/cap — среднедушевой ВВП, E/GNP и CO₂/E). Являясь интенсивными величинами, эти коэффициенты характеризуют системы и структуры в масштабах страны: экономику, энергетику и топливный баланс.

Помимо абсолютных величин (CO₂, E, GNP, Pop — см. рис. 2–5), на картах (рис. 8–11) показаны относительные

Рис. 8. Среднедушевое потребление энергии в 1990 и 2100 гг. (ГДж/чел./год)

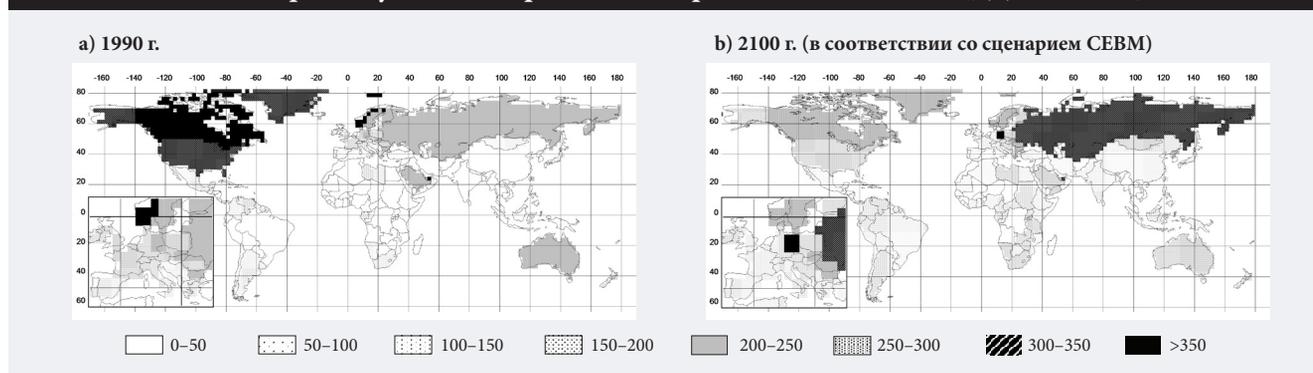


Рис. 9. Среднедушевой объем выбросов CO₂ от сжигания ископаемого топлива (CO₂/cap) в 1990 и 2100 гг. (т. С/чел./год)

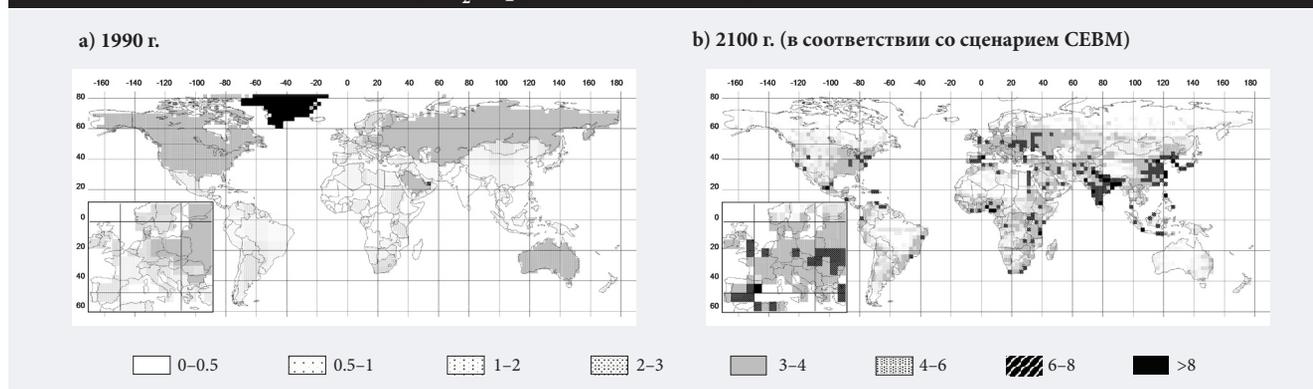


Рис. 10. Энергоемкость (удельная энергоемкость ВВП) (E/GNP) в 1990 и 2100 гг. (МДж/долл.)

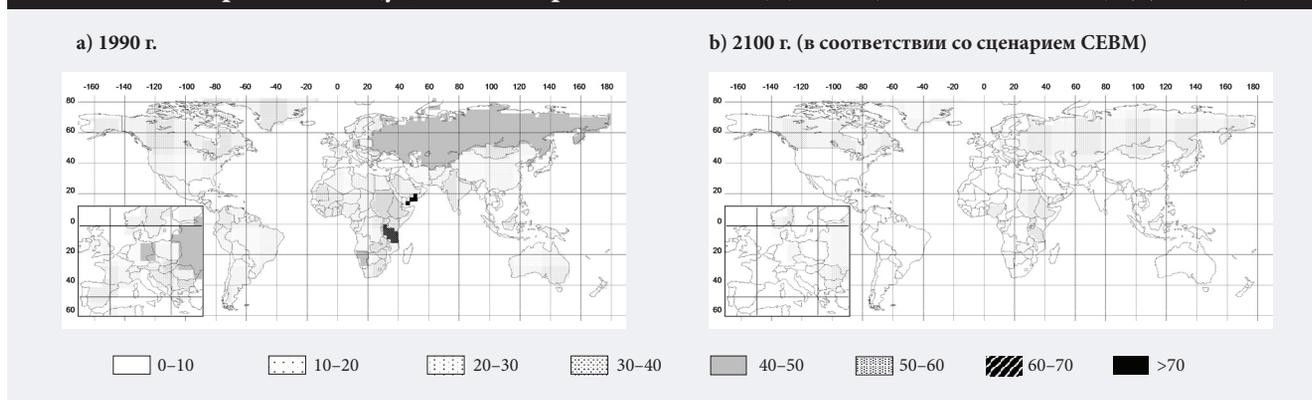
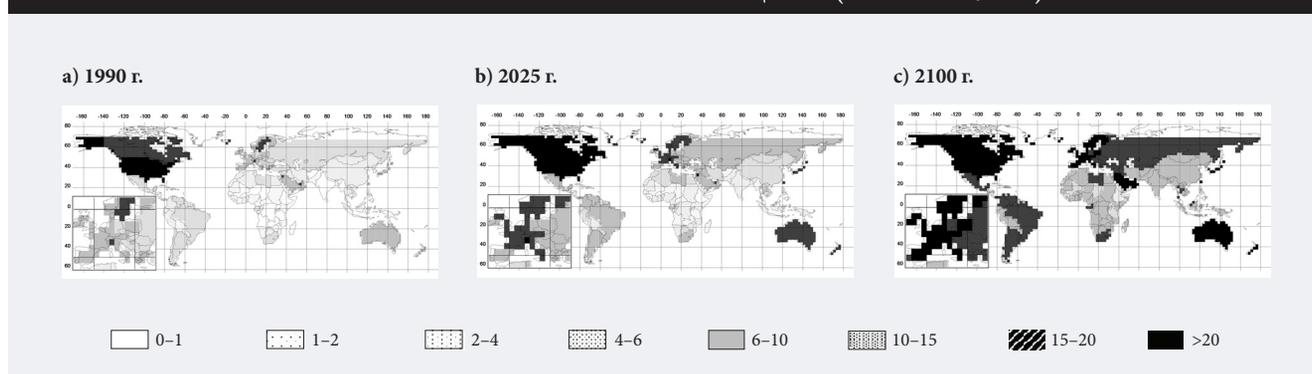


Рис. 11. Уровень экономического развития стран (среднедушевой показатель ВВП) (GNP/cap) в соответствии со сценарием СЕВМ для 1990, 2025 и 2100 гг. на основе допущения о глобальном экономическом насыщении (тыс. долл./чел.)



тельные — в виде коэффициентов смежных (и последующих) переменных для 1990 и 2100 гг.: E/cap, CO₂/cap, E/GNP и GNP/cap.

Равномерное распределение данных внутри государств подтверждает обоснованность допущений о гомогенности национальных энергетических и экономических систем. Это позволяет укрупнить «уровень детализации» картирования и вместо 2433 элементов координатной сетки рассматривать 200 стран. Подобная системная структура предоставляет дополнительную «степень свободы» картирования, которая будет использована в последующих разделах.

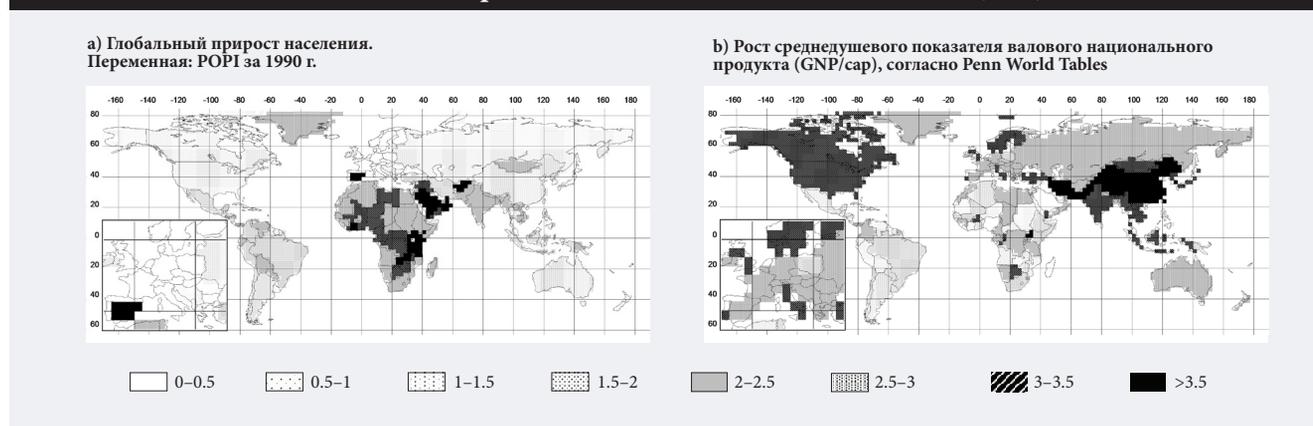
Приведенные показатели рассчитывались с использованием всех компонентов формулы. Они различаются по темпам роста и географическим характеристикам. Каждый индикатор может достичь точки насыщения и даже изменить динамику с положительной на отрицательную либо наоборот.

Дискутируя о характере географических паттернов роста (синхронность либо нарастание разрыва между странами) [Basu, Weil, 1998], экономисты разделились на два основных лагеря: неоклассический и кейнсианский [Barro, 1999]. К факторам, способствующим экономическому росту, относят: политическую стабильность и демократию [Barro, 1991, p. 432], развитие технологий

[De Long, Summers, 1991], выполнение исследований и разработок (ИиР) [Jones, Williams, 1998], стабильную экономическую интеграцию [Rivera, Romer, 1991, 1994; Devereux, Lapham, 1994]. С помощью регрессионных методов анализировались характеристики экономического развития в Китае и СССР на протяжении предшествующего столетия [Ofer, 1987; Chow, 1993]. В последние десятилетия набирает популярность научное направление «эволюционная экономика», развивающее идеи Йозефа Шумпетера (Joseph Schumpeter) о связи экономического развития с институциональным устройством [Hanusch, 1988; Bergh, Stiglitz, 2003].

В ряде исследований [Grossman, Krueger, 1995, p. 370] отмечается, что с увеличением ВВП возрастает ущерб, причиняемый окружающей среде, но лишь до определенного порога — значения среднедушевого ВВП на уровне 9000 долл., после чего негативное воздействие начинает снижаться. Этот феномен известен как «экологическая кривая Кузнецца» (Environmental Kuznets Curve, ЕКС) [Foster, Rosenzweig, 2003]. По данным МВФ [IMF, 2009], среднедушевой ВВП Казахстана в 2007 г. составил 6868 долл. Исходя из представленной выше закономерности, можно предположить предстоящее снижение экологического ущерба в этой стране, вызванного сжиганием ископаемого топлива.

Рис. 12. Темпы роста населения и экономики в 1990 г. (%/г.)



Приведенные положения позволяют заключить, что темпы роста рассматриваются как основная характеристика динамики и, следовательно, будущего развития системы. Возникает вопрос об оптимальных способах «картирования» этого показателя.

В качестве примеров на рис. 12 приведены карты темпов роста населения (слева) и среднедушевого ВВП (справа). Однако для адекватной интерпретации недостаточно простого сопоставления таких данных с географическими координатами и климатическими характеристиками — необходимо учитывать сложный исторический, экономический и политический «мировой опыт»³.

В последующих разделах рассмотрим динамику паттернов.

Картирование пространственных характеристик потенциального производства энергии из биомассы

Модель СЕВМ позволяет сопоставить глобальный спрос на энергию (см. серию рисунков, следующих за рис. 4) с потенциалом ее производства из биомассы — энергоносителя с нулевым объемом «чистых» выбросов CO₂. На рис. 13 представлены пространственные характеристики максимального теоретического потенциала выработки энергии из биомассы, выраженные в ежегодном объеме прироста древесины и травянистых растений на природных или сельскохозяйственных землях [Ahmer, 1994, 2019]. Оперирование категориями ежегодного прироста, а не суммарного объема биомассы обеспечивает соответствие одному из базовых критериев устойчивости.

Ожидается, что глобальный мегатренд повышения продуктивности сельского хозяйства приведет к снижению спроса на пахотные земли и высвободит площади для использования в других целях, включая производство энергии⁴. Таким образом, при благопри-

ятных условиях можно ожидать увеличения доступных земельных площадей для выращивания биомассы в индустриализированных странах.

При оценке глобального потенциала выращивания биомассы для производства энергии (см. рис. 13) учитывались пять альтернативных стратегий землепользования и растениеводства:

- as — применение сельскохозяйственной биомассы для выработки энергии;
- av — создание плантаций энергетической биомассы на ранее неосвоенных территориях;
- nv — извлечение энергии из природной биомассы растений, достигших возраста 5 лет (~ быстрая ротация растений);
- nvp — использование природной биомассы в производстве энергии (= лесное хозяйство);
- ap — создание плантаций энергетической биомассы на бывших землях сельскохозяйственного назначения.

Глобальный энергетический потенциал биомассы распределен неравномерно, к тому же центры ее производства не совпадают с местами максимального спроса (см. рис. 13). Сравнение географических характеристик, указанных на рис. 13 и рис. 4, иллюстрирует колоссальную потребность в транспортировке, которая может возникнуть в случае реализации экстенсивной стратегии производства энергии из биомассы.

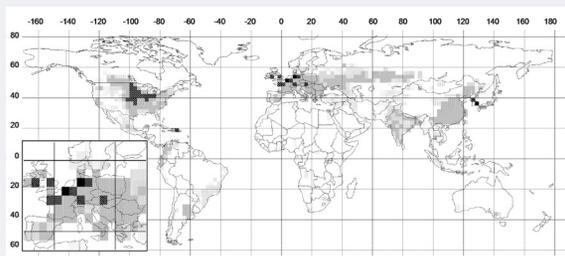
На рис. 14 приведены данные о совокупном глобальном производстве (три верхние позиции) и потребности электроэнергии (две нижние позиции). Можно предположить, что теоретический потенциал биомассы эквивалентен магнитуе реального спроса. На практике с учетом всех необходимых аналитических «отсечений» оказывается, что использование исключительно топлива, произведенного из биомассы, ни при каких условиях не сможет полностью обеспечить глобальную энергосистему.

³ Ряд авторов пытались предложить соответствующие объяснения, но многим читателям они могут показаться чрезмерно упрощенными [Landes, 2000].

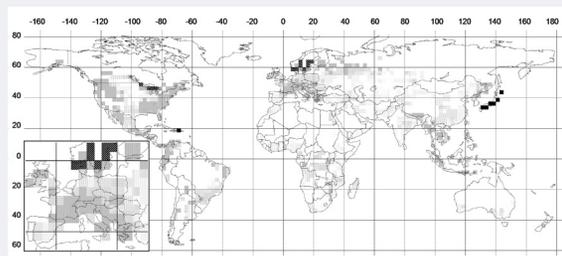
⁴ В частности, отмечена связь увеличения площади лесов с ростом среднедушевого ВВП [Foster, Rosenzweig, 2003, p. 601].

Рис. 13. Географическое распределение потенциала выращивания топливной биомассы для пяти стратегий: as, av, nv, nvп, ар (г С/м²/г.)

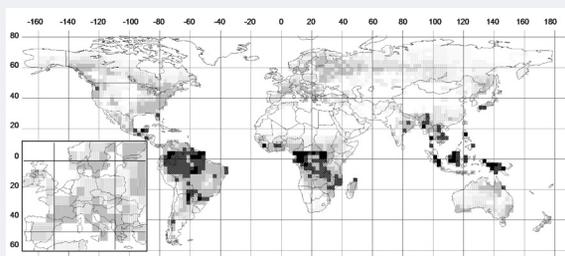
а) Стратегия as (использование сельскохозяйственной биомассы в энергетике)



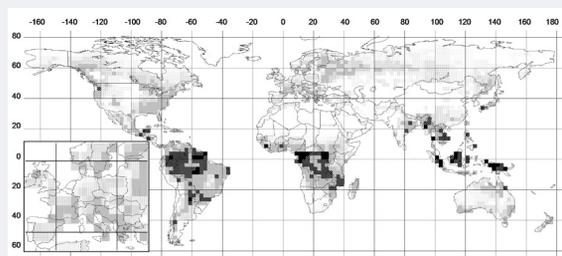
б) Стратегия av («энергетические» плантации на ранее неосвоенных территориях)



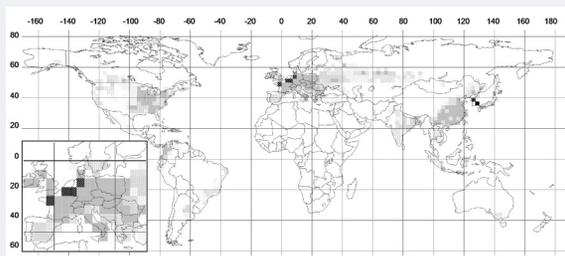
в) Стратегия nv (использование природной биомассы в энергетике по достижении растениями возраста в 5 лет)



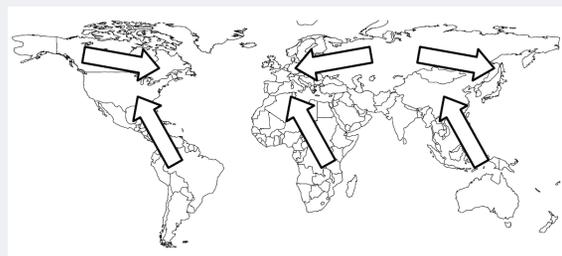
д) Стратегия nvп (использование природной биомассы в энергетике, растения любого возраста = лесное хозяйство)



е) Стратегия ар («энергетические» плантации на бывших сельскохозяйственных землях)



ф) Ожидаемый спрос на топливо из биомассы в транспортном секторе



Легенда для карт (а-е)

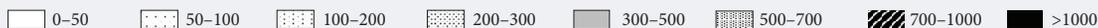


Рис. 14. Глобальные величины энергетического потенциала биомассы и спроса на первичную энергию



Источник: рассчитано автором с использованием модели СЕВМ [Ахамер, 2019]. Потери в ходе конвертации не учитывались.

Картирование временной динамики спроса на энергию

В статье описывается методика формирования базы данных глобальных изменений, позволяющая очертить картину будущего с помощью количественных показателей. Один из наиболее распространенных методов визуализации данных — построение графика с горизонтальной осью, отражающего динамику во времени. Значительно реже по сравнению со «временем» используется другая опция — «уровень экономического развития» (среднедушевой показатель ВВП, GNP/cap) [Garminder, 2018; IPCC, 2002, p. 125]. Это позволяет формировать наглядные графические структуры, к тому же траектория эволюции экономики зависит от ее структуры, которая в свою очередь определяется уровнем экономического развития. На рис. 15 приведен пример подобной «стратегии картирования».

Точность и полноту количественных измерений можно существенно повысить, располагая масштабной гармонизированной базой данных с географической привязкой. Дополнительные преимущества дают инструменты, позволяющие выявить корреляции между массивами данных, а не просто индивидуальными значениями. Наиболее стабильные и существенные связи можно рассматривать как ориентиры на достаточно реалистичной «карте техно-социально-экономической эволюции» (см. «рои» красных линий на рис. 16). Подмножества таких «робастных траекторий» интерпретируются с точки зрения способности поддерживать устойчивое развитие либо, напротив, уводить от него. Классический случай — оценка объемов выбросов CO₂, которая составляет основу нашего подхода.

Рассмотрим методологию графического представления информации, обработанной с применением инструментария «Базы данных о глобальных изменениях» (Global Change Database, GCDB). Исходя из выявленных тенденций развития факторов, определяющих глобальные изменения, можно сопоставить влияние различных аспектов деятельности на динамику концентрации CO₂ и соответственно изменения климата (ср. рис. 16 и выводы работ [Altmann et al., 2013; Öttl et al., 2014]).

Структура и аналитический инструментарий GCDB

База GCDB охватывает свыше 2000 массивов первичных переменных для 100–200 государств (с разбивкой по странам) за несколько десятилетий (преимущественно 1960–1991 гг.). Сведения аккумулируются из авторитетных международных источников:

- Международное энергетическое агентство (МЭА);
- Статистический отдел ООН (UNSTAT);

- Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (Food and Agriculture Organization of the United Nations);
- рейтинги «Индекс человеческого развития» (Human Development Index, HDI) и «Показатели мирового развития» (World Development Indicators, WDI), составляемые, соответственно, ООН и Всемирным банком (рис. 17).

Инструментарий GCDB обеспечивает конвертацию первичных данных (прежде всего экстенсивных переменных) во вторичные (интенсивные, общим числом в несколько тысяч) — индикаторы, показатели интенсивности, темпы изменения и т. п. Корреляции переменных отражены в числовой и графической формах (рис. 18; подробнее см.: [Ahamer, 2013]). Диаграммы составляются отдельно для стран, континентов и 11 регионов мира, учитываемых в работах по экономике энергетики для глобального моделирования [IPCC, 2002; GEA, 2012].

Посредством специального аналитического инструмента GCDB рассчитываются суммы, разности, произведения, коэффициенты и производные любых переменных GCDB по странам и регионам (агрегированные значения), коэффициенты корреляции отдельных данных и динамических рядов за несколько десятилетий. При первичном графическом анализе комбинируются результаты расчетов динамических рядов [Jones, 1995, p. 502; Islam et al., 2003, p. 151]. Кросс-корреляционные вычисления (см., например, [Barro, 1991, 2001]) заключаются в определении уровней, темпов изменений и эффектов насыщения в экономике, энергопотреблении и землепользовании.

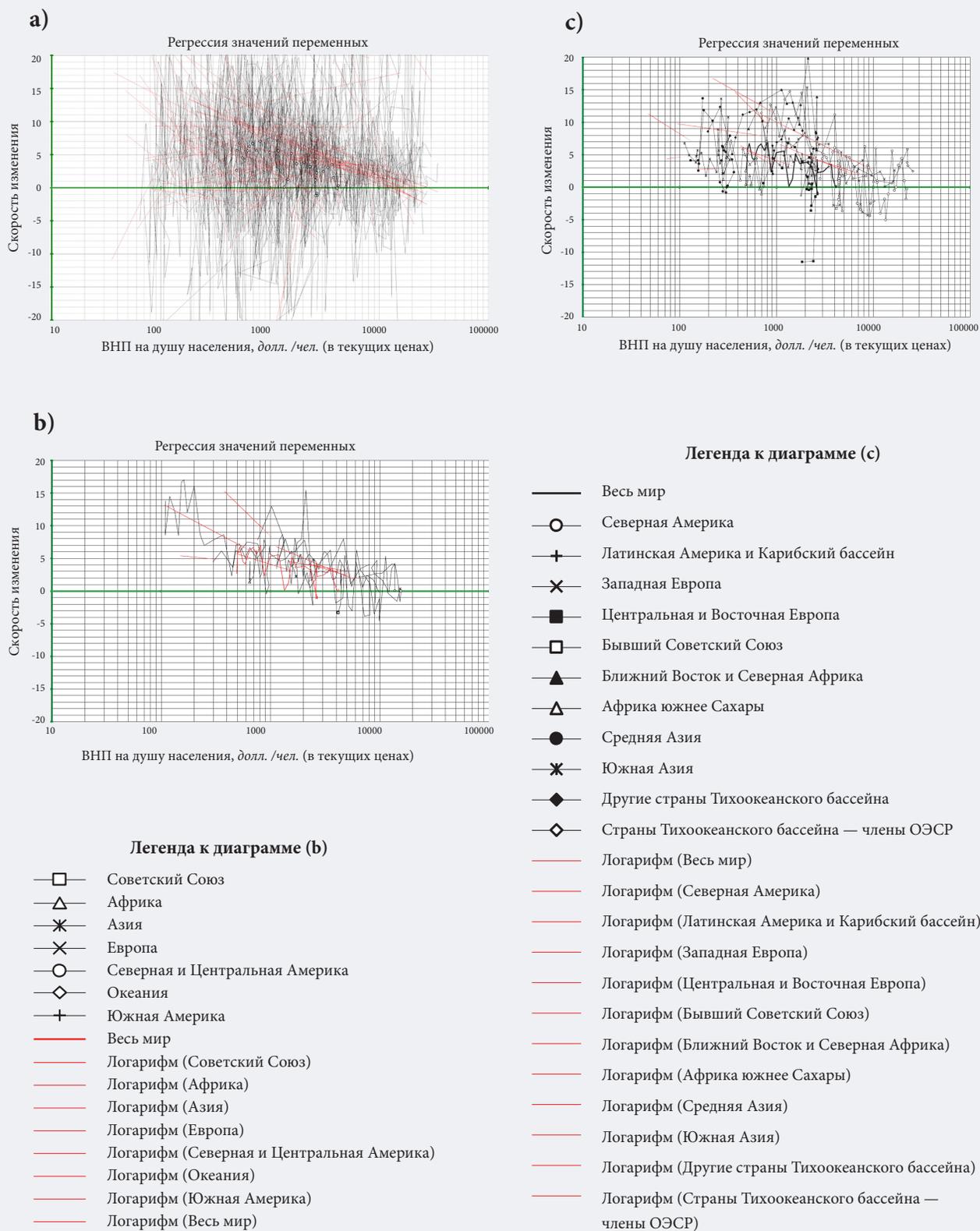
Согласно эмпирическому правилу надежные проекции могут охватывать не более половины периода, за который имеются данные. Это ограничение можно преодолеть, комбинируя рассматриваемую методологию с концепцией «траектории развития», в частности, при оценке роста среднедушевого ВВП. Распределение массивов данных по всем странам вдоль общей траектории (именно этот критерий нуждается в проверке) ведет к тому, что базис для проекции в вероятное будущее расширяется за счет охвата всех стран, от бедных до богатых. Получаемая при этом информационная база гораздо насыщеннее, чем «данные за несколько десятилетий». Применение первых и вторых производных динамических рядов увеличивает возможность статистического анализа.

Изучение статей в 15 журналах по экономике и энергетике с высоким импакт-фактором⁵ выявило стабильные тренды, расширяющие представление о картине эволюционного развития. При этом публикаций о каких-либо аналогах рассматриваемой нами методологии не обнаружилось.

Экономические, промышленные и энергетические структуры определяют характер глобальных перемен,

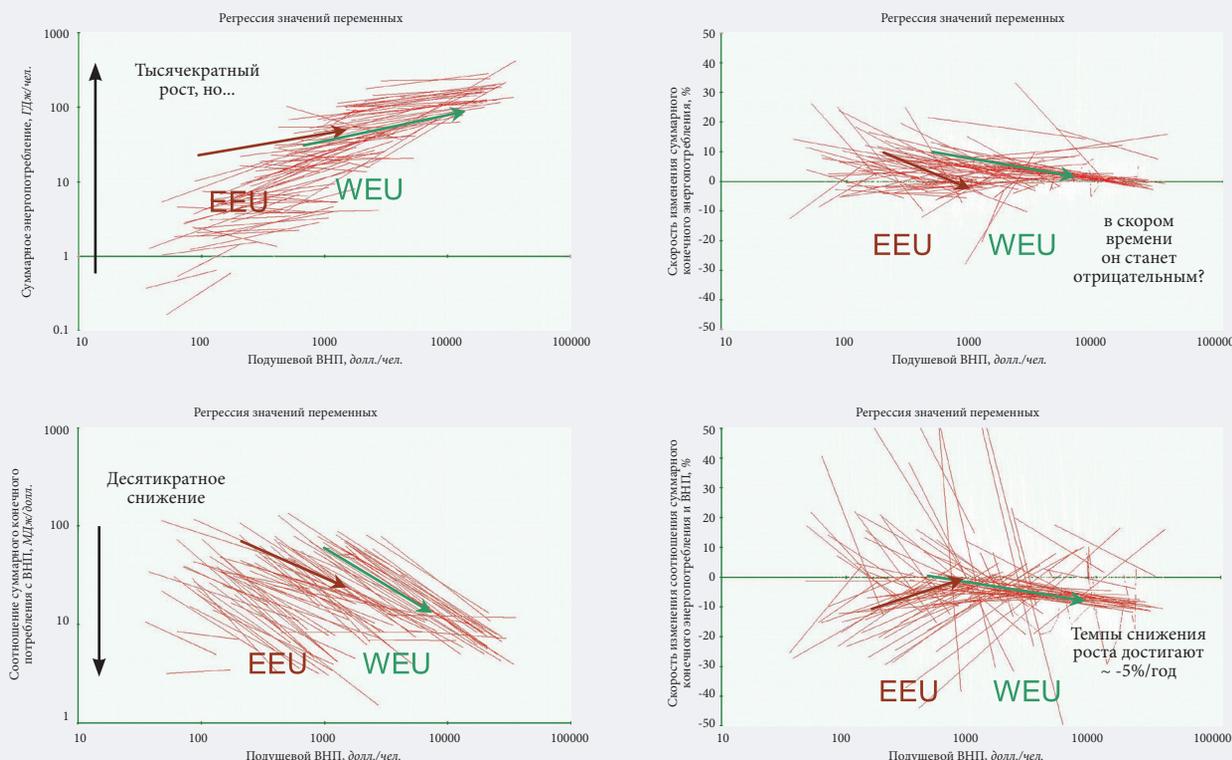
⁵ В частности: *Journal of Economic Literature*, *Quarterly Journal of Economics*, *American Economic Review*, *Ecological Economics*, *Econometrica*, *Economic Policy*, *Economic Geography*, *Economy and Society*, *Energy*, *Energy Economics*, *Journal of Financial Economics*, *Journal of Political Economy*, *NBER Macroeconomic Annals*, *Social Indicators Research*. Подробнее о понятии импакт-фактора см. <http://isiwebofknowledge.com/>.

Рис. 15. Темпы роста конечного спроса на энергию как функция GNP/сар (%)



Примечание: каждый черный граф иллюстрирует динамику по конкретной стране на протяжении примерно трех десятилетий. Для уменьшения волатильности визуализируемой информации вычисляется линия тренда (обозначена красным). Красные линии, таким образом, показывают тренды для конкретных стран (а), континентов (б) и регионов (с).

Рис. 16. Динамика среднедушевого потребления энергии

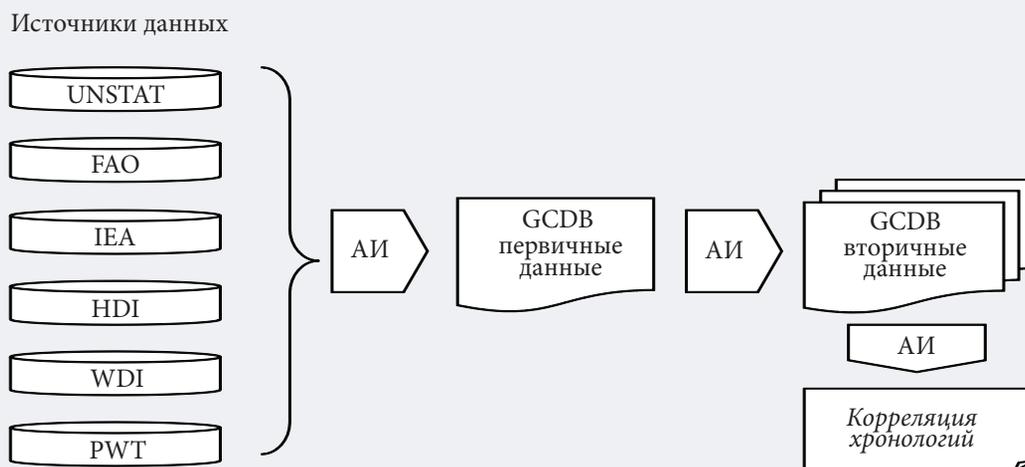


Примечание: глобальный показатель среднедушевого потребления энергии продолжает расти (верхний левый график), однако темпы этого роста снижаются и начинают приближаться к нулю (верхний правый график), если представить их в обобщенном виде для всех стран как функцию уровня экономического развития (среднедушевой показатель ВВП = GDP/cap). Данный тренд свидетельствует о трансформации глобальной энергетической системы. Аналогично, энергопотребление на единицу ВВП (= энергоёмкость) существенно снижается по всему миру (нижний левый график), причем ускоряющимися темпами (нижний правый график).

Условные обозначения: WEU = Западная Европа, EEU = Центральная и Восточная Европа без учета России.

Источник: [Ahamer, 2015].

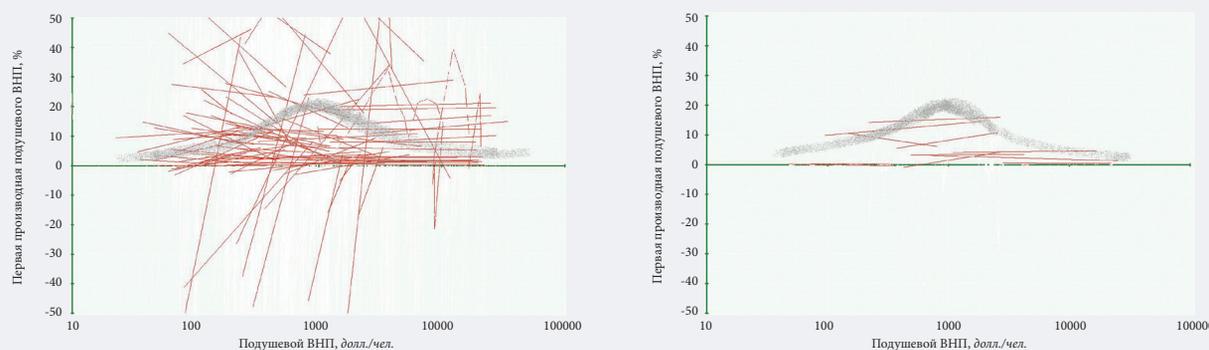
Рис. 17. Схема формирования «Базы данных глобальных изменений» (GCDB)



Примечание: расшифровку аббревиатур для источников данных см. в тексте. Полученные сведения были топографически гармонизированы с помощью аналитического инструмента (AI). На основе математического комбинирования данных AI позволяет получить разнообразные вторичные данные, которые можно коррелировать и представить графически для выявления «траекторий развития», используемых в некоторых трактовках теории роста.

Источник: [Ahamer, 2013].

Рис. 18. Первые попытки формирования пространственно-временных карт



Примечание: относительный рост среднедушевого ВВП (GDP/cap) представлен в среднем за три десятилетия для всех стран (слева) и агрегирован для 11 регионов [Ахамер, 2019]. Серое «напыление» иллюстрирует гипотетические повышенные темпы роста в странах со средним уровнем доходов по сравнению с государствами, характеризуемыми высокой либо низкой величиной этого показателя. Полученные результаты сопоставимы с кривыми роста насыщения и в целом согласуются с выводами работы [Korotayev, Zinkina, 2014].

включая выбросы CO_2 , ведущие к изменению климата [IPCC, 2001, 2014]. В связи с этим они представляют интерес для исследования как объекты количественной оценки.

В настоящее время широко применяется метод проекции современных социально-экономических условий [Ang, Liu, 2000, p. 538]. Однако в результате изменений внутренней структуры глобальной техно-социально-экономической системы возникают отклонения от «привычной» траектории. Параметр «изменение скорости эволюции», позволяющий получить надежную информацию о подобных отклонениях, пока изучен недостаточно.

При таком подходе основным источником знаний выступают характеристики межсубъективно перепроверяемой «реальности», а не «результаты моделирования» (теоретические модели желаемой реальности, построенные в соответствии с теми или иными умоглядными представлениями независимо от предложившей их научной школы)⁶. Следовательно, информация о корреляции или изменении направлений развития исходит из фактических данных (за прошлые десятилетия), а не искусственных результатов моделирования. Читатель вправе интерпретировать эти данные по своему усмотрению.

Методология GCDB включает анализ ключевых позиций в динамических рядах данных по всем странам, текстур, наклонов и изгибов всевозможных кривых с применением новейших статистических методов. В ее основе лежит ранее упомянутая формула для расчета объема выбросов CO_2 , обусловленных производством энергии, базирующаяся на тождестве Кайи [Kaya, 1990; Kaya et al., 1997; Rosa, Dietz, 2012], которая в данном случае дополнена коэффициентом, отражающим разницу между первичным и конечным энергопотреблением⁷:

$$\text{CO}_2 = (\text{CO}_2/E_p) \times (E_p/E_f) \times (E_f/\text{GDP}) \times (\text{GDP/capita}) \times P, \quad (2)$$

где:

- CO_2 — объем выбросов CO_2 ;
- E_p — потребление первичной энергии;
- E_f — конечное потребление энергии;
- GDP — валовой национальный продукт;
- P — численность населения.

Все показатели из правой части формулы (2), за исключением последнего, рассчитываются для конкретного сектора экономики, а первые три — еще и для определенного вида топлива. Для учета выбросов CO_2 , связанных с изменением практики землепользования, была разработана аналогичная структура, в которой вместо параметра «энергия» используется величина «площадь», а вместо «топлив» — «виды культур».

Переменные, характеризующие динамику глобальной эволюционной системы (в основном — функции GDP/cap), представлены в табл. 1, а иерархия индикаторов рассматриваемой методологии — в табл. 2.

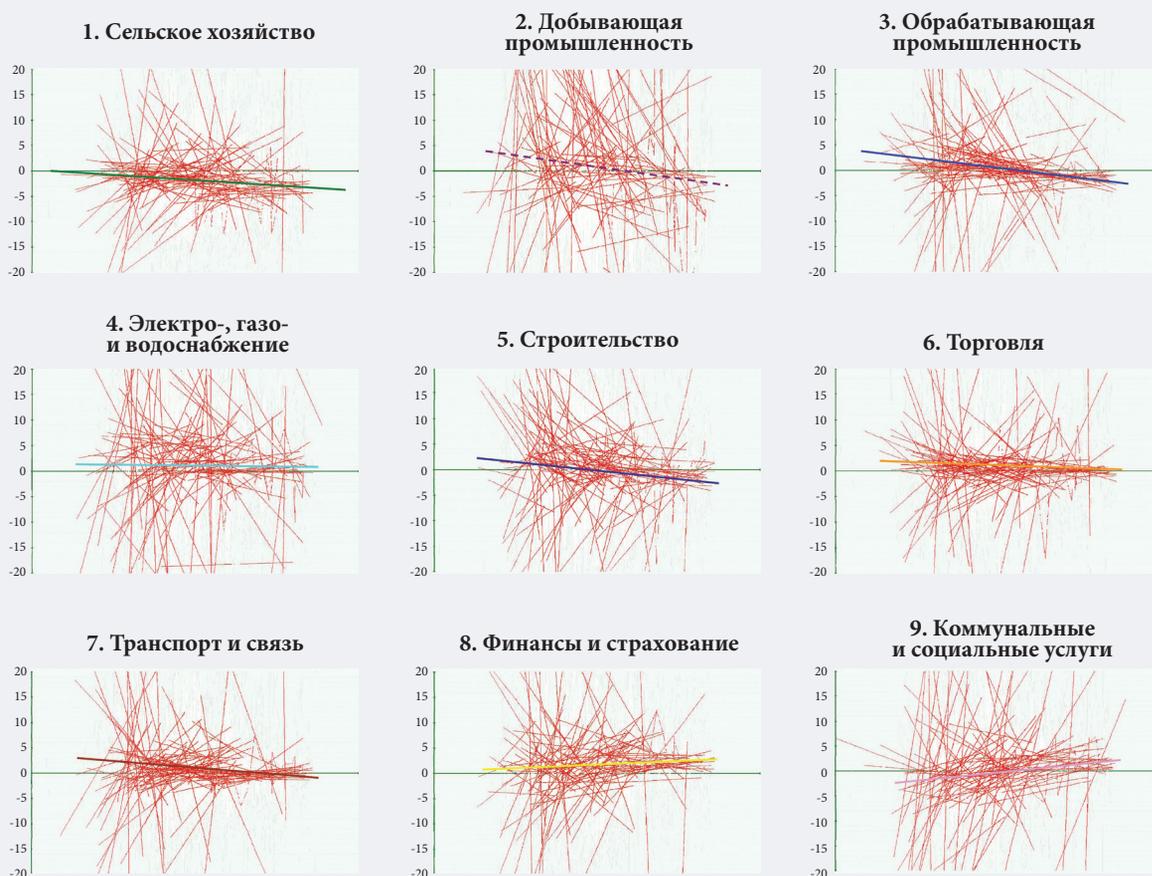
Табл. 1. Переменные, характеризующие динамику глобальной эволюционной системы

Наименование	Описание
Уровни	Обозначены в статье как «вектор состояния» x . Определяются для каждой страны, в формате динамического ряда
Скорость изменений	Первая производная вектора состояния (\dot{x}) (рис. 19). Охватывает уровни насыщения (ситуации, в которых первые производные стремятся к нулю)
Изменение скорости развития	Вторая производная вектора состояния (\ddot{x}). Позволяет точнее выявить насыщения и другие виды нелинейного поведения в страновом, региональном и временном разрезах
Источник: составлено автором.	

⁶ В традициях Галилео Галилея, который предлагал кардиналам «взглянуть на астрономическую реальность в телескоп» и убедиться в правильности его мировоззрения [Galilei, 2002].

⁷ Описание более сложной формы см.: [Ахамер, 2013, p. 373].

Рис. 19. Предварительный анализ темпов роста девяти секторов экономики с помощью GCDB (%)



Условные обозначения: см. рис. 18; диапазон вертикальной оси от -20%/г до +20%/г. Значения выше зеленой линии (ноль) означают рост, ниже нее — падение.

Табл. 2. Категории индикаторов

Категория	Характеризуемый параметр	Примеры	Графическое представление
Экстенсивные	Количество, потоки	Энергия, население, площадь	Рис. 2–7
Интенсивные	Структуры	Коэффициенты, показатели, энергоёмкость	Рис. 8–11
Доли	Состав, структура	Отраслевой ВВП, топливный баланс	Рис. 19

Источник: адаптировано автором на основе [Schipper et al., 2000, p. 4].

Для применения формулы (2) требуется гармонизация отраслевых каталогов (например, статистики МЭА и Системы национальных счетов (System of National Accounts, SNA)). Полученные значения следует интерпретировать осторожно, с учетом имеющегося опыта национальной экологической статистики, прежде всего в отношении транспорта и домохозяйств [Schipper et al., 2000]. С оговорками необходимо трактовать и понятие «секторальная интенсивность» (*sectoral intensity*) — как квазипеременную, характеризующую смещение «акцентов» или «ценностей». Применение

декомпозиции [Schipper et al., 2000, p. 22] позволяет оценить вклад различных факторов в достижение эффектов «декарбонизации» (*decarbonisation effect*), «интенсивности» (*intensity effect*), «рикошета» (*rebound effect*) и иных сдвигов во взаимосвязанных социально-экономических метаструктурах.

Заключение

Как показало наше исследование, методология GCDB является релевантным инструментом для идентификации трендов в глобальной энергетической системе, дающим более полное представление о ее динамическом поведении. Распространение данного инструментария произведет определенные эффекты для науки и общества. Различные подходы к теории развития, зачастую противоречивые, получают здесь дополнительное обоснование. Это позволит трактовать экономические идеологии сквозь мультикультурную призму и разрабатывать соответствующие университетские программы, такие как «Глобалистика» (Global Studies) [Bader et al., 2013, 2014]. Появится дополнительная контекстная информация для разработки, оценки и мониторинга реализации национальных и глобальных мероприятий по защите климата. Поэтапная оценка вклада различных факторов в прирост ВВП обогатит знания в области

«теории роста». Методология GCDB как инструмент разработки сценариев расширит основу для практического междисциплинарного применения концепций науки о системах и теории игр.

Понимание контекста глобальных тенденций и учет траектории развития отдельных стран позволят конкретизировать системный анализ «глобальных изменений». Расширится представление о связях между практичностью декларированных целей по защите климата и реальными возможностями их достижения, повысится эффективность государственной климатической политики. Перечисленные факторы могут способствовать растущему осознанию обществом необходимости направлять технологическое развитие в сторону защиты окружающей среды и минимизации выбросов CO₂.

Представленные в статье результаты могут создать впечатление, что темпы роста глобального энергопотребления в обозримой перспективе должны замедлиться из-за того, что в рамках текущего топливного баланса пик потребления угля, нефти и газа, по-видимому, скоро будет достигнут. Подобный мегатренд угрожает экономике почти всех стран, но в первую очередь бывшим советским республикам, включая Россию, Казахстан и др. Оптимальная стратегия реагирования видится в диверсификации энергоресурсной базы (развитие солнечной и ветряной энергетики, производство энергии из биомассы и др.) [Ermolenko et al., 2017; Proskuryakova, Kovalev, 2015] и оценке ее потенциала с помощью глобальных информационных систем.

Библиография

- Ahamer G. (1994) Influence of an Enhanced Use of Biomass for Energy on the CO₂ Concentration in the Atmosphere // *International Journal of Global Energy Issues*. Vol. 6. № 1/2. P. 112–131.
- Ahamer G. (2012) Geo-Referenceable Model for the Transfer of Radioactive Fallout from Sediments to Plants // *Water, Air, and Soil Pollution*. Vol. 223. № 5. P. 2511–2524. DOI: 10.1007/s11270-011-1044-x.
- Ahamer G. (2013) A Planet-Wide Information System // *Campus-Wide Information Systems*. Vol. 30. № 5. P. 369–378. DOI 10.1108/CWIS-08-2013-0032.
- Ahamer G. (2015) Applying student-generated theories about global change and energy demand // *International Journal of Information and Learning Technology*. Vol. 32. № 5. P. 258–271. DOI 10.1108/IJILT-01-2015-0002.
- Ahamer G. (2019) *Mapping Global Dynamics. From Local Pollution to Global Evolution*. Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer.
- Altmann M., Eisenreich S., Lehner D., Moser S., Neidl T., Rüscher V., Vogeler T. (2013) Global inequality and poverty in perspectives of geography // *Multicultural Education & Technology Journal*. Vol. 7. № 2/3. P. 127–150.
- Ang B.W., Liu F.L. (2000) A new energy decomposition method: Perfect in decomposition and consistent in aggregation // *Energy*. Vol. 26. № 6. P. 537–548.
- Austrian Parliament (2018) *Foresight and Technology Assessment: Monitoring of future themes for the Austrian Parliament*. Vienna: Austrian Parliament. Режим доступа: <https://www.parlament.gv.at/SERV/FTA/>, дата обращения 04.12.2018.
- Bader L., Bereuther T., Deutsch E., Edlinger J., Füreder S., Kaspar E., Köttstorfer M., Mautner C., Rossegger C., Samonig A., Samonig S., Schuster C., Witz G., Zotter V., Ahamer G. (2013) Quality Improvements in Curricula for Global Studies // *Multicultural Education and Technologies Journal*. Vol. 7. № 2/3. P. 113–126. DOI 10.1108/17504971311328035.
- Bader L., Bereuther T., Deutsch E., Edlinger J., Füreder S., Kaspar E., Köttstorfer M., Mautner C., Rossegger C., Samonig A., Samonig S., Schuster C., Witz G., Zotter V., Rozanov A., Ilyin V., Ahamer G. (2014) Multiparadigmatic Humanities: Curricula for Global Studies // *International Journal of Humanities and Social Science*. Vol. 4. № 6. Part 1. P. 314–337.
- Barro R.J. (1991) Economic Growth in a Cross Section of Countries // *Quarterly Journal of Economics*. Vol. 106. № 2. P. 407–443.
- Barro R.J. (1999) Ramsey Meets Laibson in the Neoclassical Growth Model // *Quarterly Journal of Economics*. Vol. 114. № 4. P. 1125–1152.
- Barro R.J. (2001) Human Capital and Growth // *American Economic Review*. Vol. 91. № 5. P. 12–17.
- Basu S., Weil D.N. (1998) Appropriate Technology and Growth // *Quarterly Journal of Economics*. Vol. 113. № 4. P. 1025–1054.
- Bentley L.D., Dittman K.C., Whitten J.L. (2004) *System analysis and design methods*. Boston, MA: McGraw-Hill, Irwin.
- Bergh J.C.J.M., Stagl S. (2003), Coevolution of economic behaviour and institutions — towards a theory of institutional change // *Journal of Evolutionary Economics*. Vol. 13. № 3. P. 289–317.
- BMBF (2012) *Mit Foresight in die Zukunft schauen*. Berlin: BMBF. Режим доступа <https://www.bmbf.de/de/mit-foresight-in-die-zukunft-schauen-930.html>, дата обращения 04.12.2018.
- Cambridge (2018) *Foresight in the Cambridge Dictionary*. Режим доступа <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/foresight>, дата обращения 04.12.2018.
- Chan S. (2001) *Complex Adaptive Systems*. Paper presented at the ESD.83 R Research Seminar in Engineering Systems, October 31 – November 6, 2001. Режим доступа: <http://web.mit.edu/esd.83/www/notebook/Complex%20Adaptive%20Systems.pdf>, дата обращения 04.12.2018.
- Chow G.C. (1993) Capital Formation and Economic Growth in China // *Quarterly Journal of Economics*. Vol. 108. № 3. P. 809–842.
- Dave B. (2008) *Kazakhstan // Nations in Transit*. Lanham, MD: Freedom House. P. 281–302.
- De Long J.B., Summers L.H. (1991) Equipment Investment and Economic Growth // *Quarterly Journal of Economics*. Vol. 106. № 2. P. 445–502.
- Devereux M.B., Lapham B.J. (1994) The Stability of Economic Integration and Endogenous Growth // *Quarterly Journal of Economics*. Vol. 109. № 1. P. 299–305.

- Drexler E. (1986) *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*. New York: Anchor Books.
- Ermolenko G.V., Ermolenko B.V., Proskuryakova L., Fetisova Y. (2017) Wind and solar PV technical potentials: Measurement methodology and assessments for Russia // *Energy*. Vol. 137. P. 1001–1012.
- Foresight Automotive (2018) Implementing innovations & adding economic value: Interdisciplinary exchange and fruitful networking. Режим доступа: <https://foresight-automotive.com/ziele/?lang=en>, дата обращения 04.12.2018.
- Foresight Group (2018) Vision & Values. Режим доступа: <https://www.foresightgroup.eu/>, дата обращения 04.12.2018.
- Foresight Institute (2018) Advancing beneficial technology. Режим доступа: <https://foresight.org/#>, дата обращения 04.12.2018.
- Foster A.D., Rosenzweig M.R. (2003) Economic Growth and Rise of Forests // *Quarterly Journal of Economics*. Vol. 118. № 1. P. 601–637.
- Futurezone (2013) Foresight: Den Zukünften auf der Spur. Режим доступа: <https://futurezone.at/science/foresight-den-zukuenften-auf-der-spur/24.590.988>, дата обращения 04.12.2018.
- Galilei G. (2002) *Sidereus Nuncius* (News about new stars) (reprinted by H. Blumenberg). Frankfurt: Suhrkamp.
- Garminder (2018) Statistical tools. Режим доступа: <https://www.garminder.org/tools/>, дата обращения 04.12.2018.
- GEA (2012) *Global Energy Assessment — Toward a Sustainable Future*. Cambridge (UK) and New York: Cambridge University Press; Laxenburg (AT): International Institute for Applied Systems Analysis.
- Grossman G.M., Krueger A.B. (1995) Economic Growth and the Environment // *Quarterly Journal of Economics*. Vol. 110. № 2. P. 353–377.
- Gürgen E., Snoek H., Craig J., McHugh J., Izvorski I., van Rooden J. (2009) Economic Reforms in Kazakhstan, Kyrgyz Republic, Tajikistan, Turkmenistan, and Uzbekistan. Occasional Paper № 183. Washington, D.C.: International Monetary Fund. Режим доступа: <http://www.imf.org/external/pubs/nft/op/183/index.htm>, дата обращения 11.06.2018.
- Hanusch H. (ed.) (1988) *Evolutionary Economics: Applications of Schumpeter's Ideas*. Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press.
- Heylighen F. (1996) The Growth of Structural and Functional Complexity during Evolution // *The Evolution of Complexity / Eds. F. Heylighen, D. Aerts*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. Режим доступа <http://pespmc1.vub.ac.be/Papers/ComplexityGrowth.html>, дата обращения 04.12.2018.
- Hiltunen E. (2006) Was It a Wild Card or Just Our Blindness to Gradual Change? // *Journal of Futures Studies*. Vol. 11. № 2. P. 61–74.
- Horx M. (2018) Zukunftsinstitut and Publications. Режим доступа: <https://www.horx.com/>, дата обращения 04.12.2018.
- PIASA, WEC (1998) *Global Energy Perspectives in 1998*. London: World Energy Council; Laxenburg (AT): International Institute for Applied Systems Analysis.
- IMF (2009) Republic of Kazakhstan — Concluding Statement of the IMF Mission, January 16, 2009. Washington, D.C.: International Monetary Fund. Режим доступа: <http://www.imf.org/external/np/ms/2009/011609.htm>, дата обращения 11.06.2018.
- IPCC (2001) *Climate Change 2001. Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*. Cambridge (UK), New York: Cambridge University Press.
- IPCC (2002) *Special Report on Emissions Scenarios (SRES)*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. Режим доступа: www.ipcc.ch/pdf/special-reports/spm/sres-en.pdf, дата обращения 11.06.2018.
- IPCC (2014) *The Fifth Assessment Report*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Islam S.M.N., Munasinghe M., Clarke M. (2003) Making long-term economic growth more sustainable: Evaluating the costs and benefits // *Ecological Economics*. Vol. 47. № 2–3. P. 150–166.
- Jones C.I. (1995) Time Series Tests of Endogenous Growth Models // *Quarterly Journal of Economics*. Vol. 110. № 2. P. 495–525.
- Jones C.I., Williams J.C. (1998) Measuring the Social Return to R&D // *Quarterly Journal of Economics*. Vol. 113. № 4. P. 1119–1135.
- Knizhnikov A. (2018) WWF Rating 2018: Results, Progresses, Challenges regarding environmental responsibility in the Russian oil & gas industry. Paper presented at the Ecological Responsibility in Russia's Energy Sector Workshop, 5th December 2018, Berlin.
- Korotayev A., Zinkina J. (2014) On the structure of the present-day convergence // *Campus-Wide Information Systems*. Vol. 31. № 2/3. P. 139–152.
- Landes D.S. (2000) *The Wealth and Poverty of Nations: Why Some Are So Rich and Some So Poor*. New York: W.W. Norton.
- Lovelock J. (1988) *The Ages of Gaia. A Biography of Our Living Earth*. New York, London: W. W. Norton & Co.
- Meadows D.H., Randers J.; Meadows D.L., Behrens W.W. (1972) *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books.
- Mehrabanfar E. (2014) Wild Cards Applications in Futures Studies // *International Journal of Modern Management & Foresight*. Vol. 1. № 8. P. 212–218.
- Nikolova B. (2017) The wild card event: Discursive, epistemic and practical aspects of uncertainty being 'tamed' // *Time & Society*. Vol. 26. № 1. P. 52–69. DOI: 10.1177/0961463X15577283.
- Ofer G. (1987) Soviet Economic Growth // *Journal of Economic Literature*. Vol. 25. № 4. P. 1767–1833.
- Öttl U.F.J., Pichler B., Schultze-Naumburg J., Wadispointner S. (2014) Integration policies in Europe — A web-based search for consensus // *Campus-Wide Information Systems*. Vol. 31. № 2/3. P. 121–138.
- Proskuryakova L., Kovalev A. (2015) Measuring energy efficiency: Is energy intensity a good evidence base? // *Applied Energy*. № 138. P. 450–459. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.10.060.
- Rivera L.A., Romer P.M. (1991) Economic Integration and Endogenous Growth // *Quarterly Journal of Economics*. Vol. 106. № 2. P. 531–555.
- Rivera L.A., Romer P.M. (1994) Economic Integration and Endogenous Growth – An Addendum // *Quarterly Journal of Economics*. Vol. 109. № 1. P. 307–308.

- Rosa E.A., Dietz T. (2012) Human drivers of national greenhouse-gas emissions // *Nature Climate Change*. Vol. 2. P. 581–586. DOI:10.1038/nclimate1506.
- Schipper L., Unander F., Marie-Lilliu C. (2000) *The IEA Energy Indicators: Understanding the Energy-Emissions Link*. Paris: International Energy Agency. Режим доступа: http://s3.amazonaws.com/zanran_storage/www.iea.org/ContentPages/26167538.pdf, дата обращения 06.07.2018.
- Schmitz A. (2003) *Elitenwandel und politische Dynamik in Kasachstan (SWP-Studie 39/2003)*. Berlin: Die Stiftung Wissenschaft und Politik (SWP). Режим доступа: http://www.swp-berlin.org/common/get_document.php?asset_id=179, дата обращения 06.07.2018.
- Schmitz A. (2009) *Kasachstan: neue Führungsmacht im postsowjetischen Raum? (SWP-Studie 2009/S07)*, Berlin: Deutsches Institut für Internationale Politik und Sicherheit. Режим доступа: https://www.swp-berlin.org/fileadmin/contents/products/studien/2009_S07_smz_ks.pdf, дата обращения 06.07.2018.
- Steinmüller K. (2012) *Wild Cards, Schwache Signale und Web-Seismographen // Focus Jahrbuch 2012 / Ed. W.J. Koschnick*. P. 1–26. ISBN 9783981088793.
- Sterman J. (2000) *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. New York: McGraw Hill.
- Vester F., von Hesler A. (1980) *Sensitivitätsmodell*. Frankfurt-am-Main: Regionale Planungsgemeinschaft Untermain.
- Walsh C.L., Glendinning S., Castán-Broto V., Dewberry E., Powell M. (2015) Are wildcard events on infrastructure systems opportunities for transformational change? // *Futures*. Vol. 67. P. 1–10. Режим доступа: <https://doi.org/10.1016/j.futures.2015.01.005>, дата обращения 04.12.2018.
- WEC (2003) *Drivers of the Energy Scene*. London: World Energy Council. Режим доступа: <http://www.worldenergy.org/publications/315.asp>, дата обращения 06.07.2018.
- WNA (2018) *Uranium and Nuclear Power in Kazakhstan*. London: World Nuclear Association. Режим доступа: <http://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-g-n/kazakhstan.aspx>, дата обращения 06.11.2018.
- Z_Punkt (1986) *Was wir für Sie tun können*. Режим доступа: <http://www.z-punkt.de/de/profil>, дата обращения 04.12.2018.

Перспективы развития возобновляемой энергетики в Великобритании, Турции и Нигерии

Нуркан Килинч-Ата

Исследователь-постдокторант и проектный аналитик, nurcankilinc@yahoo.com

Университет Стирлинга (University of Stirling), Великобритания, Stirling FK9 4LA, UK

Аннотация

Связь потребления возобновляемой энергии с экономическим ростом — актуальный предмет исследований, однако выводы о ее характере и направленности неоднозначны. В статье на репрезентативной выборке стран — Великобритании, Турции и Нигерии — анализируется влияние темпов экономического прогресса и стоимости электричества на распространение возобновляемой энергетики, составлен прогноз ее развития до 2030 г.

В долгосрочной перспективе интенсивность пользования возобновляемыми энергоресурсами будет определяться уровнем доходов населения и ценами на электроэнергию. Решающую роль в этом процессе сыграют политические инициативы, направленные на формирование новых энергетических рынков и регулирующих стандартов. Их эффектами станут не только укрепление энергетической и экологической безопасности, но и стабильный экономический рост.

Ключевые слова: возобновляемая энергия; энергопотребление; экономический рост; прогнозирование; векторная авторегрессия; международные сопоставления; Великобритания; Турция; Нигерия

Цитирование: Kilinc-Ata N. (2018) Assessing the Future of Renewable Energy Consumption for United Kingdom, Turkey and Nigeria. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no 4, pp. 62–77. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.62.77

Связь энергопотребления и темпов экономического роста широко освещена в научной литературе. Уровень запасов и ценовая доступность энергоресурсов во многом определяют текущее состояние и перспективы развития экономики, качество жизни. Однако вклад потребления энергии из возобновляемых источников (*renewable energy*, далее — возобновляемой энергии, ВЭ) в экономический рост недостаточно изучен. В зависимости от уровня экономического развития стран правительства стимулируют развитие возобновляемой энергетики, руководствуясь разными соображениями, главное из которых — повышение качества жизни. Развитые страны стремятся укрепить энергетическую безопасность и противостоять изменению климата [Edenhofer et al., 2013; Hocaoglu, Karanfil, 2013; Johnstone et al., 2010], а развивающиеся и слабо-развитые — модернизировать энергетический сектор, обеспечить стабильное энергоснабжение и экономический рост [Kaygusuz et al., 2007; REN21, 2018]. Так, в Африке распространение возобновляемой энергетики позволило бы улучшить энергоснабжение сельских районов, повысить уровень жизни и ускорить экономическое развитие [Inglesi-Lotz, 2013].

Основной исследовательский вопрос нашей статьи — каким образом межстрановые различия влияют на взаимосвязь между потреблением ВЭ и экономической динамикой. Ответить на него поможет сравнительный анализ ситуации в государствах, существенно различающихся по уровню развития экономики, запасам энергоресурсов и политике в отношении возобновляемой энергетики. Великобритания, Турция и Нигерия соответствуют указанным критериям, и по ним имеются необходимые данные. Основные характеристики сравниваемых стран приведены в табл. 1.

Многочисленные исследования выявили положительную корреляцию между совокупным потреблением энергии и темпами экономического роста [Payne, 2010; Halicioglu, 2009; Bowden, Payne, 2010; Huang et al., 2008], в том числе для Великобритании [Humphrey, Stanislaw, 1979; Lee, Chien, 2010], Турции [Ocal, Aslan, 2013] и Нигерии [Ighodaro, 2010; Akinlo, 2009]. Однако лишь немногие авторы фокусировались на роли, которую играет в этом процессе возобновляемая энергетика [Apergis, Payne, 2010, 2014; Menyah, Wolde-Rufael, 2010; Sadorsky, 2009a], а для Великобритании, Турции и Нигерии подобные исследования не проводились вовсе.

В статье с применением уникального подхода изучается зависимость между уровнем потребления ВЭ и экономическим развитием представленных стран, охарактеризованы местные рынки и производство электроэнергии из возобновляемых источников. Для анализа взаимосвязей интенсивности потребления ВЭ с доходами и ценами на электричество использовалась стандартная модель векторной авторегрессии (ВАР). На основе выявленного динамического взаимодействия указанных переменных разработан прогноз экономического роста и темпов потребления ВЭ на период до 2030 г. Установлено, что изменение первого показателя существенно влияет на динамику второго. К аналогичным результатам ранее пришли другие ис-

следователи [Apergis, Payne, 2010; 2014; Menegaki, 2011; Sadorsky, 2009a, 2011], однако они использовали метод панельной ВАР, ограничиваясь определением связи между потреблением ВЭ и другими переменными, в частности уровнем выбросов двуокиси углерода (CO₂), ценами на нефть и валовым внутренним продуктом (ВВП). Изучение репрезентативной выборки государств с опорой на более свежие данные в сравнении с использованными в работах [Menegaki, 2011; Ohler, Fetters, 2014] дало нам возможность прийти к качественно новым выводам о том, как распространение ВЭ соотносится с общими темпами экономического роста. Насколько известно, ранее не предпринималось попыток применить выбранный подход, методы анализа, набор переменных и столь длительный период наблюдения к указанной группе стран.

Обзор литературы

Модель ВАР неоднократно служила инструментом для анализа связи потребления ВЭ с факторами, характеризующими экономическое развитие [Apergis, Payne, 2010, 2014; Menegaki, 2011; Sadorsky, 2009a, 2011; Ohler, Fetters, 2014]. С ее помощью изучена зависимость между масштабами использования ВЭ, уровнем доходов, ценами на нефть и ее потреблением в 1980–2008 гг. [Sadorsky, 2011]. Установлено, что рост благосостояния населения способствует увеличению потребления ВЭ.

Исследование для стран G7, охватившее период с 1980 по 2005 г., основанное на панельных тестах на единичные корни и коинтеграцию, констатировало, что значимый вклад в нарастание потребления ВЭ в долгосрочной перспективе вносят рост доходов и объемы выбросов CO₂ [Sadorsky, 2009a].

Структурированная модель ВАР применялась также для оценки влияния увеличивающейся доли возобновляемых источников электроэнергии на темпы экономического роста и динамику объема выбросов в Дании, Португалии, Испании и США в 1960–2004 гг. [Silva et al., 2012]. Показано, что интенсификация потребления ВЭ привела к увеличению среднедушевых показателей ВВП и уменьшению эмиссии CO₂.

Изучение зависимости между потреблением ВЭ и различными макроэкономическими переменными (уровень доходов, цены на нефть, основные фонды, трудовые ресурсы) на национальном и региональном уровнях [Sadorsky, 2009b, 2011; Salim, Rafiq, 2012; Vaona, 2012] позволило заключить, что увеличение доходов положительно связано с ростом потребления ВЭ. Этот вывод носит интуитивный характер, так как подобные энергоресурсы обычно дороже традиционных, и их использование требует немалых затрат.

На основе панельной ВАР разработаны эмпирические модели, описывающие связь потребления ВЭ с динамикой уровня доходов в 18 развивающихся странах в 1994–2003 гг. [Sadorsky, 2009b]. Доказано положительное влияние роста доходов на уровень потребления энергии из возобновляемых источников, который в основном зависит от цен на такие носители, а не от совокупного спроса на электричество.

Табл. 1. Основные характеристики сравниваемых стран

Характеристики	Великобритания	Турция	Нигерия
Экономический статус	Развитая	Развивающаяся	Слаборазвитая
Географическое положение (регион мира)	Европа	Азия	Африка
Площадь (км ²)	242 495	783 562	923 768
Климат	Умеренный морской (мягкий; зимой температура не опускается существенно ниже 0°C, а летом не поднимается выше 32°C)	Жаркий средиземноморский (жаркое сухое лето и мягкая или прохладная, дождливая зима)	Тропический
Прирост ВВП в 2013 г. (%)	1.9	3.6	7.7
Прирост потребления ВЭ (%)*	19	19.3	1.97
Планируемая доля выработки электроэнергии из возобновляемых источников	20% к 2020 г.	30% к 2030 г.	10% к 2025 г.

Примечание: * — для Великобритании — данные за 2011 г., для Турции и Нигерии — за 2012 г. Для сравнения: среднемировой показатель потребления энергии из возобновляемых источников в течение первого десятилетия XXI в. увеличился на 4.4%.

Источник: составлено автором по материалам [IRENA, 2018a; World Bank, 2013; Pao, Fu, 2013; Ward, Inderwildi, 2013; Melikoglu, 2013; Yusuf, 2014].

В работе [Apergis, Payne, 2010] методом панельной VAR изучена зависимость между потреблением ВЭ и экономическим ростом в 20 странах ОЭСР в период с 1985 по 2005 г. Использовалась агрегированная производственная функция, описывающая связь между производительностью, трудовыми ресурсами, капиталом и потреблением ВЭ. Доказана взаимозависимость потребления ВЭ и экономического роста в кратко- и долгосрочной перспективе.

Связь потребления ВЭ с уровнем доходов и объемом выбросов загрязняющих веществ установлена в ходе анализа панельных данных и динамических рядов за 1980–2006 гг. по шести развивающимся странам: Бразилии, Китаю, Индии, Индонезии, Филиппинам и Турции [Salim, Rafiq, 2012]. В качестве детерминант потребления ВЭ рассматривались доходы, выбросы загрязняющих веществ и цены на нефть. Это позволяет предположить, что в долгосрочной перспективе уровень потребления ВЭ в значительной степени определяется доходами, тогда как негативное влияние цен на нефть на использование ВЭ в упомянутых государствах играет меньшую роль.

Анализ данных за 1990–2008 гг. для 20 стран ОЭСР выявил краткосрочную двустороннюю связь между совокупной генерацией электроэнергии из возобновляемых источников и объемом ВВП [Ohler, Fetters, 2014]. Изучение ситуации в странах Центральной Америки в 1980–2006 гг. с помощью панельной VAR показало, что потребление ВЭ¹ и экономический рост в долгосрочной перспективе взаимозависимы [Apergis, Payne, 2014].

Мнения исследователей в отношении зависимости между потреблением ВЭ и темпами экономического роста разделились: одни считают ее обоюдонаправленной, другие — односторонней. Тест Грейнджера на причинность (Granger Causality Test) [Granger, 1980] позволил выявить однонаправленную связь для Италии [Vaona, 2012]². В случае с США установлена аналогичная поло-

жительная зависимость объема ВВП от интенсивности использования биомассы [Payne, 2011].

Анализ потребления ВЭ, уровней выбросов CO₂, использования атомной энергии и динамики реального ВВП в США за 1960–2007 гг., проведенный на основе модели VAR, констатировал одностороннюю причинно-следственную связь между использованием атомной энергии и уровнем выбросов CO₂, а также объемом ВВП и уровнем потребления ВЭ, тогда как связи генерации ВЭ с эмиссией углекислого газа выявлено не было [Menyah, Wolde-Rufael, 2010]. Применение панельной VAR в исследовании по 27 европейским странам за 1997–2007 гг. указало на отсутствие связи между потреблением ВЭ и величиной ВВП [Menegaki, 2011].

На основании литературного обзора можно констатировать высокий интерес к изучению причинно-следственной зависимости между потреблением ВЭ и экономическим прогрессом. Тем не менее выводы в отношении ее направленности пока неоднозначны. К тому же при разработке прогнозных моделей необходимо учитывать данные за последние три года, на которые пришелся существенный рост потребления ВЭ.

Исходные данные и методология

Данные

Основой для нашего исследования послужила ежегодная статистика потребления ВЭ (gen), цен на электроэнергию (ep) и уровня доходов (gdp) для Великобритании, Турции и Нигерии за 1990–2012 гг. Источники данных приведены в табл. 2.

Данные о *потреблении ВЭ* (в млрд кВт/ч) получены из базы IEA. Под возобновляемой энергетикой понимается генерация электричества с применением энергии ветра, солнца, геотермальных источников, биомассы, приливов и отливов, гидроэнергии. В основе расчетов лежали цены на электроэнергию, а не на нефть (самый

¹ Потребление ВЭ определено как совокупный объем потребления электроэнергии из возобновляемых источников (млн кВт/ч).

² Исследовалась динамика уровня потребления ВЭ и реального объема ВВП за период 1861–2000 гг., с годовой периодичностью.

Табл. 2. Источники информации

Организация	Английское наименование	Ссылка
Всемирный банк	World Bank	[World Bank, 2013]
Международное энергетическое агентство (МЭА)	International Energy Agency (IEA)	https://www.iea.org/energyaccess/database/
Турецкий статистический институт	Turkish Statistical Institute (TUIK)	http://www.turkstat.gov.tr/
Центр энергетических исследований Великобритании	United Kingdom Energy Research Centre (UKERC)	http://www.ukerc.ac.uk/
Международное агентство по возобновляемым источникам энергии	International Renewable Energy Agency (IRENA)	[IRENA, 2018b]
Управление международной энергетической информации США	US International Energy Statistics (EIA)	https://www.eia.gov/outlooks/ieo/

Источник: составлено автором.

дорогой источник энергии), поскольку этот показатель тесно связан с использованием возобновляемых энергоресурсов и играет важную роль в энергетическом балансе большинства государств [Silva et al., 2012].

Показатели *среднедушевого ВВП* (в долларах США), измеряемые Всемирным банком, характеризуют уровень экономического благосостояния государств. Мы опираемся на среднедушевые показатели, поскольку они обеспечивают более корректное и объективное сопоставление стран с различной численностью населения [Aqeel, Butt, 2001]. По ключевому индикатору экономического роста — ВВП — косвенно оценивается уровень доходов [Marques, Fuinhas, 2011; Sadorsky, 2009a]. Экономический рост в литературе по данной тематике определяется в терминах объема ВВП (реального или среднедушевого) либо темпов его прироста. Исследования характеризуются вариативностью применяемых эконометрических методологий, данных по странам и периодам времени [Apergis, Payne, 2010; Bretschenger, 2010; Bruns, Gross, 2013; Chiou-Wei et al., 2008; Gross, 2012; Payne, Taylor, 2010]. Так, причинная связь Грейнджера между потреблением энергии и величиной реального ВВП не обнаружена [Payne, Taylor, 2010; Menyah, Wolde-Rufael, 2010; Chiou-Wei et al., 2008], однако между двумя упомянутыми показателями выявлено долгосрочное равновесие [Apergis, Payne, 2010; Belke et al., 2011; Mohammadi, Parvaresh, 2014].

Значения *переменной цена на электроэнергию* извлечены из баз данных TUIK, UKERC и Всемирного банка. При расчете индекса текущих цен на топливо в качестве базовой использовалась величина за 2005 г. Учет цен на электричество обеспечил дополнительный «канал» причинной связи. Хотя во многих предшествующих исследованиях эта переменная не применялась (например, [Yildirim et al., 2012]), в нашей работе она служит косвенным показателем, поскольку стоимость электричества влияет на потребление энергии и экономический рост. Рост цен сигнализирует о предстоящем падении спроса на энергию и, как следствие, снижении энергопотребления [Odhiambo, 2010]. Иными словами, потребность в энергии иллюстрирует общий уровень ее использования, а энергопотребление показывает объем, реально задействованный в течение определенного времени.

На протяжении исследуемого периода в Великобритании и Турции потребление ВЭ росло, тогда как

в Нигерии оставалось стабильным (рис. 1а). Во всех трех государствах отмечено увеличение среднедушевого ВВП (рис. 1b) и цен на электроэнергию (рис. 1c). Рис. 1 иллюстрирует разнородную динамику страновых данных. Например, на рис. 1b рост является скорее квадратичным, чем линейным, а из рис. 1c видно, что в Великобритании в определенный период цены на электроэнергию снижались.

Выбранные переменные обеспечили сопоставимость с данными, собранными в ходе предыдущих исследований. Поэтому новейшие сведения, используемые в статье, вполне можно сравнивать с информацией за предшествующие периоды.

Методология

Применяя стандартную методологию ВАР, мы изучили зависимости между потреблением ВЭ, уровнем доходов и ценами на электроэнергию. На основе выявленной динамики их взаимодействия составлен прогноз связи потребления ВЭ с экономическим ростом на период до 2030 г. Подход выбран ввиду отсутствия необходимости «назначать» те или иные переменные зависимыми или объясняющими, поскольку в модели ВАР все компоненты считаются эндогенными, т. е. отражающими реальную взаимосвязь. Такая модель обеспечивает оптимальную структуру для анализа данных, способную выявить и учесть их сложные динамические характеристики [Sadorsky, 2011; Taylor, 2010], позволяет прогнозировать эффекты политических инициатив и радикальных экономических перемен [Tiwari, 2011]. В отличие от векторной модели исправления ошибок, ВАР идеально подходит для выполнения теста Грейнджера на причинность и анализа макроэкономической реакции стран на динамику потребления ВЭ. Сфера ее применения не ограничивается расчетами интегрированных динамических рядов, отсутствует требование приводить все данные к одному порядку [Giles, 2011].

Стандартная модель ВАР выглядит следующим образом:

$$Y_t = \Gamma(L)Y_{t-1} + \varepsilon_t, \quad (1)$$

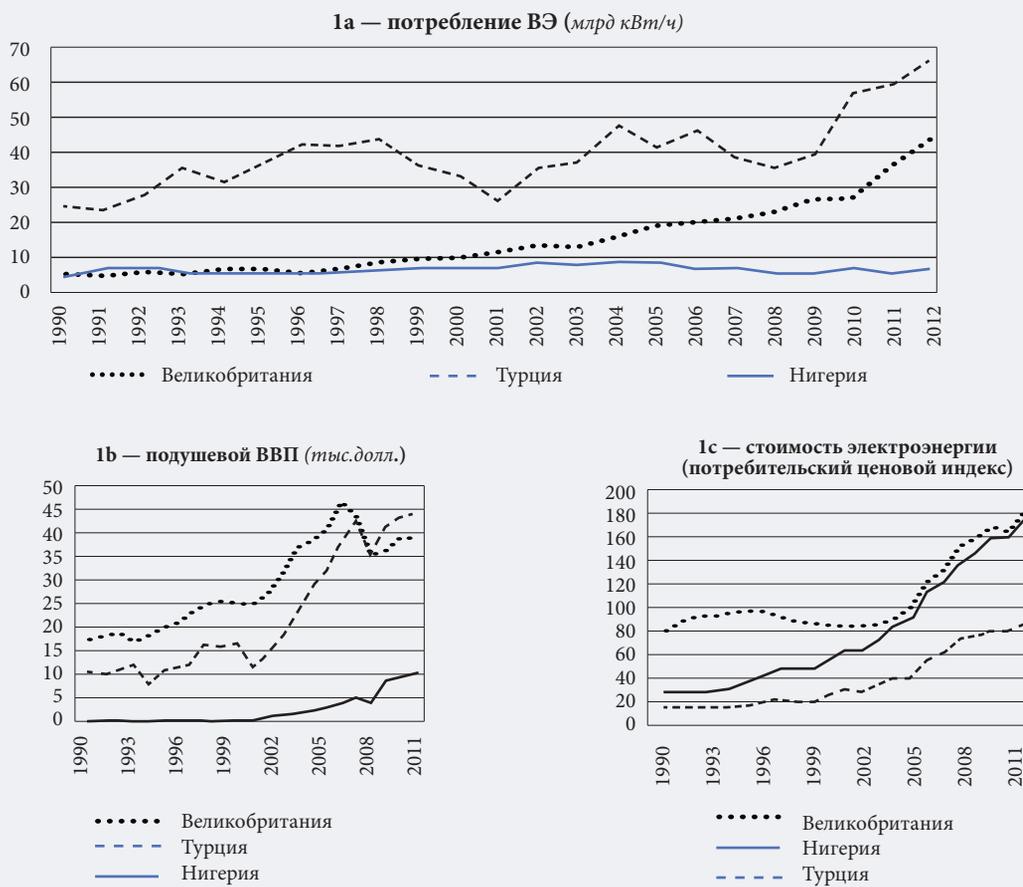
где: Y_t — вектор стационарных переменных $\{\Delta REN, \Delta GDP, \Delta EP\}$;

ΔREN — первая разница в потреблении ВЭ;

ΔGDP — среднедушевой экономический рост;

ΔEP — изменение цен на электроэнергию;

Рис. 1. Динамика показателей



Источник: расчеты автора.

ϵ_t — вектор ошибок;

$\Gamma(L)$ — лаговый оператор, который рассчитывается по формуле:

$$\Gamma(L) = \Gamma_1 L^1 + \Gamma_2 L^2 + \dots + \Gamma_p L^p. \quad (2)$$

Модель также предусматривает возможность использования остаточных членов и шоковых импульсов для расчета функций импульсной характеристики (*impulse response function, IRF*) и декомпозиции дисперсии ошибок прогноза (*forecast error variance decomposition, FEVD*). Значения IRF и FEVD демонстрируют соответственно динамическую характеристику и величину совокупного эффекта. Оценка взаимосвязи потребления ВЭ, экономического роста и цен на электричество основана на значениях IRF и FEVD после применения модели VAR. IRF обычно иллюстрирует эффект шоковых импульсов на динамику переменных, FEVD — влияние соответствующих шоков на дисперсию ошибок прогноза. Оба показателя позволяют оценить, как именно шоковые воздействия на отдельные экономические переменные влияют на состояние системы в целом [Phillips, 1998].

IRF рассчитывается с помощью разложения Холецкого (*Cholesky decomposition*), учитывающего параллельное наличие связей между всеми переменными.

Первая переменная системы VAR одновременно воздействует на все остальные, тогда как последующие переменные влияют на предыдущие только в лаговой форме [Aziz, Dahalan, 2015]. С помощью разложения Холецкого переменные (*ren; gdp; ep*) ранжируются в порядке убывания эндогенности.

Шаг запаздывания (лаг) для модели был установлен на основе информационного критерия Акаике (*Akaike Information Criteria, AIC*) [Akaike, 1974], оптимально подходящего для небольших выборок [Ozturk, Acaravci, 2013]. Все переменные проверялись на стационарность и коинтеграцию, а также на наличие причинной связи Грейнджера. С помощью предиктивной модели, тоже базирующейся на методе VAR, составлен динамический прогноз для Великобритании, Турции и Нигерии на период 2013–2030 гг., основанный на имеющихся рядах данных. Переменные рассчитывались посредством программных приложений E-views и Stata.

Сводная статистика

В табл. 3 приведена сводная статистика значений переменных в интересующих нас странах. Для анализа и объяснения характеристик переменных выполнялись диагностические тесты. Вначале подбирались шаг запаздывания. Ряды данных проверялись на наличие

Табл. 3. Сводная статистика значений переменных за период 1990–2012 гг.

	uk_ren	uk_gdp	uk_ep	t_ren	t_gdp	t_ep	n_ren	n_gdp	n_ep
Среднее значение	15.45759	29293.26	108.8696	37.72006	5532.397	97.61371	6.039212	781.5134	71.96087
Медиана	12.02800	25870.99	92.80000	35.49400	4219.544	74.11461	5.850000	377.5003	57.30000
Максимум	43.82253	46610.53	181.4000	64.37187	10666.06	206.0910	8.152000	2722.298	178.9000
Минимум	5.321000	17270.12	80.20000	22.57500	2268.397	46.70890	4.343000	153.0762	3.930000
Стандартное отклонение	10.47715	9311.265	31.56791	10.63177	3028.173	55.77279	0.965901	766.0461	55.36502
Асимметрия	1.180469	0.284903	1.104866	0.840289	0.650318	0.793446	0.746967	1.519842	0.506311
Эксцесс	3.690039	1.695320	2.676368	3.428594	1.795478	2.034864	3.321090	4.071345	2.035646
Тест Харке—Бера	5.798087	1.942417	4.779835	2.882703	3.011588	3.305975	2.237647	9.954652	1.873909
Вероятность	0.055076	0.378625	0.091637	0.236608	0.221841	0.191477	0.326664	0.006892	0.391819
Сумма	355.5245	673745.1	2504.000	867.5614	127245.1	2245.115	138.9019	17974.81	1655.100
Суммарное квадратичное отклонение	2414.957	1.91e+09	21923.73	2486.758	2.02e+08	68433.29	20.52523	12910187	67436.28
Число наблюдений	23	23	23	23	23	23	23	23	23

Источник: расчеты автора.

либо отсутствие единичных корней (нестационарные/стационарные). Затем тестировались коинтеграционные характеристики и устанавливалась направленность причинной связи интересующих нас переменных.

Установление шага запаздывания

Ключевую роль в обеспечении корректности проверки на коинтеграцию играет выбор адекватного значения шага запаздывания. Чрезмерно короткий шаг не позволит отследить динамику системы, что может повлечь за собой выпадение переменных, искажение коэффициентов и возникновение ошибок при выявлении корреляции рядов данных [Kireyev, 2000]. Излишне большое значение шага запаздывания приведет к быстрой потере степени свободы и избыточной параметризации. Другими словами, подбор его оптимальной величины предотвратит «перепараметризацию» модели. Применение информационных критериев Акаике (AIC), Ханнана-Куинна (*Hannan-Quinn Information Criterion*, HQIC) [Hannan, Quinn, 1979] и байесовского критерия Шварца (*Schwarz Bayesian Criterion*, SBC) [Schwarz, 1978] показало, что адекватным шагом запаздывания для проверки на коинтеграцию будет значение VAR=4, которое и было использовано в ходе оценки (табл. 4).

Стационарность

Функции автокорреляции (*autocorrelation function*, ACF) и частичной автокорреляции (*partial autocorrelation function*, PACF) свидетельствуют о нестационарном характере рассматриваемых переменных (потребления ВЭ, экономического роста и цены на электроэнергию). Выполнялись формальные тесты на стационарность (единичные корни). В соответствии с правилами общего и частного анализа стационарности учитывались константа, временной тренд и четыре шага запаздывания. На уровне динамических рядов нулевые гипотезы о нестационарности переменных подтвердились; следо-

вательно, ни одна переменная не является стационарной.

Интеграция рядов оценивалась посредством теста на единичные корни [Ng, Perron, 2001], расширенного теста Дики-Фуллера (ADF) [Dickey, Fuller, 1981] и теста Филлипса-Перрона (PP) [Phillips, Perron, 1988], после чего выявлялась природа коинтеграции [Abbott, De Vita, 2003]. Диагностические тесты на стационарность играют критическую роль, поскольку две категории динами-

Табл. 4. Выбор шага запаздывания на основе информационных критериев

Lag	LL	LR	p	AIC	HQIC	SBC
Великобритания						
0	47.048			-5.18211	-5.1675	-5.03507
1	52.5228	10.95	0.279	-4.76739	-4.70893	-4.17924
2	76.3458	47.646	0.000	-6.51127	-6.40896	-5.482
3	86.8965	21.102	0.012	-6.69371	-6.54755	-5.22333
4	134.313	94.834*	0.000	-11.2133*	-11.0233*	-9.30186*
Турция						
0	10.3676			-0.86678	-0.852164	-0.719743*
1	22.5791	24.423	0.004	-1.2446	-1.18614	-0.65645
2	29.6669	14.176	0.116	-1.01964	-0.917328	0.009625
3	38.4023	17.471	0.042	-0.988507	-0.842349	0.48187
4	59.7156	42.627*	0.000	-2.43712*	-2.24712*	-0.525635
Нигерия						
0	16.466			-1.58424	-1.56962	-1.4372
1	29.7209	26.51	0.002	-2.08481	-2.02634	-1.49666
2	39.5511	19.66	0.020	-2.18248	-2.08017	-1.15322
3	53.3843	27.666	0.001	-2.75109	-2.60494	-1.28072
4	89.2336	71.699*	0.000	-5.90983*	-5.71983*	-3.99834*

Примечания: Lag — шаг запаздывания; эндогенные переменные — потребление ВЭ, ВВП, цены на электроэнергию; экзогенные — константа.
Источник: расчеты автора.

Табл. 5. Тестирование динамических рядов (уровней) на единичные корни

Данные	Тест ADF						Данные	Тест PP					
	Свободный член, отсутствие тренда			Свободный член, наличие тренда				Свободный член, отсутствие тренда			Свободный член, наличие тренда		
	lags	t-stat	%5 level*	lags	t-stat	%5 level*		lags	t-stat	%5 level*	lags	t-stat	%5 level*
ren_uk	2	1.82	-3.02	3	-1.38	-3.67	ren_uk	21	4.71	-3.00	6	-2.56	-3.63
ren_t	3	-0.74	-3.02	2	-3.64	-3.65	ren_t	2	-1.40	-3.00	2	-2.34	-3.63
ren_n	3	-2.29	-3.02	3	-2.77	-3.67	ren_n	2	-3.22	-3.00	2	-3.06	-3.63
Gdp_uk	4	-0.76	-3.04	3	-2.86	-3.67	Gdp_uk	1	-1.00	-3.00	0	-1.46	-3.63
Gdp_t	0	-0.34	-3.00	0	-2.55	-3.63	Gdp_t	0	-0.34	-3.00	0	-2.55	-3.63
Gdp_n	3	1.34	-3.02	4	-0.90	-3.69	Gdp_n	3	1.07	-3.00	10	-2.96	-3.63
Ep_uk	1	0.32	-3.01	1	-1.30	-3.64	Ep_uk	2	0.44	-3.00	2	-0.71	-3.63
Ep_t	0	0.75	-3.00	0	-2.39	-3.63	Ep_t	2	0.88	-3.00	4	-2.42	-3.63
Ep_n	4	-2.91	-3.04	1	-4.97	-3.64	Ep_n	1	-3.59	-3.00	1	-1.62	-3.63

Примечание: * — уровень значимости 5% (5%-е критическое значение) и шаг запаздывания, установленный в соответствии с информационным критерием Акаике (указан в первом столбце).

Источник: расчеты автора.

ческих рядов используются по-разному [Brooks, 2008]. Нестационарные переменные не имеют постоянного среднего значения, что ведет к существенной гетероскедастичности [Enders, 1995]. Тесты на единичные корни ADF и PP показывают, что все ряды данных стационарны, другими словами, интегрированы с порядком 0, т. е. I(0). Характеристики динамических рядов переменных (уровней) и первой разницы оценивались с помощью двух разных тестов на единичные корни — ADF и PP. Некоторые результаты зависят от применяемого теста (ADF или PP) и от тренда.

В соответствии с методологией общего и частного анализа стационарности, тестов на единичные корни использовались константа, временной тренд и четыре шага запаздывания. Как правило, вначале рассматривается гипотеза о том, что единичный корень имеет некий тренд. Например, если динамический ряд представлен в логарифмической форме, подразумевается постоянно растущий (или снижающийся) темп изменений [Perron, 1988]. В отношении динамических рядов (уровней) под-

твердились нулевые гипотезы о том, что переменные не являются стационарными. Результаты тестов оказались ниже пороговой величины 5% уровня значимости для каждого ряда. Значение H_0 не отвергается, поскольку все переменные не стационарны. Расчеты приведены в табл. 5. После первой разницы в каждом динамическом ряду (уровне) присутствует единичный корень, но практически все ряды в первой разнице стационарны, что свидетельствует об их интегрированности первого порядка, т. е. I(1). Согласно выкладкам, приведенным в табл. 6, второй тест ADF выявил первую разницу значений, следовательно большинство рядов оказались стационарными (демонстрируют более отрицательные значения, чем соответствующие критические величины). В соответствии с расчетами по первой разнице значений ряды, характеризующие цены на ВЭ в Великобритании и Нигерии, не являются стационарными. Они становятся таковыми после второй разницы значений, что свидетельствует об их интегрированности в I(2). Результаты тестов ADF и PP, представленные

Табл. 6. Тестирование первых разностей на единичные корни (первая разница значений переменных)

Данные	Тест ADF						Данные	Тест PP					
	Свободный член, отсутствие тренда			Свободный член, наличие тренда				Свободный член, отсутствие тренда			Свободный член, наличие тренда		
	lags	t-stat	%5 level*	lags	t-stat	%5 level*		lags	t-stat	%5 level*	lags	t-stat	%5 level*
ren_uk	1	-3.94	-3.02	1	-4.81	-3.65	ren_uk	10	-6.62	-3.01	20	-14.94	-3.64
ren_t	2	-3.62	-3.02	2	-3.49	-3.67	ren_t	1	-4.83	-3.01	1	-4.71	-3.64
ren_n	3	-2.19	-3.04	0	-6.25	-3.64	ren_n	0	-6.48	-3.01	0	-6.25	-3.64
Gdp_uk	3	-2.60	-3.04	3	-2.55	-3.69	Gdp_uk	5	-3.18	-3.01	6	-3.08	-3.63
Gdp_t	0	-5.31	-3.01	0	-5.23	-3.64	Gdp_t	0	-5.31	-3.01	0	-5.23	-3.64
Gdp_n	0	-5.00	-3.01	3	-4.96	-3.69	Gdp_n	3	-5.15	-3.01	14	-9.74	-3.64
Ep_uk	0	-2.28	-3.01	3	-2.60	-3.64	Ep_uk	1	-2.26	-3.01	1	-2.84	-3.64
Ep_t	0	-4.49	-3.01	0	-4.76	-3.64	Ep_t	1	-4.49	-3.01	3	-4.80	-3.64
Ep_n	0	-1.64	-3.01	1	-2.45	-3.65	Ep_n	1	-1.80	-3.01	2	-3.00	-3.64

Примечание: * — уровень значимости 5% (5%-е критическое значение) и шаг запаздывания, установленный в соответствии с информационным критерием Акаике (указан в первом столбце).

Источник: расчеты автора.

Табл. 7. Тестирование вторых разностей на единичные корни (вторая разность значений переменных)

Данные	Тест ADF						Данные	Тест PP					
	Свободный член, отсутствие тренда			Свободный член, наличие тренда				Свободный член, отсутствие тренда			Свободный член, наличие тренда		
	lags	t-stat	%5 level*	lags	t-stat	%5 level*		lags	t-stat	%5 level*	lags	t-stat	%5 level*
ren_uk	2	-5.06	-3.85	2	-4.94	-3.69	ren_uk	8	-14.95	-3.02	8	-14.82	-3.65
ren_t	0	-8.83	-3.02	4	-3.47	-3.73	ren_t	3	-10.35	-3.02	3	-10.24	-3.65
ren_n	1	-6.90	-3.02	1	-6.73	-3.67	ren_n	19	-22.69	-3.02	19	-26.01	-3.65
Gdp_uk	1	-6.09	-3.02	1	-6.01	-3.67	Gdp_uk	14	-9.02	-3.02	14	-9.08	-3.65
Gdp_t	0	-8.53	-3.02	0	-8.30	-3.65	Gdp_t	9	-16.80	-3.02	10	17.68	-3.65
Gdp_n	4	-4.25	-3.06	3	-4.49	-3.71	Gdp_n	17	-19.87	-3.02	15	23.37	-3.65
Ep_uk	0	-5.59	-3.02	0	-5.53	-3.65	Ep_uk	1	-5.63	-3.02	0	-5.53	-3.65
Ep_t	2	-4.50	-3.04	2	-4.86	-3.69	Ep_t	11	-14.40	-3.02	9	15.99	-3.65
Ep_n	0	-4.46	-3.02	0	-4.20	-3.65	Ep_n	3	-4.66	-3.02	5	-5.01	-3.65

Примечание: * — уровень значимости 5% (5%-е критическое значение) и шаг запаздывания, установленный в соответствии с информационным критерием Акаике (указан в первом столбце).
Источник: расчеты автора.

в табл. 7, показывают, что критические значения 5% уровня значимости менее отрицательны, чем результаты тестирования по каждому ряду. Поскольку все переменные стационарны, значение $H(0)$ отвергается.

Коинтеграционный анализ

После тестирования на стационарность проводился коинтеграционный анализ. Согласно полученной статистике следа (λ_{max}) и собственных значений для каждой страны выявлена долгосрочная связь потребления ВЭ с экономическим ростом и ценами на электроэнергию. Нулевая гипотеза об отсутствии коинтеграции была отвергнута в пользу альтернативного тезиса о том, что коинтеграционная связь на 5% уровне значимости присутствует как минимум в одном случае (для Нигерии). Результаты коинтеграционных тестов соответствуют априорному допущению о стационарности переменных.

Все переменные были включены в модель VAR на уровне динамических рядов, с использованием в необходимых случаях шага запаздывания, что позволило избежать потери значимой информации в результате перемещения данных о динамических рядах значений переменных [Kireyeu, 2000]. Расчеты по коинтеграционным тестам приведены в табл. 8.

Известно, что результаты коинтеграционных тестов зачастую имеют низкую статистическую значимость, особенно в случае использования коротких динамических рядов [Belke et al., 2011]. Коинтеграция переменных проверяется с помощью специальных измерений, таких как тест Йохансена на максимальное правдоподобие. В его основе лежит следующее допущение: в соответствии с нулевой гипотезой (H_0) имеются r коинтеграционных векторов, а согласно альтернативной гипотезе (H_1) таких векторов $r+1$ или больше [Brooks,

Табл. 8. Коинтеграционный тест Йохансена (тренд: константа, лаг = 4)

Максимальный ранг	Параметрическое значение	LL	Собственные значения (eigenvalue)	Статистика следа (λ_{max})	5% критическое значение	1% критическое значение
Великобритания						
0	30	76.281248		116.0644	29.68	35.65
1	35	112.98909	0.98668	42.6487	15.41	20.04
2	38	130.95271	0.87917	6.7215	3.76	6.65
3	39	134.31347	0.32658			
Турция						
0	30	30.406466		58.6182	29.68	35.65
1	35	45.425247	0.82914	28.5806	15.41	20.04
2	38	56.132362	0.71625	7.1664	3.76	6.65
3	39	59.715562	0.34397			
Нигерия						
0	30	51.050487		76.3662	29.68	35.65
1	35	83.416096	0.97780	11.6350*,**	15.41	20.04
2	38	87.338587	0.36964	3.7900	3.76	6.65
3	39	89.233586	0.19984			

Примечание: Наличие коинтеграционной связи: * — значимость на уровне 1%; ** — значимость на уровне 5%.
Источник: расчеты автора.

Табл. 9. Значения импульсной характеристики

Шаг	Изменение потребления ВЭ в ответ на импульс ВВП			Изменение ВВП в ответ на импульс потребления ВЭ		
	IRF	Нижний предел*	Верхний предел*	IRF	Нижний предел*	Верхний предел*
0	0	0	0	0.129837	0.041622	0.218052
1	-0.021632	-0.063027	0.019763	-0.155564	-0.270597	-0.040532
2	0.040584	-0.014034	0.095201	0.013535	-0.107074	0.134145
3	-0.025187	-0.078152	0.027778	0.070993	-0.063262	0.205248
4	0.00415	-0.042702	0.051002	-0.056148	-0.180937	0.06864
5	0.009342	-0.03387	0.052554	0.025267	-0.059429	0.109963
6	-0.016782	-0.053222	0.019658	0.00568	-0.082561	0.093922
7	0.012847	-0.018325	0.044018	-0.026774	-0.10865	0.055103
8	-0.001571	-0.028398	0.025256	0.020374	-0.037378	0.078126
9	-0.006052	-0.029513	0.017408	-0.002498	-0.044919	0.039924
10	0.00697	-0.012225	0.026164	-0.00701	-0.053275	0.039256
Шаг	Изменение потребления ВЭ в ответ на импульс цен			Изменение цен в ответ на импульс потребления ВЭ		
	IRF	Нижний предел*	Верхний предел*	IRF	Нижний предел*	Верхний предел*
0	0	0	0	0.000646	-0.030654	0.031946
1	0.00973	-0.041043	0.060504	-0.034834	-0.064462	-0.005206
2	-0.03622	-0.106353	0.033914	0.011393	-0.018633	0.041418
3	0.024402	-0.027108	0.075913	0.017364	-0.013523	0.048251
4	0.004931	-0.030296	0.040159	-0.009334	-0.033847	0.01518
5	-0.016644	-0.051474	0.018186	0.000057	-0.020569	0.020683
6	0.014873	-0.021251	0.050998	0.000853	-0.016769	0.018474
7	-0.006975	-0.034516	0.020566	-0.003537	-0.01881	0.011736
8	-0.003459	-0.02586	0.018943	0.003204	-0.007783	0.014191
9	0.008274	-0.013356	0.029905	0.000627	-0.007485	0.008739
10	-0.00557	-0.022887	0.011747	-0.001856	-0.009575	0.005863

Примечание: * — 95% нижний и верхний пределы.
Источник: расчеты автора.

2008]. Поскольку тест на единичные корни выявил нестационарность переменных (как для уровней, так и для разниц), итог коинтеграционных тестов соответствует исходным допущениям о стационарности переменных.

Эмпирические результаты и дискуссия

Все переменные были переведены в формат натуральных логарифмов [Ewing et al., 2007; Narayan, Prasad, 2008; Sadorsky, 2009a] с применением логарифмической разницы, чтобы гарантировать их стационарность. Алгоритм оценивания заключался в идентификации модели с помощью тестирования на стационарность, выборе шага запаздывания, выявлении причинной связи и использовании ограничений на измерение функций импульсной характеристики и декомпозиции дисперсии ошибок прогноза. Для каждой страны разработана предиктивная модель на период 2013–2030 гг. Далее представлены результаты использования функций импульсной характеристики, декомпозиции дисперсии VAR и предиктивной модели.

Анализ импульсной характеристики

Для изучения связи между потреблением ВЭ, экономическим ростом и ценами на электроэнергию использовалась методология IRF. Функции импульсной

характеристики применимы только в условиях стабильности модели VAR, и ее необходимо обеспечить при использовании IRF, чтобы корректно интерпретировать результаты [Sadorsky, 2011]. Величины IRF иллюстрируют влияние шоков, испытанных тем или иным компонентом модели, на текущие и будущие значения всех эндогенных переменных [Silva et al., 2012]. Значимость установлена для 95% доверительных интервалов. Поле ошибок определялось с помощью метода Монте-Карло (1000 повторений). По доверительным интервалам гипотезы, выбранным для оценки важности шоковых импульсов, рассчитывались стандартные ошибки. IRF показывает, в течение какого времени и в какой степени потребление ВЭ меняется вследствие непредвиденных изменений уровня доходов или цен на электроэнергию [Lee, Chiu, 2011].

Данные IRF, представленные в табл. 9, демонстрируют, что в интересующих нас странах потребление ВЭ существенно, причем отрицательно, менялось в случае 10% изменения экономического роста: на 0.2% (отрицательно) в краткосрочной перспективе и на 0.06% (положительно) — в долгосрочной. Можно констатировать, что среди прочих факторов на потребление ВЭ в изучаемых государствах в течение рассматриваемого периода влияли шоковые изменения уровня доходов, а экономический рост в странах, включенных в выборку,

существенно и положительно меняется в случае шокового изменения потребления ВЭ. Последний показатель также значимо и положительно трансформировался в случае 10% изменения цен на электричество: на 0.09% в краткосрочной перспективе и на 0.05% (отрицательно) в долгосрочной. В графическом виде прогноз коинтеграции индикаторов по странам представлен на рис. 2, 3 и 4.

Выводы нашего исследования соответствуют эмпирическим результатам, приведенным в работах [Apergis, Payne, 2014, 2010; Tugcu et al., 2012], в которых установлено, что функция причинности Грейнджера лучше объясняет взаимозависимость этих переменных в долгосрочной перспективе. Напротив, выводы, полученные Менегаки [Menegaki, 2011] с использованием аналогичного подхода, не подтверждают наличие причинной связи Грейнджера между потреблением ВЭ и величиной доходов.

Декомпозиции дисперсии

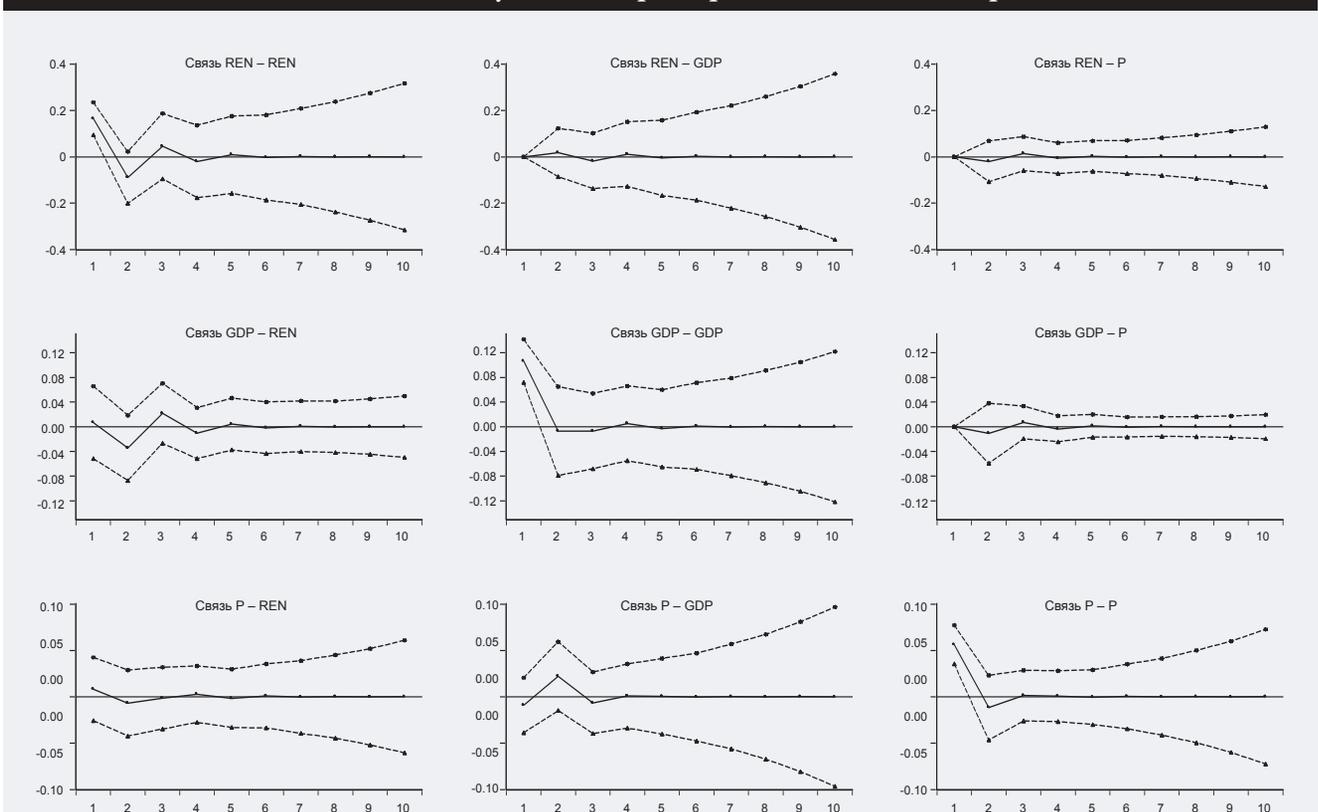
Связь между уровнями потребления ВЭ, доходов и цен на электроэнергию дополнительно анализировалась в кратко- и долгосрочной перспективе с помощью усовершенствованного метода декомпозиции дисперсии ошибок прогноза. Итоги представлены в табл. 10.

В краткосрочной перспективе примерно 1.3% всех колебаний экономического роста в исследуемых странах объясняются 39% изменением уровня потребления ВЭ. В долгосрочной перспективе (10 лет) изменение уровня потребления ВЭ на 100% приведет к приросту ВВП примерно на 7%. Колебания цен на электроэнергию в пределах 0.2% повлекут за собой увеличение потребления ВЭ на 2% в краткосрочной перспективе, а 100% изменение уровня потребления ВЭ в отдаленном будущем изменит цены на электричество примерно на 5.6%.

Можно заключить, что экономический рост будет иметь как сиюминутные, так и долгосрочные последствия для потребления ВЭ в рассматриваемых странах. В анализируемом периоде цены на электроэнергию также в значительной степени определяли потребление ВЭ в этих государствах. Полученные результаты соответствуют изначальным предположениям и выводам предшествующих исследований [Apergis, Payne, 2014, 2010; Silva et al., 2012; Sadorsky, 2011].

В отсутствие целенаправленной государственной политики изменение уровня потребления ВЭ сказывается на экономическом росте включенных в выборку стран. Утверждение, что макроэкономические процессы реагируют на потребление ВЭ, подкреплено тестом на причинность Грейнджера по методу VAR (табл. 11).

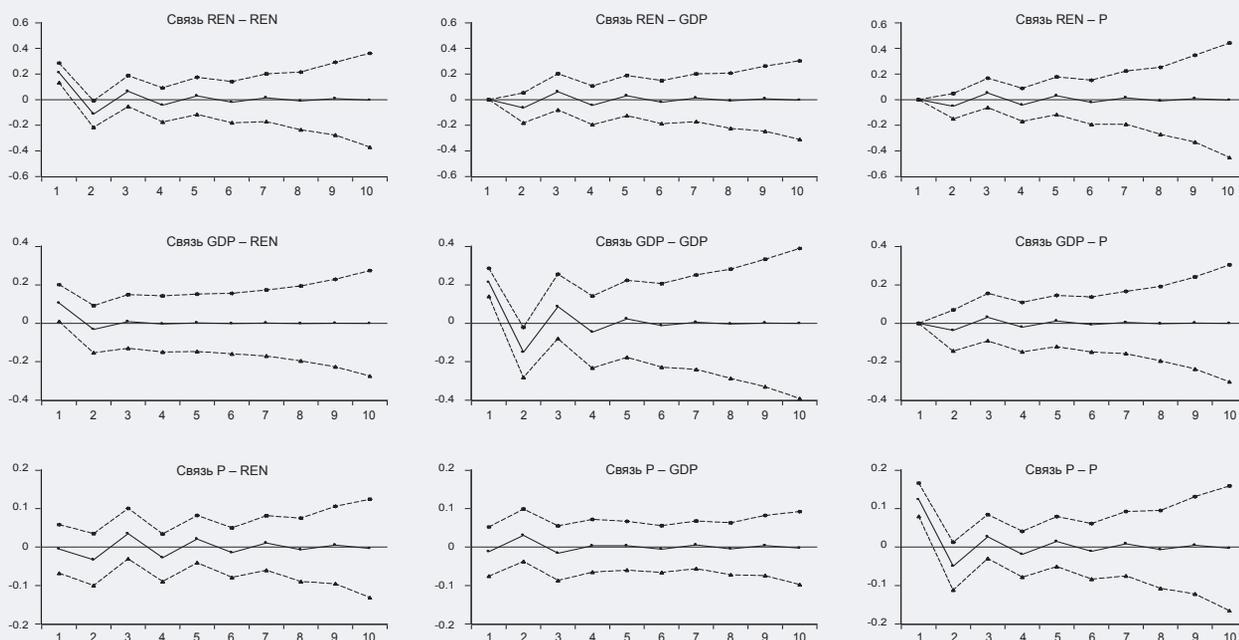
Рис. 2. Значения импульсной характеристики для Великобритании



Примечание: В период от 3 до 10 лет реакция потребления ВЭ на шоковые импульсы уровня доходов и цен на электроэнергию является нулевой или незначительной (в данном случае ноль включается в доверительный интервал). Из диаграммы 4 следует, что в период от 1 до 3 лет реакция уровня доходов на импульс потребления ВЭ носит отрицательный и незначительный характер (ноль не входит в доверительный интервал). Реакция уровня цен на импульс потребления ВЭ в период от 1 до 3 лет имеет положительную и значимую величину, после чего становится постоянной и незначительной.

Источник: расчеты автора.

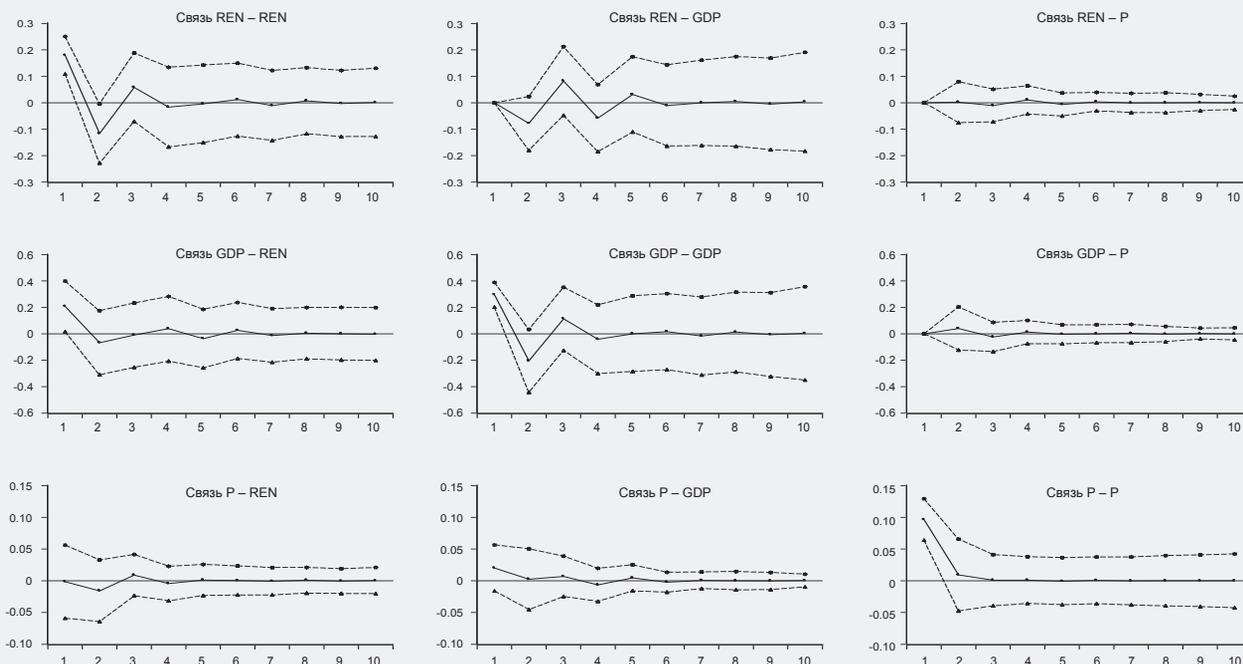
Рис. 3. Значения импульсной характеристики для Турции



Примечание: реакция потребления ВЭ на импульсы изменения уровня доходов и цен является положительной и статистически значимой в течение трех лет (ноль не входит в доверительный интервал). Реакция уровня доходов на импульс изменения потребления ВЭ характеризуется статистической значимостью в периоде 1–2 лет, после чего становится нулевой. Реакция уровня цен на этот же импульс оказывается положительной и статистически значимой в течение от 3 до 5 лет.

Источник: расчеты автора.

Рис. 4. Значения импульсной характеристики для Нигерии



Примечание: реакция уровня потребления ВЭ на импульс изменения уровня доходов носит положительный характер в период от 3 до 4 лет и значима на уровне 5% (ноль не включен в доверительный интервал). Реакция потребления ВЭ на импульс изменения цен является нулевой и статистически незначимой на уровне 5%, так как в этом случае ноль входит в доверительный интервал. Реакция величины доходов на импульс изменения потребления ВЭ статистически значима. Реакция ценовой конъюнктуры на импульс изменения потребления ВЭ остается отрицательной и статистически значимой в течение 3 лет, после чего становится нулевой.

Источник: расчеты автора.

Табл. 10. Декомпозиции дисперсии

Шаг	Изменение потребления ВЭ в ответ на импульс ВВП			Изменение ВВП в ответ на импульс потребления ВЭ		
	FEVD	Нижний предел*	Верхний предел*	FEVD	Нижний предел*	Верхний предел*
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0.359297	0.013927	0.704667
2	0.013606	-0.039131	0.066342	0.454295	0.081983	0.826606
3	0.05345	-0.094369	0.20127	0.453227	0.081536	0.824917
4	0.066252	-0.111242	0.243745	0.475294	0.099743	0.850845
5	0.062214	-0.106638	0.231066	0.491207	0.089595	0.892818
6	0.06205	-0.111837	0.235937	0.489189	0.081451	0.896927
7	0.067427	-0.123816	0.258671	0.486876	0.081447	0.892306
8	0.070319	-0.126972	0.267609	0.490213	0.077361	0.903064
9	0.069973	-0.126466	0.266411	0.491456	0.073618	0.909293
10	0.070507	-0.128206	0.26922	0.491059	0.07384	0.908278
Шаг	Изменение потребления ВЭ в ответ на импульс цен			Изменение цен в ответ на импульс потребления ВЭ		
	FEVD	Нижний предел*	Верхний предел*	FEVD	Нижний предел*	Верхний предел*
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0.000086	-0.008263	0.008436
2	0.002753	-0.02596	0.031465	0.193485	-0.090817	0.477787
3	0.035547	-0.109357	0.180451	0.190556	-0.076611	0.457722
4	0.048243	-0.13047	0.226955	0.213567	-0.075414	0.502547
5	0.045567	-0.119104	0.210239	0.21828	-0.080995	0.517554
6	0.05008	-0.125819	0.225979	0.216683	-0.082071	0.515436
7	0.054289	-0.13638	0.244959	0.216089	-0.081811	0.513988
8	0.054823	-0.137006	0.246652	0.217155	-0.085225	0.519534
9	0.054766	-0.136561	0.246093	0.218058	-0.086876	0.522992
10	0.056024	-0.13899	0.251038	0.218054	-0.087023	0.523131

Примечание: * — 95% нижний и верхний пределы
Источник: расчеты автора.

Увеличение потребления ВЭ стимулировало экономический прогресс в сравниваемых государствах. Во всех случаях установлена двусторонняя причинно-следственная связь Грейнджера между потреблением ВЭ и уровнем доходов (см. табл. 11). Кроме того, потребление ВЭ положительно коррелирует с экономическим ростом. Эти результаты соответствуют выводам предшествующих исследований в отношении связи между использованием ВЭ и шоковыми изменениями уровня доходов [Apergis, Payne, 2010; 2014; Ohler, Fetters, 2014; Sadorsky, 2009b; Salim, Rafiq, 2012]. Хотя для Нигерии мы не выявили причинной связи Грейнджера между экономическим ростом и потреблением энергии (ни в одном направлении) [Akinlo, 2008], в ряде эмпирических исследований (например, [Payne, 2011; Menegaki, 2011; Menyah, Wolde-Rufael, 2010]) установлен односторонний характер такой зависимости.

Полученные результаты по Великобритании, Турции и Нигерии подтверждают, что экономический прогресс активизирует использование возобновляемых источников энергии. Поскольку указанные страны неодинаково реагируют на изменение потребления ВЭ, эффекты будут различаться.

Причинной связи, иллюстрирующей влияние потребления ВЭ на стоимость электроэнергии, не обнаружено. В то же время для Турции и Нигерии установ-

лено, что именно потребление ВЭ определяется ценами на электричество. Расчеты по Нигерии подтверждают результаты исследования [Ebohon, 1996], согласно которым ценовые колебания не влияют на экономическую активность и потребление энергии. В Великобритании выявлена двусторонняя причинная связь между использованием ВЭ и ценами на электроэнергию: предположительно уровень первого показателя более чувствителен к изменениям второго [Sadorsky, 2009a], поэтому потребление ВЭ активизируется при снижении стоимости электричества.

Прогноз потребления ВЭ

Прогноз спроса на энергию из возобновляемых источников на период 2013–2030 гг. состоит из двух сценариев, разработанных с помощью модели VAR. В первом сценарии предполагаются высокие темпы экономического роста, во втором — низкие. Оценки экономического развития основаны на данных Всемирного банка о ежегодном приросте мировой экономики. Оба сценария предполагают, что экономика изучаемых государств будет расти (этой точки зрения придерживаются многие исследователи и организации, в частности МЭА и Всемирный Банк). В качестве предикторов использованы показатели ВВП и цен на электроэнергию, так как они влияют на уровень потребления ВЭ.

Табл. 11. Тест Грейнджера на причинность

Выявление причинной связи Грейнджера с помощью теста Вальда			
Уравнение	Исключено	Chi2	Prob>Chi2
Великобритания			
Потребление ВЭ	ВВП	25.396	0.000
	Цена на электроэнергию	80.805	0.000
	Все	112.68	0.000
ВВП	Потребление ВЭ	109	0.000
	Цена на электроэнергию	113.39	0.000
	Все	180.89	0.000
Цена на электроэнергию	Потребление ВЭ	10.759	0.029
	ВВП	15.19	0.004
	Все	25.758	0.001
Турция			
Потребление ВЭ	ВВП	11.435	0.022
	Цена на электроэнергию	3.8749	0.423
	Все	12.801	0.119
ВВП	Потребление ВЭ	19.495	0.001
	Цена на электроэнергию	17.067	0.002
	Все	27.886	0.000
Цена на электроэнергию	Потребление ВЭ	93.067	0.000
	ВВП	34.292	0.000
	Все	109.51	0.000
Нигерия			
Потребление ВЭ	ВВП	47.803	0.000
	Цена на электроэнергию	14.694	0.005
	Все	49.931	0.000
ВВП	Потребление ВЭ	24.957	0.000
	Цена на электроэнергию	20.436	0.000
	Все	39.161	0.000
Цена на электроэнергию	Потребление ВЭ	3.5722	0.467
	ВВП	5.0131	0.286
	Все	12.546	0.128

Источник: расчеты автора.

В Великобритании отчетливо прослеживается тенденция к росту потребления ВЭ (рис. 5). По базовому прогнозу к 2030 г. этот показатель составит 6.87 млрд кВт/ч; при высоких темпах экономического развития — увеличится до 7.78, при низких — до 7.02 млрд кВт/ч.

В Турции в предстоящие годы потребление ВЭ будет расти медленно (рис. 6). По базовому прогнозу к 2030 г. оно достигнет 4.48 млрд кВт/ч; при высоких и низких темпах экономического роста — вырастет до 4.81 и 4.56 млрд кВт/ч, соответственно. В 2001 г. данный показатель ощутимо снизился (реакция на финансовый кризис в Турции 2000–2001 гг.), что, по-видимому, повлияло на прогнозный расчет.

На рис. 7 видны значительные колебания уровня потребления ВЭ в Нигерии, однако в дальнейшем предполагается его стабилизация. Прогноз представляет

Рис. 5. Прогноз потребления ВЭ для Великобритании



Рис. 6. Прогноз потребления ВЭ для Турции



Рис. 7. Прогноз потребления ВЭ для Нигерии

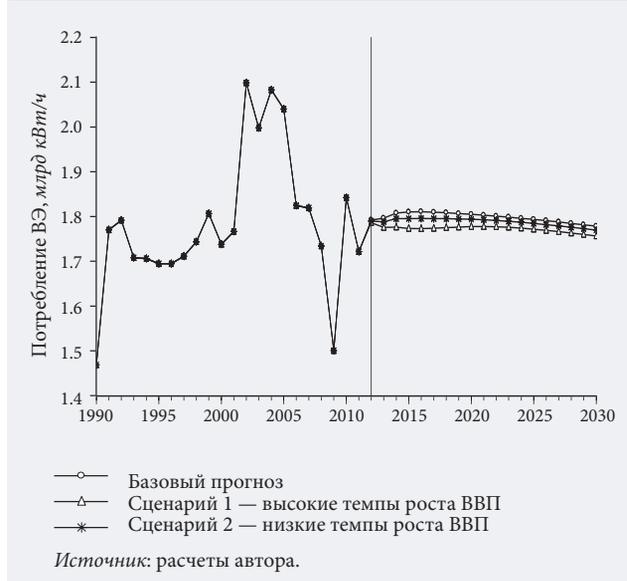


Табл. 12. Базовый прогноз потребления ВЭ

Годы	Великобритания	Турция	Нигерия
2015	4.10	4.00	1.80
2020	4.90	4.18	1.80
2025	5.82	4.32	1.79
2030	6.87	4.48	1.77

Источник: расчеты автора.

усредненные данные за прошлые годы и не учитывает недавний пик 2003–2005 гг. и падение 2009 г. В базовом прогнозе предполагается, что потребление ВЭ к 2030 г. составит 1.77 млрд кВт/ч; при высоких и низких темпах экономического прогресса ожидается на уровне соответственно 1.75 и 1.76 млрд кВт/ч.

В табл. 12 представлены данные потребления ВЭ по странам за 2015 г. и прогнозы на 2020, 2025 и 2030 гг., рассчитанные с помощью модели VAR. Ожидается существенный рост спроса на возобновляемые энергоресурсы в Великобритании и Турции, но не в Нигерии.

Выводы и эффекты для политики

Мы проанализировали динамику взаимосвязи потребления ВЭ, уровня доходов и цен на электроэнергию в Великобритании, Турции и Нигерии за 1990–2012 гг. с помощью методики, основанной на стандартной модели VAR. Установлен характер влияния растущей доли возобновляемых источников на уровень доходов населения и цены на электроэнергию. Исходя из этого составлен прогноз для трех рассматриваемых стран. Результаты IRF свидетельствуют, что рост уровня доходов активизирует потребление ВЭ. Следовательно, эффективная политика по стимулированию экономики активизирует потребление ВЭ, с которым положительно связаны показатели экономической динамики в проанализированных странах.

Наши выводы подтверждают важность повышения доли ВЭ в энергетическом балансе рассматриваемых стран, а потому заслуживают внимания с точки зрения

национальной политики. Очевидны признаки появления нового энергетического рынка, что в перспективе (если не кратко-, то средне- или долгосрочной) может радикально изменить традиционные рынки. Можно предположить, что постепенный рост доли ВЭ, появившийся в прошлом, при условии эффективной реализации политики станет индикатором будущих рыночных тенденций. Серьезное значение для разработки мер политики имеет существенное влияние уровня доходов на интенсивность потребления ВЭ. С помощью финансовых и фискальных инструментов можно повысить величину доходов и активизировать создание новой стоимости, в частности, за счет стимулирования инновационной деятельности и повышения производительности труда. Энергетическую и экономическую политику следует ориентировать на повышение инвестиций в ВЭ с прицелом на будущее экономическое развитие.

Установлен положительный эффект повышения доходов, влияющий на экономическую и политическую эволюцию стран. Подтверждается важность инициатив, стимулирующих рост потребления ВЭ за счет развития соответствующих рынков и принятия необходимых стандартов — не только по соображениям безопасности и экологии, но и с макроэкономической точки зрения (для обеспечения стабильного экономического роста). В долгосрочной перспективе уровень потребления ВЭ определяется величиной цен на электроэнергию. Поскольку инфраструктура возобновляемой энергетики требует масштабных затрат, электричество, произведенное из таких источников, стоит дороже, и лишь немногие страны готовы увеличивать расходы на энергопотребление.

К основным ограничениям нашего исследования относится период наблюдения (1990–2012 гг.), но, несмотря на это, использование выбранной модели вполне соответствует сложившейся практике [Silva et al., 2012; Soytaş, Sari, 2009]. Возникли определенные сложности с получением надежных данных по Нигерии, тем не менее, имея достоверные сведения по двум другим странам, в их отношении можно сделать обоснованные выводы. Указанные ограничения следует учитывать в дальнейших исследованиях.

Библиография

- Abbott A.J., De Vita G. (2003) Another Piece in the Feldstein — Horioka Puzzle // *Scottish Journal of Political Economy*. Vol. 50. № 1. P. 68–89.
- Akaike H. (1974) A new look at the statistical model identification // *IEEE Transactions on Automatic Control*. Vol. 19. № 6. P. 716–723. DOI:10.1109/TAC.1974.1100705.
- Akinlo A.E. (2008) Energy consumption and economic growth: Evidence from 11 Sub-Sahara African countries // *Energy Economics*. Vol. 30. № 5. P. 2391–2400.
- Akinlo A.E. (2009) Electricity consumption and economic growth in Nigeria: Evidence from cointegration and co-feature analysis // *Journal of Policy Modelling*. Vol. 31. № 5. P. 681–693.
- Apergis N., Payne J.E. (2010) Renewable energy consumption and economic growth: Evidence from a panel of OECD countries // *Energy Policy*. Vol. 38. P. 656–660.
- Apergis N., Payne J.E. (2014) Renewable energy, output, CO₂ emissions, and fossil fuel prices in Central America: Evidence from a nonlinear panel smooth transition vector error correction model // *Energy Economics*. Vol. 42. P. 226–232.
- Aqeel A., Butt M.S. (2001) The relationship between energy consumption and economic growth in Pakistan // *Asia-Pacific Development Journal*. Vol. 8. № 2. P. 101–110.
- Aziz M.I.A., Dahalan J. (2015) Oil Price Shocks and Macroeconomic Activities in Asean-5 Countries: A Panel VAR Approach // *Eurasian Journal of Business and Economics*. Vol. 8. № 16. P. 101–120.

- Belke A., Dobnik F., Dreger C. (2011) Energy consumption and economic growth: New insights into the cointegration relationship // *Energy Economics*. Vol. 33. № 5. P. 782–789.
- Bowden N., Payne J.E. (2010) Sectoral analysis of the causal relationship between renewable and non-renewable energy consumption and real output in the US // *Energy Sources. Part B: Economics, Planning, and Policy*. Vol. 5. № 4. P. 400–408.
- Bretschenger L. (2010) *Energy Prices, Growth, and the Channels in Between: Theory and Evidence*. Economics Working Paper Series. Zurich: ETH Zurich.
- Brooks C. (2008) *Introductory econometrics for finance* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Bruns S.B., Gross C. (2013) What if energy time series are not independent? Implications for energy-GDP causality analysis // *Energy Economics*. Vol. 40. P. 753–759.
- Chiou-Wei S.Z., Chen C.F., Zhu Z. (2008) Economic growth and energy consumption: Evidence from linear and nonlinear granger causality // *Energy Economics*. Vol. 30. № 6. P. 3063–3076.
- Dickey D.A., Fuller W.A. (1981) Likelihood ratio statistics for autoregressive time series with a unit root // *Econometrica*. Vol. 49. № 4. P. 1057–1072.
- Ebohon O.J. (1996) Energy, economic growth, and causality in developing countries // *Energy Policy*. Vol. 24. № 5. P. 447–453.
- Edenhofer O., Hirth L., Knopf B., Pahle M., Schlömer S., Schmid E., Ueckerdt F. (2013) On the economics of renewable energy sources // *Energy Economics*. Vol. 40. № S1. P. S12–S23.
- Enders W. (1995) *Applied econometric time series* (2nd ed.). London: John Wiley & Sons Inc.
- Ewing B.T., Sari R., Soytas U. (2007) Disaggregate energy consumption and industrial output in the United States // *Energy Policy*. Vol. 35. № 2. P. 1274–1281.
- Giles D. (2011) VAR or VECM When Testing for Granger Causality? Режим доступа: <http://davegiles.blogspot.com.tr/2011/10/var-or-vecm-when-testing-for-granger.html>, дата обращения 25.05.2015.
- Granger C.W.J. (1980) Testing for causality: A personal viewpoint // *Journal of Economic Dynamics and Control*. Vol. 2. P. 329–352. DOI:10.1016/0165-1889(80)90069-X.
- Gross C. (2012) Explaining the (non-) causality between energy and economic growth in the U.S. — A multivariate sectoral analysis // *Energy Economics*. Vol. 34. № 2. P. 489–499.
- Halicioglu F. (2009) An econometric study of CO₂-emissions, energy consumption, income and foreign trade in Turkey // *Energy Policy*. Vol. 37. № 3. P. 1156–1164.
- Hannan E.J., Quinn B.G. (1979) The Determination of the order of an autoregression // *Journal of the Royal Statistical Society, Series B*. Vol. 41. P. 190–195.
- Hocaoglu F.O., Karanfil F. (2013) A time series-based approach for renewable energy modelling // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 28. P. 204–214.
- Huang B.N., Hwang M.J., Yang C.W. (2008) Causal relationship between energy consumption and GDP growth revisited: A dynamic panel data approach // *Ecological Economics*. Vol. 67. № 1. P. 41–54.
- Humphrey W.S., Stanislaw J. (1979) Economic growth and energy consumption in the UK, 1700–1975 // *Energy Policy*. Vol. 7. № 1. P. 29–42.
- Ighodaro C.A. (2010) Co-integration and causality relationship between energy consumption and economic growth: Further empirical evidence for Nigeria // *Journal of Business Economics and Management*. Vol. 11. № 1. P. 97–111.
- Inglesi-Lotz R. (2013) *The Impact of Renewable Energy Consumption to Economic Welfare: A Panel Data Application*. Department of Economics Working Paper Series 15, March. Pretoria: University of Pretoria.
- IRENA (2018a) *Renewable energy auctions: Cases from Sub-Saharan Africa*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- IRENA (2018b) *Renewable capacity statistics 2018*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Johnstone N., Hašič I., Popp D. (2010) Renewable energy policies and technological innovation: Evidence based on patent counts // *Environmental and Resource Economics*. Vol. 45. № 1. P. 133–155.
- Kaygusuz K., Yuksek O., Sari A. (2007) Renewable energy sources in the European Union: Markets and capacity // *Energy Sources. Part B: Economics, Planning, and Policy*. Vol. 2. № 1. P. 19–29.
- Kireyev A. (2000) *Comparative Macroeconomic Dynamics in the Arab World: A Panel VAR Approach*. IMF Working Paper, Middle Eastern Department, WP/00/54. Washington, D.C.: International Monetary Fund.
- Lee C.C., Chien M.S. (2010) Dynamic modelling of energy consumption, capital stock, and real income in G7 countries // *Energy Economics*. Vol. 32. № 3. P. 564–581.
- Lee C.C., Chiu Y.B. (2011) Nuclear energy consumption, oil prices, and economic growth: Evidence from highly industrialized countries // *Energy Economics*. Vol. 33. № 2. P. 236–248.
- Marques C.A., Fuinhas J.A. (2011) Do energy efficiency measures promote the use of renewable sources? // *Environmental Science & Policy*. Vol. 15. № 3. P. 471–481.
- Melikoglu M. (2013) Vision 2023: Feasibility analysis of Turkey's renewable energy projection // *Renewable Energy*. Vol. 50. Issue C. P. 570–575.
- Menegaki A.N. (2011) Growth and renewable energy in Europe: A random effect model with evidence for neutrality hypothesis // *Energy Economics*. Vol. 33. № 2. P. 257–263.
- Menyah K., Wolde-Rufael Y. (2010) CO₂ emissions, nuclear energy, renewable energy and economic growth in the US // *Energy Policy*. Vol. 38. № 6. P. 2911–2915.
- Mohammadi H., Parvaresh S. (2014) Energy consumption and output: Evidence from a panel of 14 oil-exporting countries // *Energy Economics*. Vol. 41. P. 41–46.
- Narayan P.K., Prasad A. (2008) Electricity consumption-real GDP causality nexus: Evidence from a bootstrapped causality test for 30 OECD countries // *Energy Policy*. Vol. 36. № 2. P. 910–918.
- Ng S., Perron P. (2001) Lag length selection and the construction of unit root tests with good size and power // *Econometrica*. Vol. 69. № 6. P. 1519–1554.
- Ocal O., Aslan A. (2013) Renewable energy consumption-economic growth nexus in Turkey // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 28. P. 494–499.
- Odhiambo N.M. (2010) Energy consumption, prices, and economic growth in three SSA countries: A comparative study // *Energy Policy*. Vol. 38. № 5. P. 2463–2469.

- Ohler A., Fetters I. (2014) The causal relationship between renewable electricity generation and GDP growth: A study of energy sources // *Energy Economics*. Vol. 43. Issue C. P. 125–139.
- Ozturk I., Acaravci A. (2013) The long run and causal analysis of energy, growth, openness and financial development on carbon emissions in Turkey // *Energy Economics*. Vol. 36. Issue C. P. 262–267.
- Pao H.T., Fu H.C. (2013) Renewable energy, non-renewable energy, and economic growth in Brazil // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 25. P. 381–392.
- Payne J.E., Taylor J.P. (2010) Nuclear energy consumption and economic growth in the US: An empirical note // *Energy Sources. Part B: Economics, Planning, and Policy*. Vol. 5. № 3. P. 301–307.
- Payne J.E. (2010) Survey of the international evidence on the causal relationship between energy consumption and growth // *Journal of Economic Studies*. Vol. 37. № 1. P. 53–95.
- Payne J.E. (2011) On biomass energy consumption and real output in the US // *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*. Vol. 6. № 1. P. 47–52.
- Perron P. (1988) Trends and random walks in macroeconomic time series: Further evidence from a new approach // *Journal of Economic Dynamics and Control*. Vol. 12. № 2. P. 297–332.
- Phillips P.C., Perron P. (1988) Testing for a unit root in time series regression // *Biometrika*. Vol. 75. № 2. P. 335–346.
- Phillips P.C.B. (1998) Impulse response and forecast error variance asymptotic in nonstationary VARs // *Journal of Econometrics*. Vol. 83. P. 21–56.
- REN21 (2018) *Renewables 2018 Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat. ISBN 978-3-9818911-3-3.
- Sadorsky P. (2009a) Renewable energy consumption, CO₂ emissions, and oil prices in the G7 countries // *Energy Economics*. Vol. 31. № 3. P. 456–462.
- Sadorsky P. (2009b) Renewable energy consumption and income in emerging economies // *Energy Policy*. Vol. 37. № 10. P. 4021–4028.
- Sadorsky P. (2011) Modelling renewable energy consumption for a greener global economy // *Planet Earth 2011 — Global Warming Challenges and Opportunities for Policy and Practice* / Ed. E. Carayannis. Rijeka, Shanghai: InTech. P. 507–524.
- Salim R.A., Rafiq S. (2012) Why do some emerging economies proactively accelerate the adoption of renewable energy? // *Energy Economics*. Vol. 34. № 4. P. 1051–1057.
- Schwarz G.E. (1978) Estimating the dimension of a model // *Annals of Statistics*. Vol. 6. № 2. P. 461–464. DOI:10.1214/aos/1176344136, MR 0468014.
- Silva S., Soares I., Pinho C. (2012) The impact of renewable energy sources on economic growth and CO₂ emissions — a SVAR approach // *European Research Studies*. Vol. 15 (Special Issue on Energy). P. 132–144.
- Soytas U., Sari R. (2009) Energy consumption, economic growth, and carbon emissions: Challenges faced by an EU candidate member // *Ecological Economics*. Vol. 68. № 6. P. 1667–1675.
- Taylor J.W. (2010) Triple seasonal methods for short-term electricity demand forecasting // *European Journal of Operational Research*. Vol. 204. P. 139–152.
- Tiwari A.K. (2011) A structural VAR analysis of renewable energy consumption, real GDP and CO₂ emissions: Evidence from India // *Economics Bulletin*. Vol. 31. № 2. P. 1793–1806.
- Tugcu C.T., Ozturk I., Aslan A. (2012) Renewable and non-renewable energy consumption and economic growth relationship revisited: Evidence from G7 countries // *Energy Economics*. Vol. 34. № 6. P. 1942–1950.
- Vaona A. (2012) Granger non-causality tests between (non) renewable energy consumption and output in Italy since 1861: The (ir)relevance of structural breaks // *Energy Policy*. Vol. 45. P. 226–236.
- Ward D.J., Inderwildi O.R. (2013) Global and local impacts of UK renewable energy policy // *Energy Environment Science*. Vol. 6. P. 18–24.
- World Bank (2013) *World Development Indicators 2013*. Режим доступа: <http://data.worldbank.org/>, дата обращения 10.10.2014.
- Yildirim E., Sarac S., Aslan A. (2012) Energy consumption and economic growth in the USA: Evidence from renewable energy // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 16. № 9. P. 6770–6774.
- Yusuf S.A. (2014) *Impact of energy consumption and environmental degradation on economic growth in Nigeria*. MPRA Paper 55529. Munchen: University of Munchen.

Пределы технологической эффективности добычи сланцевой нефти в США

Александр Маланичев

Приглашенный профессор, a_malanichev@list.ru

Российская экономическая школа (РЭШ), 121353, Москва, Сколковское шоссе, 45

Аннотация

Развитие технологий извлечения сланцевой нефти в США привело к стремительному росту ее добычи и снижению себестоимости до приемлемого уровня. «Сланцевая революция» радикально преобразовала мировой рынок нефти, став ключевым фактором снижения нефтяных цен в 2014–2016 гг. В статье исследуется проблематика долгосрочного прогнозирования добычи сланцевой нефти в США и производительности буровых установок. Автор применяет метод несимметричной колоколообразной функции, описывающий добычу нефти с учетом ее физических и геологических параметров.

Расчеты показывают, что пиковое значение средней по месторождению производительности буровых

установок может быть достигнуто к 2026 г. и составит 1200 барр./сут., что вдвое выше текущего уровня. На этот же период придется максимальный уровень добычи нефти — 11.3 млн барр./сут. и технически извлекаемых ресурсов — 96 млрд барр. В результате уже с 2023 г. объемы извлечения сланцевой нефти в США могут оказаться недостаточными для удовлетворения растущего мирового спроса, и потребуются разработка новых месторождений с еще более высокой себестоимостью.

Теоретически обоснованная и эмпирически протестированная несимметричная колоколообразная кривая может служить эффективным инструментом технологического Форсайта для нефтегазового комплекса.

Ключевые слова: добыча сланцевой нефти; технологическая эффективность; институциональные факторы; подгонка колоколообразной кривой; производительность буровых установок.

Цитирование: Malanichev A. (2018) Limits of Technological Efficiency of Shale Oil Production in the USA. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no 4, pp. 78–89. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.78.89

Рост добычи сланцевой нефти в США оказался одним из определяющих факторов драматического падения нефтяных котировок в 2014–2016 гг. К категории сланцевой относится легкая низкосернистая нефть, которая залегают в низкопроницаемых коллекторах [Mănescu, Nuño, 2015]. Короткий инвестиционный цикл позволил американской сланцевой индустрии потеснить ОПЕК с позиции регулятора цен на мировом рынке нефти [Baffes, 2015].

Уровень добычи нефти зависит от нескольких групп факторов: геологических, технологических, экономических и политических, включая особенности регулирования отрасли. В долгосрочном периоде решающее значение приобретают геологический и технологический факторы [Benes et al., 2012]: чем интенсивнее развиваются технологии разведки и добычи, тем больший объем углеводородов может быть извлечен и продан в сопоставимых экономических условиях и тем выше будет получаемый доход.

Для моделирования геолого-технологических факторов нефтедобычи используется несколько инженерно-геологических подходов [Brandt, 2010]. Речь идет о наборе гипотез в отношении профиля добычи на протяжении жизни месторождения, как правило, в виде колоколообразных кривых. Наиболее известная из них — симметричная колоколообразная кривая Хабберта, позволившая предсказать пик добычи нефти в США между 1965 и 1970 гг. [Hubbert, 1956].

Основное преимущество инженерно-геологического подхода состоит в учете нелинейного характера добычи во времени и отсутствии необходимости оперировать долгосрочным прогнозом динамики цены на нефть. К его изъяснам можно отнести недостаточную теоретическую согласованность с основными ограничениями нефтедобычи (поддержанием материального баланса, естественным снижением добычи). Профили добычи вводятся априорно, а качество аппроксимации эмпири-

ческих данных проверяется с помощью математических процедур [Semenychev et al., 2014].

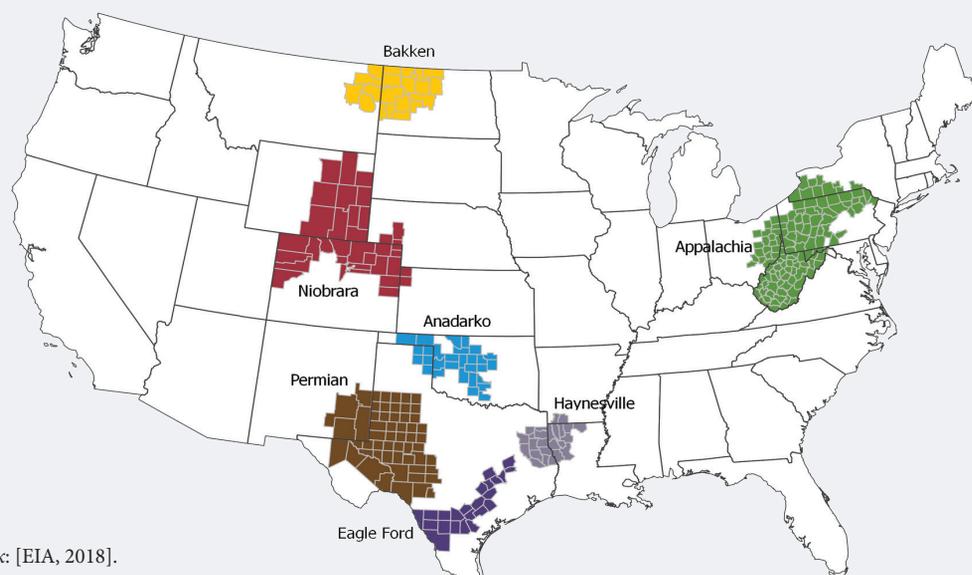
Для того чтобы устранить эти недостатки, в работе [Маланичев, 2017а] введено обыкновенное дифференциальное уравнение динамики добычи нефти, учитывающее необходимость сохранения материального баланса нефти и естественное снижение добычи. Симметричная колоколообразная кривая Хабберта представляет собой частное решение этого уравнения. Однако, поскольку долгосрочная динамика добычи нефти носит преимущественно несимметричный характер [Sorrel et al., 2009], предложенный метод потребовал некоторой корректировки.

Первая задача настоящей статьи заключается в поиске аналитического решения дифференциального уравнения нефтедобычи именно в виде несимметричной колоколообразной кривой. Это обеспечит связь с физическими условиями, ясную интерпретацию коэффициентов кривой и более точное соответствие данным наблюдений. Практическим результатом анализа эмпирических данных с помощью полученной кривой станут долгосрочный прогноз добычи и оценка объема технически извлекаемых запасов на американских месторождениях сланцевой нефти.

Вторая задача статьи состоит в обзоре ключевых технологий и иных предпосылок, послуживших основой для «сланцевой революции» в США, выделении ключевого индикатора технологической эффективности добычи и построении долгосрочного прогноза ее развития. Предполагается, что технологическая кривая менее вариативна, чем объемы добычи, так как менее зависима от ценового фактора.

Исследование опирается на данные о добыче сланцевой нефти на семи ключевых месторождениях США за период с 2007 по 2017 г. (рис. 1), представленные в Отчете об эффективности бурения (Drilling Productivity Report) Управления энергетической информации США

Рис. 1. Размещение исследуемых месторождений сланцевой нефти на территории США



Источник: [EIA, 2018].

(Energy Information Administration, EIA) [EIA, 2018]. Итоговая добыча нефти описывается совокупностью показателей по отдельным формациям, а производительность буровых установок берется как средневзвешенное значение.

Технологические и институциональные факторы «сланцевой революции»

Стремительный рост добычи углеводородов из труднопроницаемых коллекторов в США обеспечен благоприятными технологическими и институциональными факторами. К числу первых можно отнести развитие технологий горизонтального бурения, многократного гидроразрыва пласта, новых средств и возможностей навигации при разработке сложных скважин, расширение спектра химических и физических методов воздействия на пласт для интенсификации притока углеводородов к забою скважины и т. д. Институциональные факторы охватывают гарантии прав собственности, прозрачный механизм доступа к нефтеносным участкам, наличие развитого рынка сервисных услуг, малого и среднего нефтегазового бизнеса, хорошую транспортную инфраструктуру и емкий финансовый рынок [Шафранник, Крюков, 2016].

Наращиванию нефтегазовым сектором США доли углеводородов, добываемых из нетрадиционных месторождений, предшествовал длительный путь создания и совершенствования нефтедобывающих технологий (табл. 1). В отсутствие прорывных изобретений за последние 10–15 лет совершенствовались существующие подходы к совмещению технологий горизонтального бурения, гидроразрыва пластов и трехмерной сейсмологии [Иванов, 2017а].

Повторный гидроразрыв пласта. По данным компании Halliburton, применение этой технологии на 80% увеличивает извлекаемые запасы и снижает себестоимость на 66%. В 2015 г. число стадий гидроразрыва достигло 50, а их плотность сокращена до 3 м. Концентрация проппанта увеличилась до 3 т/м. Длина горизонтального ствола превысила 3 км. Началось стимулирование добычи с помощью закачки углекислого газа после проведения гидроразрыва.

Кустовой метод бурения, используемый на 58% скважин, состоит в бурении на участке сети вертикальных скважин, а затем горизонтальных стволов. В результате на 15–30% снижается стоимость скважины и значительно сокращается продолжительность бурения.

Аналитические методы обработки трехмерных данных сейсмологии, «больших данных» и компьютерное моделирование развиваются в специализированных нефте- и газодобывающих компаниях, а также в технологических сервисных компаниях. Например, технология FracFit™ Baker Hughes позволяет собирать и анализировать данные для быстрого и эффективного заканчивания и стимулирования сланцевых скважин, обеспечивающие рост добычи на 45%.

Наряду с совершенствованием технологий добычи, ключевой предпосылкой «сланцевой революции» в США послужило развитие финансовых инструментов. Период высоких цен на нефть 2005–2014 гг. позволил сектору трудноизвлекаемой нефти привлечь значительные финансовые ресурсы с ведущих мировых рынков, дополнительным стимулом для этого послужила доступность активов в условиях проводимой Федеральной резервной системой политики поддержания низкой процентной ставки [Жуков, Золина, 2017]. В период ухудшения конъюнктуры в 2015–2017 гг. операции хеджирования ценовых рисков позволили не дать добыче сырой нефти в США опуститься ниже уровня июня 2014 г., когда цены превосходили 100 долл./барр. Гарантированный сбыт нефти по сравнительно высокой цене на падающем рынке поддержал финансовую устойчивость добывающих компаний в США и обеспечил им стабильный приток ликвидности.

Напротив, на растущем рынке хеджирование оказывается фактором, сдерживающим добычу. По данным Bloomberg, в 2018 г. 63% ожидаемой выручки захеджированы по средней цене 48.2 долл./барр. при фактической цене барреля марки WTI на начало года 64 долл. [Denning, 2017]. Таким образом, хеджирование на рынке нефти оказывается неэффективным при восходящем ценовом тренде, но обеспечивает стабильность работы компаний при понижающем.

Хеджирование послужило финансовым драйвером американской «сланцевой революции» и остается

Табл. 1. Основные этапы разработки ключевых технологий добычи трудноизвлекаемых углеводородных ресурсов в США

Год	Технология, применение
1929	Бурение первой горизонтальной скважины в Техасе
1947	Первый гидроразрыв пласта в Канзасе
1949	Первый экономически рентабельный гидроразрыв пласта в Оклахоме
1979	Начало разработки формации Барнетт, первый гидроразрыв пласта на сланцевых формациях
1986	Первый многостадийный гидравлический разрыв пласта на сланцевых формациях (семь стадий)
1992	Первое применение трехмерной сейсмологии в Техасе
1997	Первое применение реагента на водной основе для гидроразрыва пласта на формации Барнетт
2000	Бурение первой горизонтальной скважины на формации Барнетт
2002	Комбинация горизонтального бурения и гидроразрыва пласта на формации Барнетт

Источник: [Золина, 2014].

важнейшим элементом развитой институциональной бизнес-среды в США. К другим ее компонентам относятся следующие инструменты и характеристики [Шафранник, Крюков, 2016].

Устойчивый институт частной собственности на землю и недра. В США владельцу земельного участка изначально принадлежит право собственности на недра и связанную с ним геологоразведку, разработку месторождений и добычу полезных ископаемых, а хорошо проработанные нормы и механизмы упрощают и делают прозрачной процедуру получения доступа к участкам недр.

Крупнейший парк буровых установок, число которых в 2011 г. превысило 1800 одновременно функционирующих единиц. Большинство из них позволяют прокладывать протяженные горизонтальные скважины. Такое число установок превышает совокупный парк бывших советских республик, Саудовской Аравии и Канады. Отметим, что после того, как парк установок стабилизировался на уровне 800 единиц, прирост объемов бурения шел в основном за счет увеличения производительности установок по мере их обновления.

Инвестиционное и налоговое стимулирование для поддержания эксплуатации малодебитных скважин. Образовавшийся колоссальный фонд пробуренных скважин вкупе с полученными и систематизированными новыми знаниями послужил основой для перехода нефтегазового сектора США на новую траекторию развития.

Развитая транспортная инфраструктура, включая дорожную и специализированные сети — трубопроводы и терминалы со свободным и недискриминационным доступом.

Наличие множества независимых малых и средних нефтяных компаний, более гибких и готовых к риску работы с небольшими месторождениями и труднодоступными ресурсами. На долю таких игроков в США приходится почти 60% добычи углеводородов, благодаря чему за последние 20–30 лет коэффициент извлечения нефти в США вырос с 25–28 до 40%.

Смягчение экологических требований к проведению гидроразрывов. Под влиянием вице-президента США (ранее — исполнительного директора и председателя совета директоров компании Halliburton) Дика Чейни в 2005 г. Конгресс США вывел технологию гидроразрыва из-под надзора Агентства по охране окружающей среды (U.S. Environmental Protection Agency, EPA) и из-под действия федерального водного законодательства [Глушенкова, 2015]. Добыча сланцевой нефти в стране сосредоточена преимущественно в слабозаселенных районах несельскохозяйственных штатов: Оклахомы, Техаса, Невады и др. Однако и там разработка сланцевых месторождений может представлять угрозу для окружающей среды. Во-первых, в случае ненадлежащего соблюдения технологий возможно загрязнение питьевой воды, добываемой из подземных водоносных горизонтов. Во-вторых, нефтедобыча усугубляет нестабильность даже в сравнительно благополучных в сейсмическом отношении районах. В-третьих, она может

сопровождаться выбросами в атмосферу метана и других парниковых газов. В-четвертых, существуют риск загрязнения и просадки почвы в районах добычи и связанная с ним проблема очистки и утилизации бурового раствора и воды, используемой для гидроразрывов.

Институциональная среда, благоприятная для развития технологий добычи в США, способствовала освоению нетрадиционных залежей углеводородов, а «кривая обучения» обеспечила повышение нефтеотдачи пробуренных скважин (рис. 2).

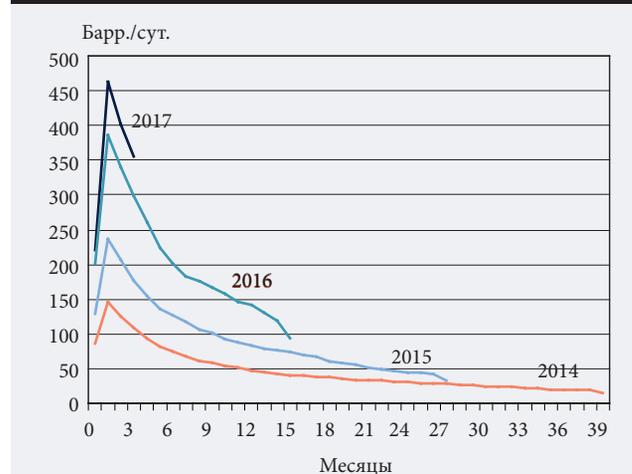
В рассмотренной ключевой формации Permian на протяжении периода наблюдения с 2007 г. нефтеотдача средней скважины непрерывно росла, и к 2017 г. новые дебиты превысили 450 барр./сут. Нефтеотдача усредненной скважины представляет собой репрезентативный показатель, характеризующий качество запасов углеводородов и интенсивность добычи, но не эффективность самого процесса бурения. Более комплексным является индикатор добычи нефти на одну буровую установку. Его большую доступность обеспечивает ежемесячный мониторинг по семи ключевым формациям, публикуемый в Отчете об эффективности бурения [EIA, 2018].

Динамика производительности буровых установок

Производительность буровых установок непосредственно отражается на уровне добычи нефти на сланцевых месторождениях США и технически извлекаемых запасов. Чем выше производительность, тем выше уровень добычи при том же числе активных установок.

Начиная с 2007 г. производительность средней буровой установки выросла в 15 раз, достигнув к концу 2017 г. 625 барр./сут. и продолжив расти (рис. 3). В условиях высоких цен на нефть в 2010–2014 гг. этот показатель рос благодаря технологическому фактору,

Рис. 2. Динамика добычи нефти из усредненной скважины на формации Permian в 2014–2017 гг.



Источник: составлено автором на основе [EIA, 2017].

Рис. 3. Средневзвешенная производительность буровых установок по семи месторождениям и числе буровых установок.



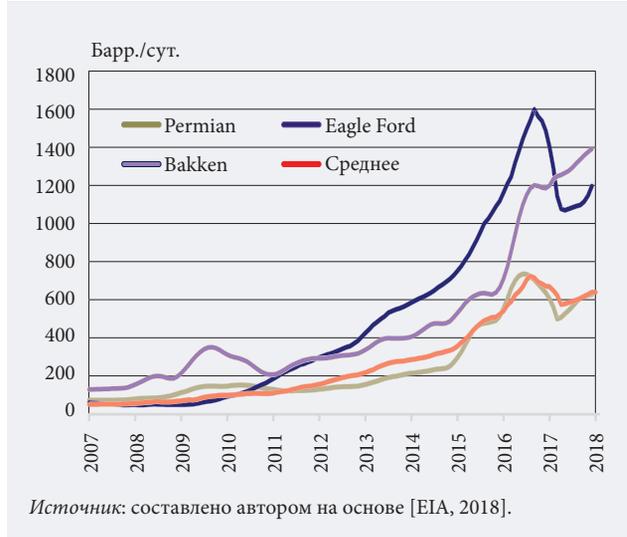
т. е. классическому распространению инноваций [EIA, 2016]. С конца 2014 г., рост производительности подталкивала также низкая цена на нефть.

В результате падения цен на нефть в 2014–2016 гг. число активных буровых установок сократилось с 1549 в октябре 2014 г. до 317 в мае 2016 г. Столь быстрое снижение обеспечило ускоренный рост производительности, к августу 2016 г. достигшей максимального значения в 711 барр./сут. в основном за счет циклических, а не технологических факторов [Rystad Energy, 2016]. В процессе сокращения объемов бурения и парка действующих установок разрабатывались наиболее перспективные участки и эксплуатировались лишь самые эффективные из буровых (*high grading*) [Hoza, 2015].

Восходящий ценовой тренд 2016 г. вызвал рост буровой активности начиная с июня. Однако наращивание парка действующих буровых установок, увеличение объемов бурения и разработка менее ценных участков повлекли за собой циклическое снижение производительности с 711 барр./сут. в августе 2016 г. до 586 барр./сут. в августе 2017 г. Стагнация буровой активности в свою очередь приостановила действие циклического фактора, и производительность вновь начала расти в силу долгосрочного технологического тренда, связанного с повышением эффективности добычи. Благодаря этому к концу 2017 г. она достигла 625 барр./сут.

Таким образом, в краткосрочной перспективе на производительность буровых установок в существенной степени влияют объем добычи и буровая активность (циклический фактор), тогда как долгосрочными факторами служат геологический (постепенное истощение месторождений) и технологический [Hughes, 2016]. Наряду с этим усредненная по месторождениям производительность буровых (рис. 4) зависит от четвертого фактора — пространственного. Он заключается в том,

Рис. 4. Производительность буровых установок на крупнейших месторождениях США и средневзвешенное значение по семи месторождениям

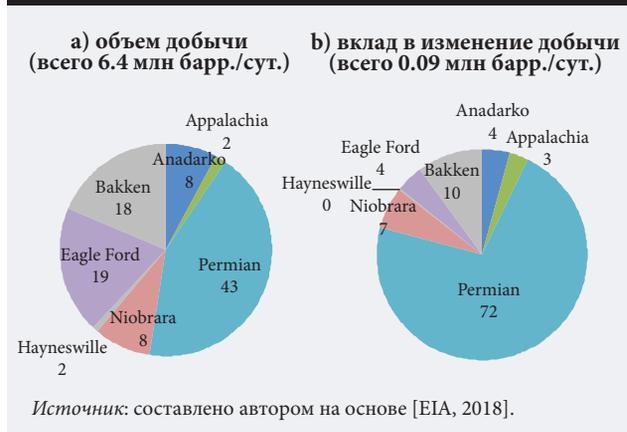


что уровни производительности буровых установок и объемы добычи варьируют между различными месторождениями с учетом скорости изменения их запасов.

На крупнейшем по объему производства месторождении США Permian в конце 2017 г. добывали 2.8 млн барр./сут., что составляет 43% совокупной добычи сланцевой нефти в стране (рис. 5). Более того, добыча на этом месторождении растет самыми быстрыми темпами, а вклад Permian в рост сланцевой нефтедобычи достигает 72%. Далее следуют месторождения Eagle Ford и Bakken (19 и 18% соответственно) и гораздо более скромным вкладом в рост добычи — 4 и 10%. Связано это с сокращением числа действующих буровых установок, а рост добычи происходит лишь за счет увеличения выработки на одну буровую.

Геологические особенности месторождений и степень их истощенности заметно различаются, что обуславливает существенный разброс уровней произ-

Рис. 5. Структура добычи по месторождениям США (по состоянию на декабрь 2017 г., %)



водительности буровых установок. Так, на наиболее ценном месторождении Permian производительность в конце 2017 г. оказалась близка к среднему значению — 614 барр./сут. при максимальных 1383 барр./сут. на Bakken и почти 1185 барр./сут. — на Eagle Ford. Впрочем, вклад столь высоких показателей нивелируется низкой буровой активностью на двух последних (рис. 5b), а потому средняя производительность по всем месторождениям близка к уровню Permian (см. рис. 4).

Пятым фактором эффективности буровых установок служит доля пробуренных скважин в стадии заканчивания — установки обсадной колонны, цементирования, перфорирования, гидроразрыва пласта и иных операций, которые позволяют начать добычу. Часть пробуренных скважин пополняют так называемый резерв (*backlog*) незаконченных скважин (*drilled but uncompleted, DUC*). Заканчивание скважин нередко откладывается из-за отсутствия доступного оборудования и расходных материалов, недостаточной экономической эффективности добычи или в силу спекулятивных причин [Rystad Energy, 2016]. К последним относятся рост цены на нефть или ускоренный ввод скважин в строй в случае нисходящего ценового тренда.

Объем резерва DUC в конце 2017 г. превысил 7 тыс. ед. [EIA, 2018], что порождает закономерные опасения по поводу существенного роста добычи при вводе этих скважин в эксплуатацию (заканчивании) на восходящем тренде цен на нефть [Иванов, 2017b]. Подобные ожидания сопряжены с высокой неопределенностью. Так, в настоящий момент невозможно оценить долю «сухих» DUC, т. е. непригодных для коммерческой добычи, себестоимость добычи из DUC, темпы развертывания флотов для проведения гидроразрывов, перспективы преодоления нехватки пропанта и логистических ограничений [IHS, 2015].

Динамика резерва скважин показывает тенденцию к увеличению в случае роста объемов бурения и добычи на фоне повышения цен на нефть. Обратная динамика наблюдалась лишь с февраля по ноябрь 2016 г., когда из-за недостаточных объемов бурения сократились очереди на аренду оборудования для проведения гидроразрывов: за 10 месяцев резерв уменьшился на 925 скважин, т. е. в среднем терял по 9.25 скважины в месяц. При среднем уровне добычи в 400 барр./сут. на скважину в 2016 г. добавленная добыча дала дополнительные 0.0037 млн барр./сут., что составило всего 1.5% новых дебитов за рассматриваемый период.

Как видим, из пяти факторов эффективности буровых установок в долгосрочной перспективе внимания заслуживают технологический (развитие технологий добычи) и геологический (истощение запасов углеводородов на месторождениях). Пространственный фактор и добыча из резервных скважин, как и вариации объемов добычи, по всей видимости, оказывают существенно меньшее влияние. В следующем разделе выдвигается гипотеза относительно формы кривой, характеризующей производительность буровых установок вслед за распространением технологических инноваций и геологическими изменениями.

Динамика производительности буровых установок на протяжении жизненного цикла месторождения

Классический подход к изучению распространения инноваций основан на концепции жизненного цикла технологий [Mansfield, 1968]. В ходе многочисленных исследований было установлено, что процесс проникновения (диффузии) инновационных продуктов лучше всего описывается логистической функцией, чей график представляет собой S-образную нелинейную кривую, которая выходит на определенный уровень насыщения [Little, 1981; Rogers, 2002]. Повышение производительности на ранних стадиях внедрения технологий происходит медленно, поскольку недостаток опыта требует значительных временных ресурсов на их освоение. Накопление опыта учеными, инженерами, менеджерами и бизнесменами запускает положительную обратную связь, ускоряющую диффузию инноваций и рост производительности.

Разработчики технологий прикладывают большие усилия для получения максимальной отдачи, однако со временем закон убывающей предельной полезности запускает отрицательную обратную связь. В результате достижения технологических пределов развития стоимость каждой единицы изменений экспоненциально возрастает и S-образная кривая сглаживается. Подобная динамика характерна для большинства отраслей, включая производство автомобилей, кораблей, двигателей внутреннего и внешнего сгорания, полупроводников, вакуумных кинескопов, дисководов и т. д. [Foster, 1986].

Однако существует множество ограничений в использовании S-образных кривых в качестве прогнозных инструментов [Schilling, Esmundo, 2009]. Во-первых, фактические пределы эффективности технологии редко известны заранее, и эксперты из разных компаний могут иметь различные мнения по этому вопросу. Во-вторых, неожиданные изменения на рынке, в дополняющих (замещающих) технологиях или в отдельных компонентах могут как ускорить, так и замедлить жизненный цикл технологии. В-третьих, S-образные кривые не описывают распространение инноваций одинаково хорошо во всех индустриях. Например, для ископаемых топлив (уголь, газ, нефть) технологии генерации энергии имеют вид не S-образных, а скорее колоколообразных кривых (рис. 6).

Такую форму кривой, описывающей производительность технологий добычи и использования ископаемых топлив, можно пояснить следующим образом. После достижения своего максимума производительность начинает снижаться под действием двух факторов: существенного замедления или стабилизации отдачи от внедрения инноваций и исчерпания кривой обучения, а также истощения месторождений и исчерпания привлекательных участков (*sweet spots*), что вынуждает бурить все глубже и разрабатывать все менее ценные месторождения с более низкими коэффициентами извлечения ресурсов [Montgomery, O'Sullivan, 2017].

Рис. 6. Технологические кривые для добычи и использования ископаемых топлив: производительность технологий (кВт/ч на 1 долл.) в сравнении с затратами на исследования и разработки, 1990–2005 гг.



Источник: [Schilling, Esmundo, 2009].

На неизбежное падение производительности бурения указывают и отраслевые консультанты: «Конечно, продолжительность роста производительности весьма неопределенна. Однако циклический компонент рано или поздно приведет к изменению растущего тренда производительности на нисходящий <...> рост производительности за счет выбора наиболее “лакомых” участков (*sweet spots*) скоро прекратится» [IHS, 2016].

Помимо истощения перспективных участков актуальной проблемой для сланцевых месторождений выступает сокращение расстояния между скважинами:

«Участок может быть разбурен лишь однажды. Кроме того, рост производительности ограничен расстоянием между соседними скважинами. Переуплотнение сетки скважин ведет к снижению их эффективности. Эмпирические данные показывают, что соседние скважины могут негативно влиять друг на друга. Хотя нефть может добываться более интенсивно за счет более близкого расположения скважин, коэффициент извлечения на одну скважину упадет, и добыча на данном участке не вырастет» [Hughes, 2016].

Таким образом, сформирована и проиллюстрирована гипотеза о том, что производительность буровых установок в пределах жизненного цикла месторождения может быть описана колоколообразной кривой. Далее будет выведена математическая формула несимметричной колоколообразной кривой, применимой к описанию добычи сланцевой нефти и динамики производительности буровых установок.

Несимметричная колоколообразная функция

Математическое описание эффективности технологий добычи нефти представлено в литературе, посвященной анализу и прогнозированию предложения углеводородов. В табл. 2 приведены классификация различных подходов к моделированию предложения и ссылки на источники с характерными примерами. Более полный обзор наиболее распространенных подходов можно найти в работе [Brandt, 2010].

Для целей настоящей статьи интерес представляет в первую очередь 4-й подход, а именно прогнозирование добычи с помощью подгонки колоколообразной кривой. В нашей предыдущей работе [Маланичев,

Табл. 2. Основные подходы к прогнозированию нефтедобычи

№	Подход	Характеристика подхода	Литература
1	Подгонка кривой естественного снижения добычи	Краткосрочный прогноз добычи из отдельных скважин. Учитываются геолого-технологические факторы	[Arps, 1944; Clark, 2011; Маланичев, 2017с]
2	Суперпозиция кривых естественного снижения добычи	Учитываются геолого-технологические и экономические факторы	[Sorrel et al., 2009; Маланичев, 2017b]
3	«Снизу вверх»	Основывается на планах по вводу новых участков или месторождений и эмпирических профилях добычи на них	[Sorrel et al., 2009]
4	Подгонка колоколообразной кривой	Долгосрочный прогноз добычи на месторождении. Учитываются геолого-технические факторы	[Hubbert, 1956; Semenychev et al., 2014; Маланичев, 2017а; Козлов, 2018]
5	Решение дифференциального уравнения с запаздывающим аргументом	Анализ условий возникновения экономических колебаний. Прогноз на основе аналитического решения дифференциального уравнения. Учитываются геолого-технические и экономические факторы	[Маланичев, 2018]
6	Эконометрический	Прогноз с учетом экономических факторов	[Kaufmann, Cleveland, 2001; Афанасьев, 2016; Ермолина, 2017]
7	Оптимальное планирование	Решение задачи оптимального планирования добычи с учетом временной стоимости денег	[Hotelling, 1931; Okullo et al., 2014]
8	Комбинированный	Сочетает подгонку колоколообразной кривой с экономическими факторами, например ценой нефти	[Benes et al., 2012; Золина, 2014; Ермолина, 2017]
9	Системно-имитационный	Учитывает множество связей между факторами и моделирует принятие инвестиционных решений производителями нефти	[Davidsen, 1990; Макаров и др., 2011]

Источник: составлено автором.

2017а] рассмотрен набор допущений для описания теоретической модели добычи нефти и производительности буровых установок с помощью симметричной колоколообразной кривой, предложенной в 1838 г. для моделирования численности населения [Verhulst, 1838], а впоследствии — для прогнозирования нефтедобычи в США [Hubbert, 1956].

Однако эмпирические данные указывают на несимметричный характер кривой добычи. Быстро нарастающая в начале эксплуатации месторождения, она затем достигает максимума и медленно сокращается. Такой несимметричный колоколообразный профиль с более пологой правой частью характерен как для традиционных [Bierman, Biryukov, 2017], так и для нетрадиционных [Coyne, 2017] месторождений углеводородов.

Для получения несимметричной колоколообразной кривой найдем аналитическое решение дифференциального уравнения добычи с учетом ряда упрощающих допущений [Маланичев, 2017а]. В случае добычи сланцевой нефти изменения включают освоение новых скважин, пробуренных в текущем месяце, и сокращение эксплуатации существующих скважин, пробуренных ранее рассматриваемого месяца. Этот баланс может быть описан с помощью обычного дифференциального уравнения первого порядка:

$$\frac{dq}{dt} = e \cdot N - b \cdot q, \quad (1)$$

где:

q — объем добычи нефти, млн барр./сут.;

$e \cdot N$ — добыча нефти из новых скважин, млн барр./сут.

Скважина считается новой по прошествии одного месяца после ее заканчивания и ввода в эксплуатацию;

e — производительность буровой установки, барр./сут.

Рассчитывается как количество баррелей нефти, которые были извлечены в течение месяца из скважин, пробуренных за это время одной установкой;

N — число активных установок, которые бурят новые скважины в данном месяце;

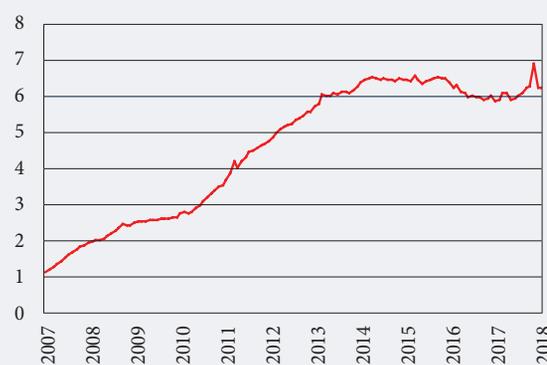
$b \cdot q$ — скорость естественного сокращения объемов добычи, соответствующая экспоненциальному закону ее снижения. В работе [Маланичев, 2017с] рассмотрены и другие законы, описывающие динамику снижения добычи, — гармонический и гиперболический;

b — эмпирический коэффициент скорости снижения добычи.

Отличительная особенность сланцевой нефти состоит в высокой скорости падения добычи из скважины — часто на 60–70% в первый год эксплуатации. Это отражается в повышенных значениях коэффициента естественного снижения добычи по сравнению с традиционной нефтью, где этот показатель варьирует в диапазоне от 2 до 14% в зависимости от месторождения при среднем значении 6.2% [Fustier et al., 2016].

Другой характерной чертой сланцевой нефти служит недостаточная точность экспоненциального закона естественного снижения добычи в ее случае по сравнению с гармоническим и гиперболическим законами [Clark, 2011; Маланичев, 2017с]. Тем не менее ис-

Рис. 7. Коэффициент скорости снижения добычи b (%)



Источник: составлено автором на основе [EIA, 2018].

пользование этих нелинейных законов в выражении (1) затрудняет интегрирование уравнения и требует дальнейшего исследования.

Для поиска аналитического решения уравнения (1) в виде несимметричной колоколообразной функции вводятся два упрощающих допущения относительно его коэффициентов.

Во-первых, следуя работам [Saussay, 2018; Козлов, 2018], принимаем коэффициент скорости снижения добычи b за переменную величину, что согласуется с данными наблюдений (рис. 7). Используем следующую спецификацию:

$$b = k \cdot (\gamma + 1) \cdot \left(\frac{Q}{EUR}\right)^\gamma, \quad (2)$$

где:

k и γ — положительные эмпирические коэффициенты;

Q — накопленная добыча, $q = dQ/dt$;

EUR (estimated ultimate recovery) — начальные извлекаемые ресурсы (сумма уже добытой нефти и технически извлекаемых ресурсов).

Отношение Q/EUR служит коэффициентом истощения ресурса со значением в диапазоне от 0 до 1. С истощением запасов на месторождении коэффициент скорости естественного снижения добычи постепенно возрастает (см. рис. 7).

Во-вторых, предполагаем, что новые дебиты $e \cdot N$ пропорциональны объему добычи q :

$$e \cdot N = k \cdot q. \quad (3)$$

Регрессионный анализ показывает значимую связь по критерию t -статистики между новыми дебитами и добычей (рис. 8). Константа регрессии близка к нулю и статистически неотличима от него.

Подстановка выражений (2) и (3) в уравнение (1) и его интегрирование по времени приводят к обыкновенному дифференциальному уравнению, описывающему временное изменение накопленной добычи:

$$\frac{dQ}{dt} = k \cdot Q \cdot \left(1 - \left(\frac{Q}{EUR}\right)^\gamma\right). \quad (4)$$

По форме это уравнение Бернулли, аналитическое решение которого представляет собой S-образную функцию Ричардса [Richards, 1959]:

$$Q(t) = \frac{EUR}{(c \cdot e^{-k \cdot \gamma t} + 1)^{\frac{1}{\gamma}}} \quad (5)$$

Дифференцирование этого выражения по времени дает несимметричную колоколообразную функцию:

$$q(t) = Q'(t) = \frac{c \cdot k \cdot EUR}{e^{-k \cdot \gamma t} \cdot (c \cdot e^{-k \cdot \gamma t} + 1)^{\frac{1}{\gamma} + 1}}, \quad (6)$$

где константы c , k , EUR и γ могут быть найдены путем подгонки кривой добычи под фактические данные, например, методом наименьших квадратов. Точка перегиба логистической кривой Q_{inf} , которая соответствует пику добычи, вычисляется по формуле:

$$Q_{inf} = \left(\frac{1}{1+\gamma}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \cdot EUR. \quad (7)$$

Согласно допущению (3) колоколообразная функция (6) использована для аппроксимации производительности буровых установок $e(t)$. Константы кривой c , k , γ и E (накопленная производительность, аналог EUR) найдены с помощью метода наименьших квадратов в ходе аппроксимации эмпирических данных производительности буровых установок, усредненных по семи сланцевым формациям в США за период 2007–2017 гг. [EIA, 2018]. Процедура оптимизации выполнена с использованием Excel Solver. Вычисления показали, что максимум производительности будет достигнут к 2026 г. и составит $e=1200$ барр./сут. (рис. 9).

Расчеты показывают, что развитие технологий добычи нефти позволит нарастить производительность буровых установок вдвое относительно текущего уровня. Физическую достижимость такой производительности подтверждают соответствующие показатели формаций Bakken, Eagle Ford (рис. 4) и Permian. Последняя при этом имеет еще и хорошие перспективы роста [Маланичев, 2017с].

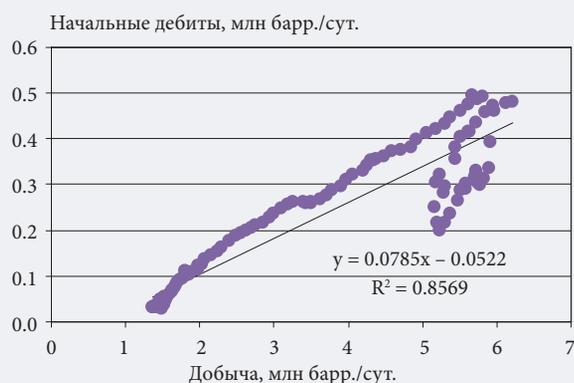
Если за число активных буровых установок принять текущий уровень ($N=800$ единиц), то согласно уравнению (3) пику их производительности будет соответствовать максимум добычи нефти (11.3 млн барр./сут.) и технически извлекаемых ресурсов (96 млрд барр.). Сходные значения представлены и в литературе: например, технически извлекаемые ресурсы составляют 92 млрд барр. [EIA, 2015].

Полученная оценка потенциала добычи сланцевой нефти совпадает с результатами применения колоколообразной кривой [Маланичев, 2017а], что подтверждает правильность расчетов. В рамках консервативного сценария роста мирового спроса в 1 млн барр./сут. потенциал наращивания добычи на сланцевых месторождениях в США будет выбран за 5 лет. Это может означать, что к 2023 г. их объемов начнет не хватать для удовлетворения мирового спроса на нефть и встанет вопрос о разработке других ресурсов с еще более высокой себестоимостью добычи.

Обсуждение и заключение

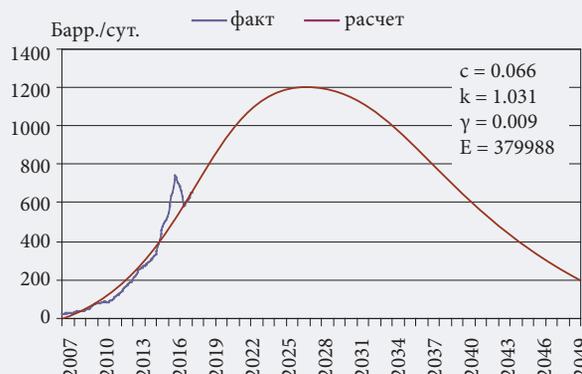
Добыча нефти на сланцевых месторождениях США в конце 2017 г. превысила 6.3 млн барр./сут. (6% мирового рынка нефти), явившись одним из ключевых факторов формирования нового рыночного баланса. «Сланцевая революция» стала возможной благодаря достаточным запасам разведанных углеводородных ресурсов в труднопроницаемых коллекторах, совершенствованию технологий добычи и ряду институциональных факторов. К последним относятся развитые конкурентные рынки нефтесервисных услуг, крупнейший парк буровых установок, устойчивый институт частной собственности на землю и недра, меры инвестиционного и налогового стимулирования разработки малодебитных скважин, современная транспортная инфраструктура, экологические требования, благоприятные для проведения гидроразрывов, эффективные финансовые рынки, включая биржевые страховые инструменты, и т. д.

Рис. 8. Корреляция между новыми дебитами и добычей за период 2007–2017 гг.



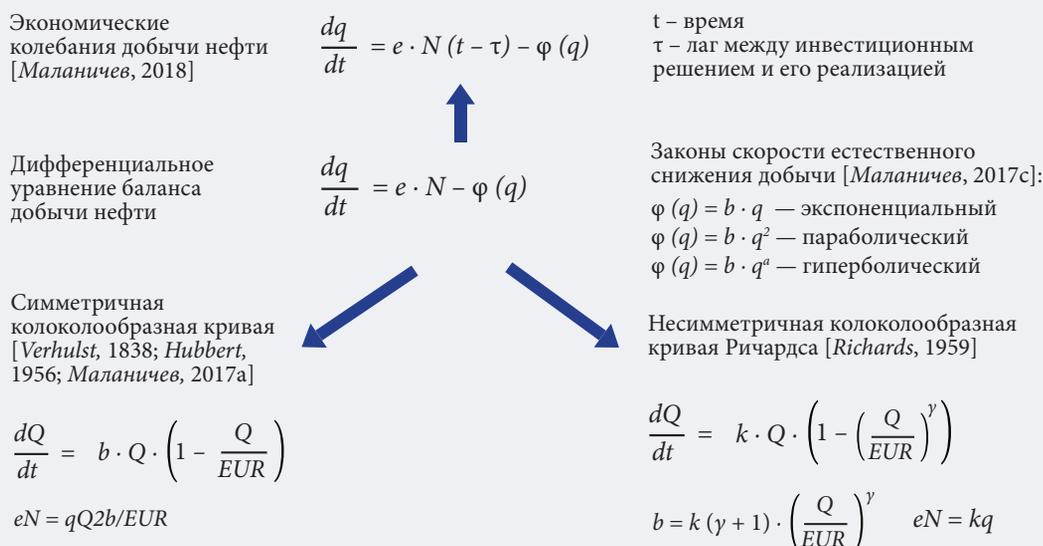
Источник: составлено автором на основе [EIA, 2018].

Рис. 9. Средняя производительность буровых установок



Источник: составлено автором на основе [EIA, 2018].

Рис. 10. Основные модели, следующие из дифференциального уравнения баланса добычи нефти



Источник: составлено автором.

Основные технологии добычи сланцевой нефти (горизонтальное бурение и гидроразрыв пласта) были разработаны еще в первой половине XX в. Их непрерывное совершенствование, внедрение многокустового бурения и многостадийного гидроразрыва, подбор оптимальной длины горизонтальных участков скважин и количества пропанта позволили существенно сократить себестоимость добычи сланцевой нефти и сделать ее коммерчески оправданной.

Ключевым фактором снижения себестоимости сланцевой нефтедобычи служит рост отдачи скважин. Так, на крупнейшей в США формации Permian новые средние по месторождению дебиты скважин непрерывно увеличивались — с 150 барр./сут. в 2014 г. до 450 барр./сут. в 2017 г. Более комплексно весь цикл добычи характеризует производительность буровых установок, к концу 2017 г. достигшая в среднем 625 барр./сут.

На производительность нефтяных буровых установок в США влияют пять основных факторов: развитие технологий добычи, истощение месторождений, неоднородность производительности по ним, эксплуатация резервных скважин и объем добычи. В долгосрочном периоде наиболее важными из них остаются развитие технологий и соответствующие им технически извлекаемые ресурсы.

В традиционных отраслях распространение технологических инноваций, обеспечивающих рост производительности, обычно описывается S-образными кривыми. Однако в добывающих отраслях, где развитие технологий имеет естественный предел в виде истощения природного ресурса, ситуация обстоит иначе. С развитием технологий производительность оборудования сначала растет, а затем снижается вслед за истощением ресурса на разрабатываемом участке. Сколь бы ни возрастали мощности приводов буровых

установок и нагнетательных насосов для гидроразрыва пласта, закон уменьшающейся отдачи и снижение запасов месторождения в конечном счете приводят к падению нефтедобычи и производительности буровых установок.

В настоящей статье была предпринята попытка разработать аналитический инструмент для долгосрочного прогнозирования добычи сланцевой нефти и оценки производительности буровых установок, который позволял бы оценить пределы роста этих показателей. В частности, в качестве аналитического решения дифференциального уравнения добычи (рис. 10) получена несимметричная колоколообразная функция, которая описывает долгосрочную динамику добычи нефти и производительности буровых.

Анализ эмпирических данных с помощью полученной несимметричной колоколообразной кривой показывает, что пик производительности буровых установок в среднем по месторождениям сланцевой нефти в США может быть достигнут к 2026 г. Он составит 1200 барр./сут., что вдвое превышает текущий уровень. При этом объем добычи достигнет 11,3 млн барр./сут., а технически извлекаемые ресурсы — 96 млрд барр. При таком развитии событий уже с 2023 г. может наметиться нехватка объемов добычи сланцевой нефти в США для удовлетворения растущего мирового спроса, что вынудит начать разработку иных ресурсов с еще более высокой себестоимостью.

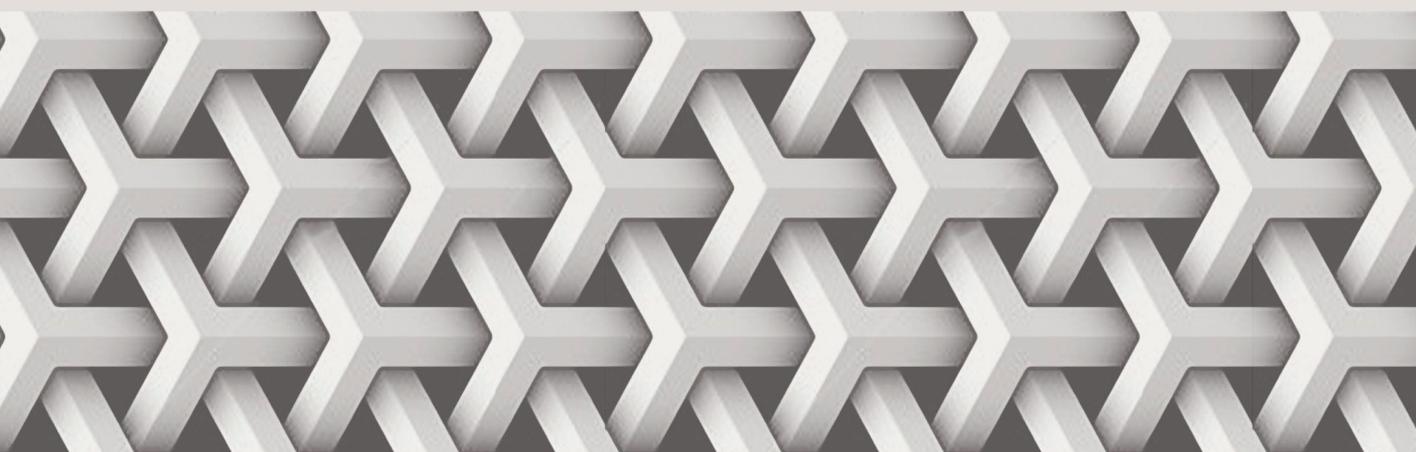
Теоретически обоснованная и протестированная на эмпирических данных несимметричная колоколообразная кривая может быть рекомендована в качестве одного из практических и эффективных инструментов для проведения Форсайт-исследований мирового нефтегазового комплекса с учетом перспективных технологических изменений.

Библиография

- Афанасьев А.А. (2017) Прогнозирование добычи нефти и газового конденсата в вычислимой модели денежного обращения российской экономики // Экономика и математические методы. Т. 53. № 2. С. 50–65.
- Глушенкова Е.И. (2015) Экологические последствия сланцевой революции // Запад – Восток – Россия. С. 184–189. Режим доступа: https://www.imemo.ru/files/File/magazines/Zapad_Vostok/2015/Acologosheskie%20posledstvia_Glushenkova.pdf, дата обращения 05.09.2018.
- Ермолина А. (2017) Моделирование предложения традиционной нефти на основе физических и экономических факторов (магистерская диссертация). М.: РЭШ.
- Жуков С.В., Золина С.А. (2017) Финансовый рынок — драйвер роста нефтедобычи в США // Экономика и организация промышленного производства. № 10 (520). С. 85–96.
- Золина С.А. (2014) Прогнозирование добычи трудноизвлекаемой нефти в США. М.: ИМЭМО РАН.
- Иванов Н. (2017а) Сланцы 3.0 // Нефтегазовая вертикаль. № 17. С. 12–20.
- Иванов Н. (2017b) Сланцевая нефть на мировом рынке: новые тенденции. Доклад для Пятой международной конференции «Глобальная энергетическая трансформация: экономика и политика», Москва, 15 декабря. Режим доступа: https://www.imemo.ru/files/File/ru/conf/2017/15122017/01_Ivanov.pdf, дата обращения 05.09.2018.
- Козлов А. (2018) Моделирование добычи сланцевой нефти на основе несимметричной колоколообразной кривой (магистерская диссертация). М.: РЭШ.
- Макаров А.А., Веселов Ф.В., Елисеева О.А., Кулагин В.А., Малахов В.А., Митрова Т.А., Филиппов С.П., Плакиткина Л.С. (2011) Модельно-информационный комплекс SCANNER. М.: ИНЭИ РАН.
- Маланичев А.Г. (2017а) Дифференциальное уравнение добычи сланцевой нефти // Нефть, газ и бизнес. № 2. С. 44–49.
- Маланичев А.Г. (2017b) Модели добычи сланцевой нефти в США для различных горизонтов прогнозирования // Нефть, газ и бизнес. № 3. С. 13–17.
- Маланичев А.Г. (2017с) Прогноз добычи нефти на залежи Permian на основе разностного уравнения // Проблемы экономики и управления нефтегазовым комплексом. № 12. С. 40–45.
- Маланичев А.Г. (2018) Прогноз добычи нефти на сланцевых месторождениях США на основе аналитических решений дифференциального уравнения с запаздывающим аргументом // Журнал Новой экономической ассоциации. № 2 (38).
- Шафранник Ю.К., Крюков В.А. (2016) Нефтегазовый сектор России: трудный путь к многообразию. М.; Новосибирск; Тюмень: «Перо».
- Arps J.J. (1944) Analysis of decline curves // AIME. № 160. P. 228–247.
- Baffes J., Kose, M.A., Ohnsorge F., Stocker M. (2015) The Great Plunge in Oil Prices: Causes, Consequences, and Policy Responses (PRN 15/01). Washington, D.C.: World Bank Group.
- Benes J., Chauvet M., Kamenik O., Kumhof M., Laxton D., Mursula S., Selody J. (2012) The Future of Oil: Geology versus Technology (WP/12/109). Washington, D.C.: International Monetary Fund.
- Bierman S., Biryukov A. (2017) Russia's Largest Oilfield May Be About to Gush Cash Once Again. Режим доступа: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-02-15/siberian-oil-giant-that-bankrolled-soviets-may-gush-cash-again>, дата обращения 05.09.2018.
- Brandt A.R. (2010) Review of mathematical models of future oil supply: Historical overview and synthesizing critique // Energy. Vol. 35. № 9. P. 3958–3974.
- Clark A.J. (2011) Decline Curve Analysis in Unconventional Resource Plays Using Logistic Growth Models. Austin, TX: The University of Texas in Austin.
- Coyne D. (2017) Future US Light Tight Oil (LTO) Update. Режим доступа: <http://peakoilbarrel.com/future-us-light-tight-oil-lto-update/>, дата обращения 05.09.2018.
- Davidson P.I., Sterman J.D., Richardson G.P. (1990) A petroleum life cycle model for the United States with endogenous technology, exploration, recovery, and demand // System Dynamics Review. Vol. 6. № 1. P. 66–93.
- Denning L. (2017) Will Oil Producers Do as They Say or Do as They Sell in 2018? Режим доступа: <https://www.bloomberg.com/gadfly/articles/2017-12-13/oil-producer-hedging-data-a-worry-for-opec>, дата обращения 05.09.2018.
- EIA (2015) World Shale Resource Assessments. Washington, D.C.: U.S. Energy Information Administration (EIA).
- EIA (2016) Expected decrease in Lower 48 oil production is partially offset by rising GOM output. Режим доступа: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=25892#>, дата обращения 05.09.2018.
- EIA (2017) U.S. crude oil production forecast expected to reach record high in 2018. Режим доступа: <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=32192>, дата обращения 05.09.2018.
- EIA (2018) Drilling Productivity Report (March). Washington, D.C.: U.S. Energy Information Administration (EIA).
- Foster R. (1986) Innovation. The Attacker's Advantage. New York: Summit Books.
- Fustier K., Gray G., Gundersen C., Hilboldt T. (2016) Global oil supply. London: HSBC Global Research.
- Hotelling H. (1931) The economics of exhaustible resources // Journal of Political Economy. Vol. 39. № 2. P. 137–175.
- Noza M. (2015) The limits of high grading. Режим доступа: <https://btuanalytics.com/the-limits-of-high-grading/>, дата обращения 05.09.2018.
- Hubbert M.K. (1956) Nuclear Energy and the Fossil Fuels Drilling and Production Practice // Proceedings of the Spring Meeting of the Southern District, Division of Production, American Petroleum Institute. San Antonio, TX: Shell Development Company. P. 22–27.
- Hughes J.D. (2016) Drilling Deeper. A Reality Check on U.S. Government Forecast for a Lasting Tight Oil & Shale Gas Boom. Santa Rosa, CA: Post Carbon Institute.

- IHS (2015) Still an Adolescent, Permian's Wolfcamp Delaware Offers Promising Adulthood as E&P Operators Expand Development, IHS Says. Режим доступа: <https://news.ihsmarket.com/press-release/energy-power-media/still-adolescent-permians-wolfcamp-delaware-offers-promising-adulth>, дата обращения 05.09.2018.
- Kaufmann R.K., Cleveland C.J. (2001) Oil production in the lower 48 states: Economic, geological, and institutional determinants // *Energy*. Vol. 22. № 1. P. 27–49.
- Little A.D. (1981) *The Strategic Management of Technology*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.
- Mănescu C.B., Nuño G. (2015) Quantitative effects of the shale oil revolution // *Energy Policy*. № 86. P. 855–866.
- Mansfield E. (1968) *The Economics of Technological Change*. New York: W.W. Norton & Company Inc.
- Montgomery J.B., O'Sullivan F.M. (2017) Spatial variability of tight oil well productivity and the impact of technology // *Applied Energy*. № 195. P. 344–355.
- Okullo S.J., Reynes F., Hofkes M.W. (2014) Modeling Peak Oil and the Geological Constraints on Oil Production. CentER Discussion Paper 2014–036. Tilburg: Tilburg University.
- Richards F.J. (1959) A Flexible Growth Function for Empirical Use // *Journal of Experimental Botany*. № 10 (29). P. 290–300.
- Rogers E. (2002) *Diffusion of Innovations* (5th ed.). New York: Free Press.
- Rystad Energy (2016) *North American Shale Report*. Oslo: Rystad Energy.
- Saussay A. (2018) Can the US shale revolution be duplicated in continental Europe? An economic analysis of European shale gas resources // *Energy Economics*. № 69. P. 295–306.
- Schilling M.A., Esmundo M. (2009) Technology S-curves in renewable energy alternatives: Analysis and implications for industry and government // *Energy Policy*. Vol. 37. № 5. P. 1767–1781.
- Semenychev V.K., Kurkin E.I., Semenychev E.V. (2014) Modelling and forecasting the trends of life cycle curves in the production of non-renewable resources // *Energy*. Vol. 75. Issue C. P. 244–251.
- Sorrel S., Speirs J., Bentley R., Brandt A., Miler R. (2009) *Global oil depletion. An assessment of the evidence for a near-term peak in global oil production*. London: UK Energy Research Centre.
- Verhulst P.F. (1838) Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement // *Correspondance mathématique et physique*. Vol. 10. P. 113–121.

ABSTRACTS



New Energy Sources, Technologies, and Systems: The Priority of Social, Climate, and Environmental Issues

Jürgen-Friedrich Hake

Professor, j.-f.hake@fz-juelich.de

Institute of Energy and Climate Research –IEK, Forschungszentrum Jülich,
Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich, Germany

Liliana Proskuryakova

Director, National Contact Centre for International Academic Mobility, lproskuryakova@hse.ru

Institute for Statistical Studies and Economics of Knowledge at the National Research University Higher School of
Economics (HSE ISSEK), 11 Myasnitskaya street, Moscow, 101000, Russian Federation

Abstract

The introductory article to the special issue “The Future of Energy” is devoted to promising areas of development of the global energy complex, the assessment of their contribution to overcoming global challenges, and ensuring sustainable development. The trends under consideration differ significantly in the rate of evolution. Prospective

development trajectories present both opportunities and risks specific to the fuel and energy complex of a particular country. Success in using emerging advantages and leveling threats depends upon a combination of internal and external factors, including the choice of public policy measures and the effectiveness of their implementation.

Keywords:

new energy sources; technology evolution; global challenges; trends; sustainable development; state energy policy

Citation: Hake J.-F., Proskuryakova L. (2018) New Energy Sources, Technologies, and Systems: The Priority of Social, Climate, and Environmental Issues. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no 4, pp. 6–9. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.6.9

Integrated Water-Energy Policy for Sustainable Development

Daniel Sklarew

Associate Professor, dsklarew@gmu.edu

Jennifer Sklarew

Adjunct Professor, jsklarew@masonlive.gmu.edu

College of Science, (George Mason University), Fairfax, Virginia, USA

Abstract

Numerous studies indicate a close interdependence between the water and energy industries given that energy production is usually characterized by high water-consuming capacity and that increasing water availability requires significant energy costs. The integration of energy and water policies at the global and national levels is seen as a tool for achieving sustainable development goals. The paper analyzes the opportunities for countries to ensure equal access to clean water and electricity due to such integration. The case studies of India, Ghana, and

Morocco illustrate how to achieve success when applying a nexus approach to water and energy policy.

This study offers unique contributions to the literature by providing a pioneering analysis of the relationship between global goals for energy and water access and national governments' abilities to develop synergistic energy and water policies. The proposed approach to integrating energy and water use could be applied throughout the full range of sustainable development goals and will be crucial for the success of countries in their implementation.

Keywords:

electricity access; clean energy; water access; clean water; Sustainable Development Goals; Energy-Water Nexus; natural resource management; United Nations

Citation: Sklarew D., Sklarew J. (2018) Integrated Water-Energy Policy for Sustainable Development. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no 4, pp. 10–19.
DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.10.19

New Technological Revolution and Energy Requirements

Sergey Filippov

Director, fil@eriras.ru

Energy Research Institute of Russian Academy of Sciences, 31–2, Nagornaya str., Moscow, 117186, Russian Federation

Abstract

The new technological revolution is radically changing the shape and development conditions of the world energy industry. The increase in demand for energy, alongside with changes in its structure, require the development of breakthrough technologies and the supply of new energy resources, which is associated with significant costs. To optimize them, a timely anticipation of the expected socio-economic changes and future energy requirements is needed.

This paper analyzes the possible implications of the new technological revolution for the global and domestic energy industries. It evaluates current and prospective trends, such

as changes in energy consumption due to growing demand from the service sector and households while reducing the needs of large-scale industry, digitalization, the formation of “mobile”, “portable” energy, and so on.

Russia will maintain demand for a centralized energy supply while increasing the demand for distributed generation and cogeneration with the involvement of renewable energy sources, smart grid technologies, and other solutions. The current structure of the national fuel and energy complex is vulnerable to the large-scale electrification of transport and decarbonization of world energy.

Keywords: scientific & technological progress; new technological revolution; post-industrial economy; post-industrial society; energy; energy demand; requirements to energy; energy technology; distributed energy; mobile energy

Citation: Filippov S. (2018) New Technological Revolution and Energy Requirements. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no 4, pp. 20–33. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.20.33

Energy Consumption of the Russian Road Transportation Sector: Prospects for Inter-Fuel Competition in Terms of Technological Innovation

Dmitriy Grushevenko

Research Fellow ^a; and Leading Expert ^b, grushevenkod@gmail.com

Ekaterina Grushevenko

Research Fellow ^a; and Expert ^c, e.grushevenko@gmail.com

Vyacheslav Kulagin

Head of Division ^a; and Director ^b, vakulagin@hse.ru

^a Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences (ERI RAS), 31, bldg 2, Nagornaya str., Moscow 117186, Russian Federation

^b Centre for Energy Studies, Institute of Pricing and Regulation of Natural Monopolies at the National Research University Higher School of Economics (HSE IPCREM), 7 Vavilova str., Moscow, 117312, Russian Federation

^c Energy Centre, 100, Novaya str., Skolkovo village, Odintsovsky District, Moscow Region, 143025, Russian Federation

Abstract

The development of production and consumption technologies for the road transport has led to large scale introduction of alternative energy in this sector. These alternatives to the conventional petroleum fuels include biofuels, electricity, natural gas and synthetic fuels produced from coal and natural gas. However, it is very important to point out, that inter-fuel competition is determined not only by the development of technologies, but also by such parameters as availability, fuel cost, consumer preferences and government legislations, all of which vary greatly across the globe. In other words, the very same technologies can be capable of radically altering the fuel mix in some countries while having little to none impact in the others. The topic of the inter-fuel competition development in the transportation sector holds much importance for Russia, as the country's fuels mix is almost totally dominated by the petroleum products. The diversification of energy sources

for transport may positively influence energy security and domestic fuels market stability; reduce the strain on ecology, especially in major cities; all the while increasing Russian oil and petroleum products export potential.

The article presents results of the research for prospects of the developments in Russian transport sector fuel mix. The research was carried out using the tools of economic and mathematical modeling under various scenario assumptions. The analysis has shown that natural gas and, to a lesser extent, electricity hold the best prospects as petroleum products substitutes in the long-term. Their cumulative share in the total energy consumption of the road transport sector has the potential of reaching as high as 26% by 2040. Yet, the extent of substitution largely depends on the government actions for infrastructure development and tax incentives for alternative vehicle owners.

Keywords: inter-fuel competition; road transportation; technological innovations; alternative fuels; energy consumption; scenario planning

Citation: Grushevenko D., Grushevenko E., Kulagin V. (2018) Energy Consumption of the Russian Road Transportation Sector: Prospects for Inter-Fuel Competition in Terms of Technological Innovation. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no 4, pp. 35–44. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.35.44

Applying Global Databases to Foresight for Energy and Land Use: The GCDB Method

Gilbert Ahamer

Senior Scientist, gilbert.ahamer@chello.at

Wegener Centre for Climate and Global Change, Graz University, Macherstrasse 15, 8047 Graz, Austria

Abstract

Any economy strongly depends on energy trends, which, as practice shows, are non-linear. This paper proposes an efficient method for predicting these trends. It is based upon a geo-referenced approach and combines a biosphere-energy model with a Global Change Data Base (GCDB). The advantage of the considered method over “pure modeling” lies in its heuristics, dealing with the real historical dynamics of techno-socio-economic systems. Newly emerging qualities and saturation effects will be better portrayed by the proposed method, which includes first and second derivatives. The novelty of the GCDB method

is in that it uses correlations of data series rather than data points. This allows for insights when contemplating swarms of data series and a heuristic examination of whether or not the widely-used hypothesis of path dependency in energy economics – and, more generally, in economic development – is applicable.

The author believes that the application of the GCDB method will increase the objectivity of the collected data, enrich the knowledge in the field of «growth theory», expand the knowledge base, and increase the efficiency of public policy related to climate change.

Keywords: energy foresight; global modelling; Global Change Data Base; scenarios; trends extrapolation; dynamics-as-usual scenario; biomass energy; land use change; saturation

Citation: Ahamer G. (2018) Applying Global Databases to Foresight for Energy and Land Use: The GCDB Method. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no 4, pp. 46–61. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.46.61

Assessing the Future of Renewable Energy Consumption for United Kingdom, Turkey and Nigeria

Nurcan Kilinc Ata

Postdoctoral Researcher and Project Analyst, nurcankilinc@yahoo.com

University of Stirling, Stirling FK9 4LA, UK

Abstract

The relationship between economic growth and renewable energy (RE) consumption has received enormous attention in the literature. However, there are diverse views about the causality and nature of this relationship. The paper investigates how RE consumption during power generation is affected by economic growth and electricity prices using data from 1990 to 2012. This is conducted by using three case study countries (United Kingdom, Turkey, and Nigeria). Then, a prediction

model is developed for the year 2030. The findings in this paper show that RE consumption, for the period under consideration, is significantly determined by income and electricity prices in the long run. These findings support the advantages of government policies encouraging the use of RE by implementing RE markets and RE portfolio standards to not only enhance the security and environmental concerns, but also from a macroeconomic point of view (stable economic growth).

Keywords: renewable energy; energy consumption; economic growth; forecasting; vector auto-regression; international comparisons; United Kingdom; Turkey; Nigeria

Citation: Kilinc-Ata N. (2018) Assessing the Future of Renewable Energy Consumption for United Kingdom, Turkey and Nigeria. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no 4, pp. 62–77. DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.62.77

Limits of Technological Efficiency of Shale Oil Production in the USA

Alexander Malanichev

Visiting Professor, a_malanichev@list.ru

New Economic School, Skolkovskoe str. 45, Moscow, 121353, Russian Federation

Abstract

The shale oil revolution in the United States had an irreversible impact upon the global oil market and was a key factor determining oil price reduction in 2014-2016. One of the main reasons for the rapid growth of the shale oil production in the US was the development of extracting technologies, which reduced the cost of production to an acceptable level. This article studies the problems of long-term forecasting in shale oil production and the productivity of drilling rigs. This research applies the fitting of an asymmetric bell-shaped function using an OLS approach. This function is derived as an analytical solution of the differential equation for oil production.

Another innovation of this study is the asymmetric function, which correlates better with data on the extraction of traditional and non-traditional oil resources. An analysis

of the empirical data with the derived asymmetrical bell-shaped curve shows that the productivity of drilling rigs will peak by 2026 at 1,200 bbl per day, which is 2 times higher than the current level. The peak of production would correspond to the maximum oil production of 11.3 mln bbl per day and to technically recoverable resources of 96 bln bbl. This could mean that starting from 2023, the volume of shale oil production in the US may not be enough to meet the growing global demand for oil and other resources with even higher production costs should be developed. The theoretically grounded and practically tested asymmetrical bell-shaped curve can serve as one of the tools for assessing the long-term impact of technological innovation and the growth of equipment productivity upon the development of oil production in the US in the course of Foresight studies.

Keywords: shale oil production; technological efficiency; institutional factors; bell-shaped curve fitting; rig productivity.

Citation: Malanichev A. (2018) Limits of Technological Efficiency of Shale Oil Production in the USA. *Foresight and STI Governance*, vol. 12, no 4, pp. 78–89.
DOI: 10.17323/2500-2597.2018.4.78.89



ISSN 1995-459X
9 771995 459777

Вебсайт



Website

Загрузите в
App Store



Download on the
App Store

Доступно в
Google Play



GET IT ON
Google Play