

Экономика природопользования

Потенциал биоэнергетики
в декарбонизации экономики России**Георгий Владимирович Сафонов**

ORCID: 0000-0001-6568-8318

Кандидат экономических наук, главный научный сотрудник, Европейский институт леса (Финляндия, Йозенсуу, 80100, Иллипистокату 6B).
E-mail: gvsafonov@gmail.com

Александра Леонидовна Дорина

ORCID: 0000-0003-2323-3053

Научный сотрудник Центра экономики окружающей среды и природных ресурсов, НИУ ВШЭ (РФ, 101000, Москва, Мясницкая ул., 20).
E-mail: abondarenko@hse.ru

Михаил Львович Козельцев

ORCID: 0000-0002-0817-430X

Кандидат экономических наук, директор Центра экономики окружающей среды и природных ресурсов, НИУ ВШЭ (РФ, 101000, Москва, Мясницкая ул., 20).
E-mail: mkozeltsev@hse.ru

Анастасия Алексеевна Семакина

ORCID: 0000-0003-4417-3432

Аспирант факультета мировой экономики и мировой политики, НИУ ВШЭ (РФ, 101000, Москва, Мясницкая ул., 20).
E-mail: ansemakina@gmail.com

Владимир Юрьевич Поташников

ORCID: 0000-0001-9237-3100

Старший научный сотрудник, Центр экономического моделирования энергетики и экологии, РАНХиГС (РФ, 119571, Москва, пр. Вернадского, 82–84).
E-mail: potashnikov@ranepa.ru

Аннотация

Россия является одним из крупнейших источников выбросов парниковых газов в мире, но обладает огромным потенциалом использования безуглеродных энергоресурсов, в том числе биотоплива. В рамках обязательств по Парижскому климатическому соглашению ООН для предотвращения роста глобальной температуры более чем на 1,5–2° С в текущем столетии Россия объявила о достижении углеродной нейтральности не позднее 2060 года. Анализ сценариев низкоуглеродного развития экономики России, проведенный с использованием модели TIMES-Russia, показал, что глубокая декарбонизация с минимальными издержками невозможна без использования биотоплива. Наряду с повышением энергоэффективности, развитием возобновляемой энергетики, применением технологий улавливания и захоронения углерода масштабное использование биоэнергетики позволяет уже к 2050 году добиться сокращения энергетических выбросов CO₂ на 80–90% в сравнении с уровнем 2010 года. Богатая природноресурсная база и современные технологии дают возможность увеличить производство биоэнергии до уровней, превышающих суммарную генерацию электроэнергии атомными и гидроэлектростанциями, уже к 2050 году. Конкурентные преимущества, которыми обладает Россия, позволяют стране занять лидирующее место на мировом рынке современного биотоплива, особенно в условиях зеленого энергетического перехода, декарбонизации мировой экономики, введения платы за выбросы углерода. Биоэнергетика не рассматривается как приоритетное направление в Энергетической стратегии России до 2035 года и планах низкоуглеродного развития до 2050 года. Результаты настоящего исследования позволяют более адекватно оценить потенциал биоэнергетики в выполнении обязательств по Парижскому соглашению и глубокой декарбонизации экономики России.

Ключевые слова: Парижское соглашение, парниковые газы, биотопливо, низкоуглеродное развитие.
JEL: D72, F53, O44, Q21, P20.

Модельные расчеты и разработка сценариев в настоящей работе выполнены в рамках гранта, предоставленного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение от 25.04.2022 № 075–15-2022-325). Авторы выражают благодарность М. Г. Сафонову, А. Г. Сизонову, А. В. Стеценко и другим коллегам за научный вклад в проведение данного исследования, обсуждение результатов и подготовку публикации.

Статья поступила в редакцию в сентябре 2022 года

Environmental Economics

Potential Role of Bioenergy in Decarbonizing Russia's Economy

Georgy V. Safonov

ORCID: 0000-0001-6568-8318

Cand. Sci. (Econ.), Principal Scientist,
European Forest Institute,^a
gvsafonov@gmail.com ORCID

Alexandra L. Dorina

ORCID: 0000-0003-2323-3053

Research Fellow, National Research University
Higher School of Economics,^b
abondarenko@hse.ru

Mikhail L. Kozeltsev

ORCID: 0000-0002-0817-430X

Cand. Sci. (Econ.), Director, Center for Environmental
and Natural Resource Economics, National Research
University Higher School of Economics,^b
mkozeltsev@hse.ru

Anastasiya A. Semakina

ORCID: 0000-0003-4417-3432

Postgraduate Student, Department of Global Economy
and Global Politics, National Research University
Higher School of Economics,^b
ansemakina@gmail.com

Vladimir Yu. Potashnikov

ORCID: 0000-0001-9237-3100

Senior Researcher, Russian Presidential Academy
of National Economy and Public Administration,^c
potashnikov@ranepa.ru

^a Yliopistokatu 6B, 80100 Joensuu, Finland

^b 20, Myasnitskaya, Moscow, 101000, Russian Federation

^c 82–84, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russian
Federation

Abstract

Russia is one of the world's chief emitters of greenhouse gases even though it has vast potential to use zero-carbon energy resources, particularly biofuels. In order to prevent global warming above 1.5–2° C, Russia announced its commitment under the UN Paris Agreement to reach carbon neutrality by 2060. Analysis of the low-carbon development scenarios based on the RU-TIMES model developed for Russia indicates that cost-effective pathways toward deep decarbonization of the national economy are not feasible without extensive use of biofuels. By 2050 bioenergy together with improved energy efficiency, solar and wind power, and carbon capture and storage technologies could result in CO₂ emissions from domestic energy production that are 80–90% less than in 2010. Russia's rich store of natural resources and innovative technologies offer opportunities to increase domestic production of bioenergy by 2050 to levels comparable with the output from all of its nuclear and hydropower plants. Russia's competitive advantages could make it a world leader in modern bioenergy markets, especially during the transition to green energy, decarbonization of the global economy, and international carbon pricing. However, developing bioenergy is not a priority for either the Russian Energy Strategy Through 2035 or the Low-Carbon Development Strategy Through 2050. This study provides more accurate estimates of the potential for bioenergy to fulfill Russia's Paris Agreement commitments and thoroughly decarbonize its economy.

Keywords: Paris Agreement, greenhouse gases, biofuel, low carbon development.

JEL: D72, F53, O44, Q21, P20.

Acknowledgements

The scenario modelling in this study was prepared under a research grant provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (ID: 075–15-2022-325). The authors are grateful to M. Safonov, A. Sizonov, A. Stetsenko and other colleagues for their contribution to this scientific research, discussion of the findings, and preparation for publication.

1. Мировая климатическая политика и Россия

Глобальное изменение климата является одним из важнейших экологических вызовов для человечества в XXI веке. Стремительный рост потребления ископаемых видов топлива, уничтожение лесных экосистем и другие антропогенные воздействия привели к увеличению концентрации углекислого газа в атмосфере на 50% и росту среднегодовой температуры на поверхности Земли на 1,1°С по сравнению с серединой XIX века¹. Дальнейшее развитие мировой экономики без учета климатических рисков, наращивание выбросов парниковых газов (ПГ) и сокращение углерод-депонирующего потенциала лесов грозит дополнительным ростом температуры и глобальным перераспределением осадков, что приведет к воздействию на здоровье населения, разрушению инфраструктуры, дефициту водных ресурсов, обострению проблемы продовольственной безопасности и другим катастрофическим последствиям. Потери для мировой экономики при отсутствии действенных мер по борьбе с климатическими изменениями могут составить в текущем столетии от 5 до 20% ВВП ежегодно [Stern, 2007]. Растущий ущерб от погодных катаклизмов подтверждается данными страховых компаний: по оценкам *Munich RE*, глобальные потери от ураганов и лесных пожаров в 2020 году уже достигли 210 млрд долл., что на 27% больше, чем годом ранее².

Важнейшим направлением международных усилий по борьбе с глобальным потеплением является снижение выбросов в атмосферу углекислого газа, метана и других парниковых газов, а также увеличение поглощения углерода в лесном и сельском хозяйстве. Рамочная конвенция ООН об изменении климата (РКИК), вступившая в силу в 1994 году, определяет основные механизмы координации национальных политик и мер в области климата. После завершения действия Киотского протокола к РКИК в 2020 году ключевым международным документом стало Парижское соглашение, одна из основных целей которого — сокращение объемов выбросов ПГ (декарбонизация) и достижение углеродной нейтральности мировой экономики в ближайшие десятилетия³. Сто-

¹ Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / V. Masson-Delmotte et al. (eds.), IPCC. Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2021.

² The Natural Disaster Figures for 2020. Munich RE, 2021. <https://www.munichre.com/en/company/media-relations/media-information-and-corporate-news/media-information/2021/2020-natural-disasters-balance.html>.

³ Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty / V. Masson-Delmotte et al. (eds.), IPCC. Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2018.

роны соглашения представили свои предложения о национальных вкладах по уменьшению воздействия на климатическую систему до 2030 года, однако пока предлагаемых мер по снижению нетто-выбросов ПГ недостаточно для достижения цели Парижского соглашения по сдерживанию роста температуры, требуются гораздо более значимые усилия. К 2030 году необходимо обеспечить дополнительное сокращение ежегодных объемов выбросов на 10–16 млрд тонн CO_2 -эквивалента для целевого показателя 2°C и на 25–30 млрд тонн CO_2 -эквивалента для целевого показателя $1,5^\circ\text{C}$ ⁴.

Достижение углеродной нейтральности требует реализации политик и мер во многих отраслях и секторах экономики, однако ведущую роль играет энергетика. Снижение потребления ископаемого топлива и увеличение использования безуглеродных источников энергии должно обеспечить наибольший вклад в сокращение глобальных выбросов ПГ. При этом биоэнергетика может сыграть исключительно важную роль на мировом уровне: по оценкам Международного энергетического агентства, в сценарии достижения нулевых нетто-выбросов к середине XXI века выработка энергии на основе биоэнергетических источников уже к 2030 году может превысить генерацию энергии на угольных электростанциях и стать сопоставимой с суммарной выработкой энергии на атомных, солнечных и ветровых электростанциях мира.

Россия является одним из крупнейших источников выбросов ПГ на планете. На долю энергетики приходится около 70% национальных выбросов парниковых газов, прежде всего связанных с добычей, транспортировкой и сжиганием ископаемых видов топлива⁵. Объявленная в 2021 году цель достижения углеродной нейтральности экономики России не позднее 2060 года⁶ потребует существенной трансформации энергетического баланса страны в пользу безуглеродных энергоисточников. Россия обладает огромным потенциалом по использованию биотоплива, которое позволит добиться существенного снижения выбросов ПГ уже к 2050 году.

Цель настоящего исследования состоит в разработке долгосрочных сценариев низкоуглеродного развития в отраслях экономики России, связанных с производством и потреблением энергии, на которые приходится более 80% ежегодных выбросов CO_2 , с учетом роли биоэнергетического сектора. Основной акцент в работе сделан на потенциале снижения антропогенных выбро-

⁴ Emissions Gap Report 2021: The Heat Is On — A World of Climate Promises Not Yet Delivered. Nairobi. UN Environment Programme. 2021.

⁵ The National GHG Inventory Submission to the UNFCCC by the Russian Federation, 2022. <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2022>.

⁶ Россия будет добиваться углеродной нейтральности к 2060 году. <https://news.un.org/ru/story/2021/10/1411842>.

сов CO₂ до 2050 года в электроэнергетике, черной металлургии, нефтегазовом секторе, ЖКХ, транспорте и ряде других секторов экономики. Вопросы депонирования парниковых газов в лесном и сельском хозяйстве в исследовании не рассматриваются, однако они имеют важное значение для климатической политики России с учетом ее огромных лесных и земельных ресурсов⁷.

В работе используется репрезентативная энергетическая модель частичного равновесия TIMES-Russia, подготовленная на базе модельного комплекса, разработанного в рамках программы ETSAP Международного энергетического агентства⁸. Российская версия модели TIMES была сформирована и откалибрована специалистами РАНХиГС с участием экспертов НИУ ВШЭ, в том числе были разработаны сценарии долгосрочного развития экономики России. На основе официальных данных, прогнозов и стратегий развития экономики и отдельных отраслей, докладов международных организаций сформулированы сценарии развития до 2050 года, направленные на значительное сокращение выбросов парниковых газов, определены технологии и ресурсный потенциал, необходимые для успешной декарбонизации российской экономики с обеспечением роста ВВП и благосостояния населения страны. Проанализированы основные направления декарбонизации до 2050 года, которые позволят выполнить национальные климатические цели, заявленные в Парижском соглашении.

2. Обзор литературы

Сценарии глубокой декарбонизации экономики разрабатываются многими странами мира. Один из первых международных научных проектов в этой области был инициирован в 2013 году по предложению бывшего генерального секретаря ООН Пан Ги Муна (Deep Decarbonization Pathways Project). Полученные результаты были опубликованы в ряде докладов⁹, а также использованы при подготовке некоторых положений Парижского соглашения. Разработанные в рамках проекта методологии стали основой

⁷ По данным Национального кадастра выбросов и абсорбции парниковых газов РФ, нетто-поглощение углерода лесами составляет около 600 млн тонн CO₂ в год, а объем антропогенных выбросов ПГ достигает примерно 2200 млн тонн CO₂-эквивалента в год (по состоянию на 2020 год). Природно-климатические и антропогенные факторы, включая лесные пожары, болезни и вредителей леса, заготовку древесины, незаконные рубки, в перспективе до 2050 года будут оказывать негативное влияние и сокращать потенциал лесов по депонированию углерода [Замолдчиков, Краев, 2016].

⁸ Методологические и другие материалы об оригинальной модели TIMES представлены на веб-сайте: <https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/times>.

⁹ См., например: Deep Decarbonization Pathways 2014 Report. Paris: IDDRI, 2014; Deep Decarbonization Pathways 2015 Synthesis Report. Paris: IDDRI, 2015.

для проектирования сценариев декарбонизации в десятках стран мира [Waisman et al., 2020], а научные результаты легли в основу национальных стратегий достижения углеродной нейтральности Германии, США и ряда других стран).

Дальнейшие исследования потенциала глубокой декарбонизации ведущих экономик мира продолжились в рамках крупных международных научных проектов, таких как CD-LINKS, ENGAGE, COMMIT. Результаты этих исследований опубликованы в ведущих научных журналах мира [Den Elzen et al., 2016; Fragkos et al., 2020; Luderer et al., 2018; Pahle et al., 2021; Rogelj et al., 2016; Schaeffer et al., 2020]. Международное энергетическое агентство регулярно публикует доклады, содержащие долгосрочные прогнозы развития мировой энергетики, среди которых в последние годы рассматривается и сценарий нулевых нетто-выбросов парниковых газов. Роль биоэнергетики, представленная в таком докладе, например, в 2022 году, требует более глубокого обсуждения, поскольку основной акцент в нем сделан на глобальный, а не на страновой уровень, и многие аспекты развития биоэнергетического сектора не учтены.

Исследования в области оценки потенциала низкоуглеродного развития экономики России проводятся рядом научных групп, в том числе в рамках международных проектов с участием экспертов НИУ ВШЭ [Safonov et al., 2020], в работах «Центра энергоэффективности — XXI век» [Башмаков, 2020], РАНХиГС [Луговой и др., 2015; Laitner et al., 2020], совместных исследованиях специалистов НИУ ВШЭ и MIT [Makarov et al., 2020], экспертов в области энергетики [Makarov et al., 2020]. Однако роль биоэнергетического потенциала в декарбонизации российской экономики в этих исследованиях освещается недостаточно глубоко.

Стратегии развития экономики и энергетики, официально принятые в России, не учитывают биоэнергетические ресурсы в качестве существенного фактора развития, а Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации определяет «увеличение доли возобновляемых источников энергии в глобальном энергетическом балансе» (ст. 9е) и «усилия по реализации климатической политики и переходу к зеленой экономике» (ст. 10) в качестве рисков для национальной энергетической безопасности. При этом еще в 2004–2005 годах Минобрнауки России завершило работу по составлению перечня приоритетных направлений технологического развития, в котором критическими технологиями для Российской Федерации были определены, в частности, технологии производства топлива и энергии из органического сырья, новых и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [Соколов, 2007]. В результате анализа выполнения программы развития биотехнологий

в Российской Федерации на период до 2020 года, где одним из направлений было определено развитие технологий биоэнергетики, установлено, что практически ни одна первоначально поставленная цель не была достигнута, что связано не только с изменившимися экономическими условиями, но и с низким приоритетом этого направления для государства [Boyarov et al., 2021].

По имеющимся оценкам, в России задействовано лишь около 12% имеющихся биоэнергетических ресурсов, которые оцениваются сегодня в 30% суммарного потребления тепловой и электрической энергии [Namsaraev et al., 2018]. Доля биотоплива в выработке энергии на возобновляемых источниках в стране составляет около 80% [An et al., 2019]. В ряде регионов России потенциал использования биотоплива существенно превышает внутреннее потребление тепла и электроэнергии [Безруких и др., 2007]. Возможности экспорта биотоплива из России анализируются, например, в работе [Vasiliev et al., 2019].

3. Методология исследования и данные

Для анализа ключевых секторов российской экономики, на которые приходится около 80% общих выбросов CO₂, была использована модель TIMES-Russia. TIMES — модель частичного равновесия, в которой применяется линейное программирование для построения траектории развития энергосистемы в долгосрочной перспективе с заданными целевыми показателями (например, уровнем выбросов ПГ, суммарным потреблением энергии и др.). Модель охватывает все энергетические процессы: от добычи ресурсов, транспортировки, распределения и преобразования энергии до предоставления услуг конечным потребителям. В ней представлены основные отрасли и секторы экономики России, включая производство электроэнергии и тепла, металлургию, цементную, химическую и нефтехимическую промышленность, фонд жилых зданий и коммерческой недвижимости, транспорт¹⁰.

Составными элементами энергетической системы, которая анализируется в модели, являются: (1) технологии в виде материальных объектов (добыча полезных ископаемых, предприятия по переработке), которые преобразуют сырье в энергоносители и другие продукты; (2) сырьевые товары, включая топливо, энергетические услуги, материалы, денежные потоки и выбросы ПГ; (3) потоки, связывающие товары и услуги.

Модель предполагает, что все инвестиционные решения принимаются с полным знанием будущих событий. Модель оптими-

¹⁰ Полная документация модели TIMES представлена в [Loulou, 2005].

зирует траектории достижения целей, поставленных на будущие периоды, и рассчитывает оптимум производства и потребления энергии по секторам и по рассматриваемым периодам времени, при этом экзогенно задаются такие параметры, как суммарный объем производства и потребления энергии, материалов, услуг и др. Результаты моделирования включают оптимальное с точки зрения затрат сочетание используемых технологий и энергетических ресурсов в каждый расчетный период, а также соответствующие выбросы ПГ.

Расчеты в TIMES-Russia учитывают цель снижения выбросов парниковых газов в России к 2050 году, которая определяется по нескольким сценариям (официально утвержденной национальной цели на 2050 год в стране пока нет). Отраслевые целевые показатели и технологические ограничения определены на основе принятых стратегий развития, планов и программ крупных корпораций, занимающихся добычей ископаемого топлива, атомной энергетикой, гидроэнергетикой и т. д. Однако большинство сценариев предусматривают трансформацию отраслей, выходящую за рамки действующих стратегий (определяемых до 2030–2035 годов), поэтому в модели используются экспертные предположения и международные прогнозы на период после 2035 года, в том числе в отношении технических и экономических показателей развития технологий в энергетике, промышленности и других отраслях¹¹.

В модели прогнозируются объемы добычи ископаемого топлива и производства других видов энергоресурсов, выработки электроэнергии и тепла, переработки нефти, потребления энергии жилыми зданиями и коммерческой недвижимостью, транспортом (наземным, авиационным и железнодорожным) и промышленностью (прежде всего предприятиями черной металлургии, производства цемента). Спрос на конечную продукцию определяется эндогенно и представлен объемом потребления электроэнергии и тепла, услугами транспорта и промышленной продукцией. Экспорт ископаемого топлива и спрос определяются в модели экзогенно.

Основной источник данных по фактическим выбросам ПГ — Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), данных по социально-экономическим показателям, производству и потреблению энергии — Федеральная служба государственной статистики (Росстат), данных об энергетических балансах и перспективных технологиях — доклады МЭА и Всемирного банка. Также были использованы экспертные оценки

¹¹ Например, перспективы развития энергетических технологий представлены в периодических докладах Международного энергетического агентства.

специалистов ведущих отраслевых институтов и научных центров, например содержащиеся в [Makarov et al., 2020].

4. Сценарии декарбонизации экономики России

Историческая динамика выбросов парниковых газов

Россия является крупнейшим по площади государством в мире и играет важную роль в глобальном климате: покрытые лесом территории составляют 871 млн га (20% мировых лесов), сельскохозяйственные угодья занимают 221 млн га (10% пахотных земель в мире), а запасы ископаемого топлива превышают 350 млрд т в нефтяном эквиваленте (тнэ), или 14 653 ЭДж. Россия входит в пятерку стран — мировых лидеров по объемам выбросов ПГ¹². Выбросы ПГ в России достигли пика в 1990 году, составив 3089,1 млн тонн CO₂-эквивалента, или 17% суммарных выбросов ПГ стран, включенных в Приложение I РКИК ООН.

С 1990 по 2000 год объем выбросов ПГ в России снизился на 54% вследствие глубокого экономического кризиса, спада промышленного производства, демилитаризации и реструктуризации экономики, расширения сектора услуг (с 20 до более чем 50% ВВП), увеличения поглощающей способности лесов, вызванного сокращением лесозаготовок. Восстановление российской экономики в 2000-х годах было обусловлено в первую очередь увеличением доходов от экспорта ископаемых видов топлива, ме-

Т а б л и ц а 1

Выбросы парниковых газов в России по основным категориям, 1990-2020 годы (млн т CO₂-экв. в год)

T a b l e 1

Greenhouse Gas Emissions in Russia by Principal Categories, 1990-2020 (Mt CO ₂ -eq. per year)					
	1990	2000	2010	2020	Изменения в 2020 по сравнению с 1990 (%)
Сжигание топлива	2291,6	1308,0	1414,2	1380,9	−40
Летучие эмиссии метана	285,5	213,6	225,1	216,8	−24
Промышленность	285,1	197,7	197,8	241,7	−15
Сельское хозяйство	247,5	118,9	103,5	116,6	−53
Лесное хозяйство	−226,1	−594,6	−749,8	−622,3	+175
Другие источники	205,5	183,7	100,7	148,5	−28
Всего	3089,1	1427,3	1291,5	1482,2	−52

Источник: Национальный кадастр антропогенных выбросов из источников и абсорбции поглотителями парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, за 1990–2020 годы. М.: Росгидромет, 2022.

¹² World Bank, Total Greenhouse Gas Emissions Database.

таллов, удобрений и другой углеродоемкой продукции. В период 2000–2020 годов, несмотря на существенный рост промышленного производства (в отдельные годы — на 7–12%), суммарные выбросы ПГ выросли незначительно и к 2020 году достигли 48% от уровня 1990 года. За период с 1990 по 2020 год структура выбросов ПГ в России существенно изменилась: выбросы от сжигания топлива снизились на 40%, утечки и другие эмиссии метана — на 24%, от промышленных процессов — на 15%, от сельского хозяйства — на 53%, от других отраслей — на 28%, а поглощение ПГ лесами увеличилось почти в 3 раза (табл. 1).

Планы низкоуглеродного развития

Национальная стратегия социально-экономического развития и отраслевые стратегии России до 2030–2035 годов не предусматривают каких-либо амбициозных целей по снижению выбросов ПГ. Заявленная в Национальном сообщении о вкладе в реализацию Парижского соглашения цель предполагает, что к 2030 году выбросы ПГ не превысят 70% от показателя 1990 года¹³. Фактически это означает, что в ближайшее десятилетие выбросы могут вырасти более чем на 50% по сравнению с нынешним уровнем. Энергетическая стратегия России до 2035 года предполагает значительное увеличение добычи, сжигания и экспорта ископаемых энергоресурсов, при этом выбросы ПГ могут существенно возрасти, поскольку никаких целевых мер по декарбонизации энергетики (например, внедрения технологий улавливания и захоронения углерода) в ней не предусмотрено, в то время как возобновляемые источники энергии (за исключением крупных гидроэнергетических мощностей) и использование биотоплива, как предполагается, сохранят незначительную долю в общем производстве энергии.

В 2021 году Минэкономразвития России была разработана и затем утверждена Правительством РФ Стратегия экономического развития с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 года, в которой предложены два основных сценария развития — инерционный и интенсивный. В последнем предполагается, что нетто-выбросы ПГ могут быть снижены к 2050 году более чем на 80% по сравнению с нынешним уровнем, однако не уточняется, за счет каких мер такое сокращение может быть достигнуто. В июне 2021 года президент В. В. Путин поставил более амбициозную национальную цель по сокращению выбросов ПГ к 2050 году: совокупные

¹³ The Nationally Determined Contribution of the Russian Federation Under the UNFCCC Paris Agreement. 2020.

выбросы в 2021–2050 годах не должны превышать выбросы ЕС за тот же период.

Макроэкономические и отраслевые исследования показывают, что в России есть огромный потенциал сокращения выбросов ПГ при довольно низких и даже отрицательных затратах. Компания *McKinsey* проанализировала 60 мер в различных секторах, которые позволяют снизить потребление энергии на 23% и выбросы ПГ на 19% к показателям 2030 года по сравнению со сценарием инерционного развития¹⁴. Инвестиции в размере 0,8–1,2% ВВП в год дают возможность уже к 2050 году повысить энергоэффективность, реализовать меры по декарбонизации ключевых отраслей и перейти на низкоуглеродную траекторию развития экономики России [Safonov et al., 2020].

Результаты моделирования

Сценарии сокращения выбросов ПГ в российской экономике были проанализированы с использованием модели TIMES-Russia, данных официальных стратегий социально-экономического развития, отчетов международных организаций и отраслевых экспертных оценок.

В рамках исследования проведено моделирование следующих основных сценариев.

Сценарий 1. Продолжение существующей политики (CPol) предполагает дальнейшее развитие экономики без изменений энергетической стратегии и без специальных мер по декарбонизации экономики. Цель по выбросам ПГ, установленная на 2030 год как непревышение уровня 70% от показателя 1990 года, остается неизменной до 2050 года. Рост ВВП предполагается на уровне 3% в год в среднем на период до 2050 года.

Сценарий 2. Усиление мер углеродного регулирования (AdvPol) предполагает принятие новых целей снижения выбросов ПГ к 2050 году — на 75% от показателя 1990 года за счет масштабного повышения энергоэффективности, использования потенциала ВИЭ, производства биотоплива, электрификации конечного потребления энергии в транспорте, промышленности, ЖКХ и других мер декарбонизации. Рост ВВП предполагается на уровне 3% в год в среднем на период до 2050 года.

Сценарий 3. Глубокая декарбонизация (DDPol) предполагает сокращение выбросов к 2050 году на 90% по сравнению с уровнем 1990 года за счет активных действий по ускоренной замене уста-

¹⁴ Pathways to an Energy- and Carbon-Efficient Russia. Moscow: McKinsey and Company, 2009. <https://www.mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/pathways-to-an-energy-and-carbon-efficient-russia>.

ревших технологий на более современные и энергоэффективные, переходу с угля, нефти и газа на безуглеродные источники энергии, включая биотопливо, ВИЭ, технологии улавливания и захоронения углерода (carbon capture and storage, CCS), электрификации конечного потребления в масштабах экономики страны. Рост ВВП предполагается на уровне 3% в год в среднем на период до 2050 года.

Сценарий 4. Глубокая декарбонизация с высоким ростом ВВП (DDPol-high-growth) предполагает сокращение выбросов ПГ к 2050 году на 90% по сравнению с уровнем 1990 года за счет политик и мер, соответствующих сценарию 3, но с учетом более высоких, опережающих темпов роста ВВП (в среднем 4,5–5% в год до 2050 года).

Основные условия рассматриваемых сценариев.

1. Показатели долгосрочного социально-экономического развития в стране соответствуют основным параметрам, заложенным в Стратегию социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов ПГ до 2050 года.

2. Экспорт угля (в натуральном выражении) до 2050 года остается неизменным на текущем уровне в сценарии 1, снижается на 50% в сценарии 2 и падает до нуля в сценариях 3 и 4. Экспорт нефти до 2050 года остается на текущем уровне в сценариях 1 и 2, сокращается на 75% в сценариях 3 и 4. Экспорт природного газа возрастает к 2050 году на 50% в сценариях 1 и 2, на 25% — в сценариях 3 и 4. На динамику экспорта окажут влияние внутренние факторы развития соответствующих отраслей (истощение легко извлекаемых запасов, ухудшение условий эксплуатации месторождений и др.), технологические, финансовые, логистические и иные санкции, а также меры по декарбонизации мировой экономики и зеленому энергопереходу, принимаемые в соответствии с Парижским соглашением и Целями устойчивого развития ООН.

3. Международные углеродные рынки, трансграничное углеродное регулирование, налоги на выбросы углерода оказывают влияние на спрос на ископаемое топливо, стоимость технологий, процессы дивестиций из углеродоемких производств, перетока инвестиций в зеленые технологии, на доступ к капиталу для экологически ориентированных проектов (в сценариях 2 и 3).

4. Технологические изменения в энергетической сфере (доступность различных технологий, снижение стоимости производства энергии и др.) происходят согласно прогнозам Международного энергетического агентства до 2050 года.

5. Дальнейшее снижение издержек в солнечной и ветровой энергетике, безуглеродном транспорте, рост спроса на биотопливо и зеленый водород, поэтапный отказ от угля на глобальном

уровне (спрос на газ и нефть рассматривается по-разному в зависимости от сценария), неизменный уровень издержек в атомной и крупной гидроэнергетике, высокая себестоимость производства энергии с использованием технологий CCS до 2030 года с последующим снижением затрат.

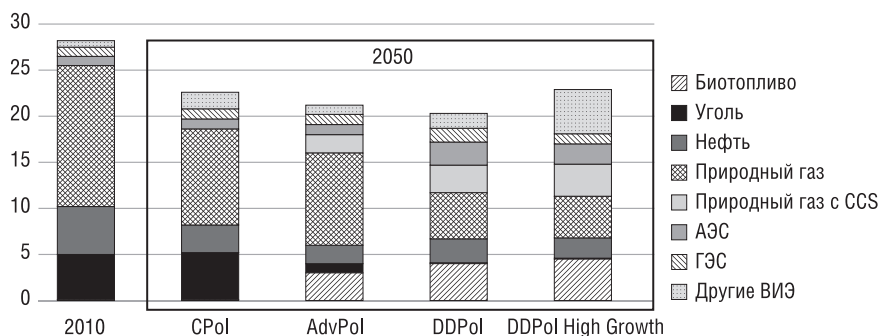
При заданных целях по декарбонизации суммарное производство первичной энергии снизится к 2050 году во всех рассматриваемых сценариях (рис. 1). В сценарии 1 суммарные выбросы ПГ несколько снизятся по сравнению с уровнем 2010 года, прежде всего за счет уже принятых мер по повышению энергоэффективности, энергосбережению, экологизации транспорта, внедрению новых технологий и материалов в строительстве, отраслях промышленности, при этом не осуществляются никакие специальные меры по развитию биоэнергетики, а основными энергоисточниками по-прежнему остаются уголь, нефть и природный газ.

В сценарии 2 производство первичной энергии снижается еще больше, чем в сценарии 1, при этом радикально меняется его структура: потребление биотоплива растет и вытесняет уголь, который почти полностью исчезает из энергобаланса, производство нефти и нефтепродуктов снижается примерно в 5 раз по сравнению с показателями 2010 года, доля природного газа существенно растет, при этом часть газа используется с применением технологий CCS. В сценарии 3 глубокая декарбонизация достигается за счет усиления мер по трансформации энергетического хозяйства, дополнительного наращивания мощностей по использованию биотоплива, внедрения технологий CCS при потреблении газа, увеличения выработки на ГЭС, АЭС и ВИЭ. В сценарии 4 динамика изменений похожа на развитие ситуации по сценарию 3, но дополнительно увеличивается потребление биотоплива и значительно растет выработка энергии на солнечных, ветровых и других мощностях ВИЭ.

Сценарии 3 и 4 глубокой декарбонизации экономики предполагают сокращение выбросов ПГ от производства и потребления энергии к 2050 году на 90% по сравнению с уровнем 2010 года, что позволяет выполнить обязательства России по достижению цели Парижского соглашения по предотвращению роста температуры на 1,5°С. Биоэнергетика играет в этом существенную роль.

Прогнозируемое потребление биотоплива в перспективе 2050 года в сценариях глубокой декарбонизации (сценарии 2–4) находится в диапазоне от 3 до 4,5 ЭДж/год. Твердое биотопливо, производимое из лесной биомассы (древесных отходов, низкосортной древесины, древесных пеллет, древесного биоугля и т. д.) и сельскохозяйственного сырья (органических отходов, рапса и т. д.),

будет составлять бóльшую часть суммарного потребления (примерно 80%). Согласно модельным расчетам, потребление жидкого биотоплива в транспортной отрасли вырастет к 2050 году с почти 0 до 1 ЭДж/год (около 20% общего потребления). Производство биотоплива, необходимого для глубокого сокращения выбросов ПГ, потребует около 200–300 млн т биомассы в год, а дополнительные ресурсы могут использоваться для производства экспортной продукции.



Источник: расчеты авторов.

Рис. 1. Сценарные прогнозы производства первичной энергии (TPES) в России до 2050 года (ЭДж/год)

Fig. 1. Scenarios for Projected Total Primary Energy Supply in Russia by 2050 (EJ/year)

5. Перспективные направления развития биоэнергетики в России

Производство современного биотоплива в России в промышленных масштабах началось с 2000 года и в настоящее время достигает около 3 млн тонн в год, включая ежегодное производство древесных пеллет — 1,6–1,9 млн тонн, древесных брикетов — 0,2–0,3 млн тонн и древесной щепы — 1,1 млн тонн. Основной движущей силой развития отрасли в последние годы стал растущий спрос на эту продукцию в странах Европейского союза (90% экспорта) и Южной Корее (10%). Ежегодные объемы производства твердого биотоплива в России растут примерно на 5%, а внутреннее потребление остается незначительным. Долгосрочные прогнозы до 2021 года показывали, что объемы производства биотоплива будут удваиваться каждые десять лет и его экспорт из России будет существенно расти.

В целях стимулирования отраслей биоэкономики и развития биотехнологий в 2012 году была утверждена Государственная координационная программа развития биотехнологий в Российской Федерации на период до 2020 года — «Био-2020», одной из техно-

логических платформ которой стала «Биоэнергетика». На момент запуска программы доля рынка биотехнологических продуктов в стране составляла менее 0,1%, а доля современного биотоплива в энергобалансе была крайне незначительной. Стратегическая цель программы «Био-2020» — создание в России глобально конкурентоспособного, развитого сектора биотехнологий, а конкретные задачи — увеличить производство биотехнологической продукции в 80 раз, объем рынка — в 30 раз, довести импортозамещение до 80%, нарастить экспорт в 20 раз. Однако к концу 2020 года оказалось, что ни один из целевых показателей программы не выполнен [Василов, 2021]. Координация мер по дальнейшему развитию биотехнологий в стране осуществляется в рамках технологической платформы «Биоиндустрия и биоресурсы» (БиоТех2030), цель которой — создание в России современной биоиндустрии, обеспечивающей вклад в ВВП, сопоставимый с ведущими экономиками мира (не менее 3% ВВП к 2030 году). Кроме того, Лесной научный совет РАН разработал концепцию биоэкономики замкнутого цикла на базе развития лесного хозяйства в России, где биоэнергетика также играет значимую роль.

Технологии в биоэнергетике были определены как приоритетные для России по направлению «биотехнологии» на перспективу до 2030 года, а наиболее важные группы инновационных продуктов и услуг в этом секторе — это биотопливо и компоненты из биомассы (продукты пиролиза (бионефть, биогаз), биодизель, биоэтанол, биобутанол, биоэфиры, биометан, биоводород и присадки) и энергетические продукты (биотопливные элементы, включая биоэлектрические, бионакопители энергии).

Россия обладает огромным потенциалом по производству биотоплива второго и третьего поколений в значительных масштабах, что позволит полностью удовлетворить внутренний спрос на зеленую энергию и получать экспортные доходы, особенно в условиях ускоренной декарбонизации экономик ведущих стран мира. Для России крайне перспективными являются рынки Европы, Китая, Северной Америки, Южной Кореи, Японии.

Одним из важных направлений может стать внедрение технологий производства биоугля из древесных отходов, сельскохозяйственной и другой биомассы. Этот вид топлива имеет ряд преимуществ: его калорийность сопоставима с энергетическим углем, выброс CO_2 считается нулевым, а выбросов вредных и загрязняющих веществ в окружающую среду поступает значительно меньше; для компаний многих стран сам переход на биотопливо позволяет выполнить цели по развитию ВИЭ; использование биоугля с целью замещения ископаемого угля не требует замены до-

рогостоящего оборудования на существующих угольных котельных и электростанциях. Нынешняя цена значительно превышает стоимость обычного энергетического угля, а спрос на мировом рынке растет из-за ужесточения природоохранного и углеродного регулирования, высоких затрат на модернизацию и замещение ископаемого топлива на электростанциях. Только переработка не утилизируемых в России древесных и сельскохозяйственных отходов (более 300–400 млн тонн в год) обеспечила бы производство не менее 100 млн тонн биоугля в год (около 1/3 ежегодной добычи энергетического угля в стране).

Крайне привлекательным направлением является и производство жидкого биотоплива. Существуют различные технологии производства такого топлива из древесины, водорослей и других видов биомассы [Передерий, 2013]. Известный процесс производства синтез-газа Фишера — Тропша используется в российском ноу-хау по производству жидкого биотоплива второго поколения из древесины (разработка научно-инженерного центра «Цеосит» Сибирского отделения РАН), при этом стоимость производства биобензина составляет 30–40% от нынешней цены традиционного бензина АИ-95. В Алтайском крае разработан пилотный проект, который предполагает переработку 450 000 тонн древесной биомассы для производства 70 000 тонн жидкого биотоплива (биобензина, биокеросина) ежегодно с возможностью тиражирования данной технологии в больших масштабах.

В сентябре 2008 года Госкорпорация «Ростех» заявила о начале производства российского биобутанола в г. Тулун Иркутской области с проектной мощностью 20 тыс. куб. м в год. Это направление планировалось расширять за счет других предприятий Сибири и Дальнего Востока, таких как Канский и Усть-Илимский биохимические заводы, Хорский гидролизный завод. Объем заявленных инвестиций за 2008–2011 годы оценивался более чем в 7 млрд руб. Однако пока эти планы остаются нереализованными¹⁵.

В Сахалинской области в рамках федерального эксперимента по углеродному регулированию и программы создания карбонового полигона (инициатива Минобрнауки России) совместно с индустриальным партнером «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани» предполагается создание мощностей по выработке жидкого биотоплива третьего поколения из морских водорослей¹⁶. Этот проект должен стать частью масштабной программы развития современной биоэнергетики на Дальнем Востоке России.

¹⁵ <http://www.sibenergetic.ru/Article/1656.html>.

¹⁶ <https://carbon-polygons.ru/polygons/karbon-sahalin>.

Спрос на жидкое биотопливо второго и третьего поколений в мире стремительно растет, причем не только в секторе автомобильного транспорта, где уже действуют более жесткие экологические нормативы и требования, но и в авиаперевозках, где переход с обычного авиакеросина на зеленое топливо является эффективным решением для сокращения выбросов ПГ¹⁷.

Заключение

Развитие биоэнергетики в России может стать существенной поддержкой реализации планов и стратегий достижения углеродной нейтральности в период до 2060 года. Проведенный в настоящей работе анализ сценариев глубокой декарбонизации демонстрирует, что объем выбросов CO₂ в секторах, связанных с производством и потреблением энергии, станет на 80–90% ниже уровня 2010 года, возможно, уже к 2050 году, если значительно увеличить долю биоэнергетики в топливно-энергетическом балансе страны.

Замещение ископаемого топлива биоэнергетическими ресурсами в полной мере соответствует мировым трендам, связанным с зеленым энергетическим переходом. Согласно оценкам МЭА, биоэнергетика будет играть критически важную роль в снижении выбросов ПГ в мире до нуля: спрос на биоэнергию к 2030 году возрастет почти на 30% по сравнению с 2020 годом, а выработка энергии на основе биотоплива уже к 2030 году превысит генерацию энергии на угольных электростанциях и будет сопоставима с суммарной выработкой энергии на атомных, солнечных и ветровых электростанциях мира. В этой связи участие России в растущем рынке биотоплива представляется очень перспективным направлением развития энергетики.

Россия обладает большим природным потенциалом и технологиями, необходимыми для масштабного развития биоэнергетики как для внутреннего потребления, так и для экспорта. В рассмотренных сценариях глубокой декарбонизации доля биоэнергетических источников в производстве первичной энергии достигает 20–25% к 2050 году и превышает суммарную выработку энергии на атомных и гидроэлектростанциях страны.

Примеры практических проектов в биоэнергетике показывают, что себестоимость производства биотоплива нередко существенно ниже, чем в отраслях традиционных ископаемых энерго-

¹⁷ Программа CORSIA Международной организации гражданской авиации уже с 2027 года требует обязательной отчетности, компенсации и снижения выбросов парниковых газов от трансграничных авиаперелетов.

ресурсов. В качестве примеров можно привести перспективные технологии по выработке жидкого биотоплива второго поколения и биогаза в Алтайском крае, биоугля из древесных и сельскохозяйственных отходов, а также эксперименты по биотопливу третьего поколения из морских водорослей в Сахалинской области. Конкурентоспособность биотоплива будет возрастать на фоне увеличения платы за выбросы углерода в мире, ужесточения экологических стандартов и требований, внедрения механизмов трансграничного углеродного регулирования (например, Carbon Border Adjustment Mechanism в Евросоюзе), требований инвесторов и финансовых организаций о необходимости раскрытия информации об углеродном следе предприятий (в том числе в рамках ESG-рейтингов, влияющих на стоимость заемного капитала).

Опыт реализации программы «Био-2020» по созданию в России глобально конкурентоспособного сектора биотехнологий показал, что цели по увеличению производства биотехнологической продукции в 80 раз, а экспорта — в 20 раз не выполнены. России следует интегрировать биоэнергетику в качестве одного из приоритетных направлений в стратегию низкоуглеродного развития до 2050 года, учитывая имеющийся российский и зарубежный опыт, необходимость преодоления законодательных, институциональных, финансовых и иных барьеров. Включение биоэнергетики в приоритеты стратегии научно-технического развития даст возможность добиться декарбонизации экономики с наименьшими издержками.

Развитие биоэнергетики в контексте глобального зеленого энергоперехода позволит России в полной мере выполнить обязательства по Парижскому соглашению и создать условия для увеличения доли страны на биоэнергетических рынках мира, где в средне- и долгосрочной перспективе ожидается растущий спрос на биотопливо, прежде всего в Европе, Северной Америке, Юго-Восточной Азии.

В условиях санкций и возрастающих геополитических рисков борьба с климатическими изменениями остается одной из ключевых сфер международного сотрудничества, что позволяет России использовать широкие возможности по взаимодействию со странами-партнерами в разработке биоэнергетических технологий, торговле биотопливом и зеленой энергией, реализации совместных научно-исследовательских программ, участию в многосторонних программах энергетического, экономического и климатического сотрудничества, в том числе в рамках ЕАЭС, БРИКС, ШОС и под эгидой Парижского соглашения.

Литература

1. *Башмаков И. А.* Стратегия низкоуглеродного развития российской экономики // Вопросы экономики. 2020. Т. 7. С. 51–74.
2. *Безруких П. П., Дегтярев В. В., Елистратов В. В., Паничева Д. С., Петров Э. С., Пузаков В. Н., Сидоренко Г. И., Тарнижевский Б. В., Шпак А. А., Ямпольский А. А.* Справочник по ресурсам возобновляемых источников энергии России и местных видов топлива (показатели по территориям) / Под ред. П. П. Безруких. М.: ИАЦ «Энергия». 2007.
3. *Василов Р. Г.* Биотехнология в России: недавнее прошлое, опыт настоящего, перспективы будущего // Russian Biotechnology Society. 2021. <https://biorosinfo.ru/Situacionnyj-analiz-razvitiya-biotekhnologii-v-Rossijskoj-Federacii>.
4. *Замолодчиков Д., Краев Г.* Влияние изменений климата на леса России: зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. 2016. № 4(48). С. 23–31.
5. *Луговой О., Лайтнер Д., Поташиников В.* Низкоуглеродное развитие как драйвер экономического роста // Российское предпринимательство. 2015. Т. 16. № 23. С. 4221–4228.
6. *Луговой О., Поташиников В., Гордеев Д.* Прогнозы энергобаланса и выбросов парниковых газов на модели RU-TIMES до 2050 года // Научный вестник ИЭП им. Гайдара. 2014. № 5. С. 39–43.
7. *Передерий С.* Жидкое биотопливо из сырья растительного происхождения // Лес-ПромИнформ. 2013. № 6(96). С. 152–156.
8. Прогноз научно-технологического развития России: 2030. Биотехнологии / Под ред. Л. М. Гохберга, М. П. Кирпичникова. М.: Министерство образования и науки Российской Федерации; НИУ ВШЭ, 2014.
9. *Соколов А. В.* Форсайт: взгляд в будущее // Форсайт. 2007. № 1(1). С. 8–12.
10. *An J., Mikhaylov A., Lopatin E., Moiseev N., Richter U. H., Varyash I., Uyeh D., Oganov A., Bertelsen R. G.* Bioenergy Potential of Russia: Method of Evaluating Costs // International Journal of Energy Economics and Policy. 2019. Vol. 9(5). P. 244–251.
11. *Boyarov A., Osmakova A., Popov V.* Bioeconomy in Russia: Today and Tomorrow // New Biotechnology. 2021. Vol. 60. P. 36–43.
12. *Den Elzen M., Admiraal A., Roelfsema M., Van Soest H., Hof A. F., Forsell N.* Contribution of the G20 Economies to the Global Impact of the Paris Agreement Climate Proposals // Climatic Change. 2016. Vol. 137. P. 655–665.
13. *Fragkos P., Van Soest H., Schaeffer R., Reedman L., Köberle A. C., Macaluso N., Evangelopoulou S., De Vita A., Sha F., Qimin Ch., Kejun J., Mathur R., Shekhar S., Dewi R. G., Diego S. H., Oshiro K., Fujimori Sh., Park Ch., Safonov G., Iyer G.* Energy System Transitions and Low-Carbon Pathways in Australia, Brazil, Canada, China, EU-28, India, Indonesia, Japan, Republic of Korea, Russia and the United States // Energy. 2020. Vol. 216. P. 1–13.
14. *Laitner J., Lugovoy O., Potashnikov V.* Cost and Benefits of Deep Decarbonization in Russia // Экономическая политика. 2020. Т. 15. № 2. С. 86–105.
15. *Loulou R., Goldstein G., Kanudia A., Lettelle A., Remme U.* Documentation for the TIMES Model. Paris: International Energy Agency, 2005.
16. *Luderer G., Vrontisi Z., Bertram Cr., Edelenbosch O. Y., Pietzcker R. C., Rogelj J., De Boer H. S., Drouet L., Emmerling J., Fricko O., Fujimori S., Havlík P., Iyer G., Keramidas K., Kitous A., Pehl M., Krey V., Riahi K., Saveyn B., Tavoni M., Van Vuuren D. P., Kriegler E.* Residual Fossil CO₂ Emissions in 1.5–2°C Pathways // Nature Climate Change. 2018. Vol. 8. P. 626–633.
17. *Makarov A., Mitrova T., Kulagin V.* Long-Term Development of the Global Energy Sector Under the Influence of Energy Policies and Technological Progress // Russian Journal of Economics. 2020. Vol. 6(4). P. 347–357.
18. *Makarov I., Chen H., Paltsev S.* Impacts of Climate Change Policies Worldwide on the Russian Economy // Climate Policy. 2020. Vol. 20. No 10. P. 1242–1256.

19. Namsaraev Z., Gotovtsev P., Komova A., Vasilov R. Current Status and Potential of Bioenergy in the Russian Federation // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 81. Part 1. P. 625–634.
20. Pahle M., Schaeffer R., Pachauri Sh., Eom J., Awasthy A., Chen W., Di Maria C., Jiang K., He Ch., Portugal-Pereira J., Safonov G., Verdolini E. The Crucial Role of Complementarity, Transparency and Adaptability for Designing Energy Policies for Sustainable Development // *Energy Policy*. 2021. Vol. 159. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112662>.
21. Rogelj J., Schaeffer M., Friedlingstein P., Gillett N. P., Van Vuuren D. P., Riahi K., Allen M., Knutti R. Differences Between Carbon Budget Estimates Unravelling // *Nature Climate Change*. 2016. Vol. 6. P. 245–252.
22. Safonov G., Potashnikov V., Lugovoy O., Safonov M., Dorina A., Bolotov A. The Low Carbon Development Options for Russia // *Climatic Change*. 2020. Vol. 162. P. 1929–1945.
23. Schaeffer R., Köberle A., Van Soest H. L., Bertram C., Luderer G., Riahi K., Krey V., Van Vuuren D. P., Kriegler E., Fujimori S., Chen W., He C., Vrontisi Z., Vishwanathan S., Garg A., Mathur R., Shekhar S., Oshiro K., Ueckerdt F., Safonov G., Iyer G., Gi K., Potashnikov V. Comparing Transformation Pathways Across Major Economies // *Climatic Change*. 2020. Vol. 162. P. 1787–1803.
24. Stern N. H. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
25. Vasilyev O., Barikaeva N., Akhmadeev B., Moiseev N. Analysis of Wood Energy Russian Market // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 392. DOI:10.1088/1755-1315/392/1/012077.
26. Waisman H., Bataille Ch., Winkler H., Jotzo F., Shukla P., Colombier M., Buira D., Criqui C., Fischelick M., Kainuma M., La Rovere E., Pye S., Safonov G., Siagian U., Teng F., Virdis M. R., Williams J., Young S., Anandarajah G., Boer R., Cho Y., Denis-Ryan A., Dhar S., Gaeta M., Gesteira C., Haley B., Hourcade J. Ch., Liu Q., Lugovoy O., Masui T., Mathy S., Oshiro K., Parrado R., Pathak M., Potashnikov V., Samadi S., Sawyer D., Spencer T., Tovilla J., Trollip H. A Pathway Design Framework for National Low Greenhouse Gas Emission Development Strategies // *Nature Climate Change*. 2019. Vol. 9. P. 261–268.

References

1. Bashmakov I. A. Strategiya nizkouglerodnogo razvitiya rossiyskoy ekonomiki [Low-Carbon Development Strategy for the Russian Economy]. *Voprosy ekonomiki*, 2020, no. 7, pp. 51–74. (In Russ.)
2. Bezrukikh P. P., Degtyarev V. V., Elistratov V. V., Pantskhava D. S., Petrov E. S., Puzakov V. N., Sidorenko G. I., Tarnizhevskiy B. V., Shpak A. A., Yampolskiy A. A. *Spravochnik po resursam vozobnovlyаемых источников энергии Rossii i mestnykh vidov topliva (pokazateli po territoriyam)* [Reference Book on Renewable Energy Sources and Local Fuels (Indicators by Territories)], Bezrukikh P. P. (ed.). Moscow, IATs “Energiya”, 2007. (In Russ.)
3. Vasilov R. *Biotehnologiya v Rossii: nedavnee proshloe, opyt nastoyashchego, perspektivy budushchego* [Biotechnologies in Russia: Recent Past, Current Experience, Future Prospects]. Moscow, 2021. <https://biorosinfo.ru/Situatsionnyj-analiz-razvitiya-biotehnologii-v-Rossijskoj-Federacii/>. (In Russ.)
4. Zamolodchikov D., Kraev G. Vliyanie izmeneniy klimata na lesa Rossii: zafiksirovannyye vozdeystviya i prognozye otsenki [Climate Change Effects on Russian Forests: Observed Impacts and Projections]. *Ustoychivoe lesopol'zovanie* [Sustainable Forest Use], 2016, no. 4(48), pp. 23–31. (In Russ.)
5. Lugovoy O., Potashnikov V., Gordeev D. Prognozy energobalansa i vybrosov parnikovyykh gazov na modeli RU-TIMES do 2050 goda [Projections of Energy Balance and Greenhouse Gas Emissions Using the RU-TIMES Model Through 2050]. *Nauchnyy vestnik IEP im. Gaidara* [Scientific Bulletin of Gaidar's EIP], 2014, no. 5, pp. 39–43. (In Russ.)
6. Lugovoy O., Laitner D., Potashnikov V. Nizkouglerodnoye razvitiye kak drayver ekonomicheskogo rosta [Low Carbon Development as a Driver of Economic Growth]. *Rossiyskoe predprinimatel'stvo* [Russian Entrepreneurship], 2015, no. 16(23), pp. 4221–4228. (In Russ.)

7. Perederiy S. Zhidkoe biotoplivo iz syr'ya rastitel'nogo proiskhozhdeniya [Liquid Biofuel from Biomass Materials]. *LesPromInform*, 2013, no. 6(96), pp. 152-156. (In Russ.)
8. Gokhberg L., Kirpichnikova M. (eds.). *Prognoz nauchno-tekhnologicheskogo razvitiya Rossii: 2030. Biotekhnologii* [Forecast for the Scientific and Technological Development of Russia: 2030. Biotechnologies]. Moscow, Ministry of Education and Science of the Russian Federation, HSE University, 2014. (In Russ.)
9. Sokolov A. Forsayt: vzglyad v budushchee [Foresight: A Look into the Future]. *Forsayt [Foresight]*, 2007, no. 1(1), pp. 8-12. (In Russ.)
10. An J., Mikhaylov A., Lopatin E., Moiseev N., Richter U. H., Varyash I., Uyeh D., Oganov A., Bertelsen R.G. Bioenergy Potential of Russia: A Method for Evaluating Costs. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 2019, vol. 9(5), pp. 244-251.
11. Boyarov A., Osmakova A., Popov V. Bioeconomy in Russia: Today and Tomorrow. *New Biotechnology*, 2021, vol. 60, pp. 36-43.
12. Den Elzen M., Admiraal A., Roelfsema M., Van Soest H., Hof A. F., Forsell N. Contribution of the G20 Economies to the Global Impact of the Paris Agreement Climate Proposals. *Climatic Change*, 2016, vol. 137, pp. 655-665.
13. Fragkos P., Van Soest H., Schaeffer R., Reedman L., Köberle A. C., Macaluso N., Evangelopoulou S., De Vita A., Sha F., Qimin Ch., Kejun J., Mathur R., Shekhar S., Dewi R. G., Diego S. H., Oshiro K., Fujimori Sh., Park Ch., Safonov G., Iyer G. Energy System Transitions and Low-Carbon Pathways in Australia, Brazil, Canada, China, EU-28, India, Indonesia, Japan, Republic of Korea, Russia and the United States. *Energy*, 2020, vol. 216, pp. 1-13.
14. Laitner J., Lugovoy O., Potashnikov V. Cost and Benefits of Deep Decarbonization in Russia. *Ekonomicheskaya politika [Economic Policy]*, 2020, vol. 15, no. 2, pp. 86-105.
15. Loulou R., Goldstein G., Kanudia A., Lettile A., Remme U. *Documentation for the TIMES Model*. Paris, International Energy Agency, 2005.
16. Luderer G., Vrontisi Z., Bertram Cr., Edelenbosch O. Y., Pietzcker R. C., Rogelj J., De Boer H. S., Drouet L., Emmerling J., Fricko O., Fujimori S., Havlik P., Iyer G., Keramidas K., Kitous A., Pehl M., Krey V., Riahi K., Saveyn B., Tavoni M., Van Vuuren D. P., Kriegler E. Residual Fossil CO₂ Emissions in 1.5-2°C Pathways. *Nature Climate Change*, 2018, vol. 8, pp. 626-633.
17. Makarov A., Mitrova T., Kulagin V. Long-Term Development of the Global Energy Sector Under the Influence of Energy Policies and Technological Progress. *Russian Journal of Economics*, 2020, vol. 6(4), pp. 347-357.
18. Makarov I., Chen H., Paltsev S. Impacts of Climate Change Policies Worldwide on the Russian Economy. *Climate Policy*, 2020, vol. 20(10), pp. 1242-1256.
19. Namsaraev Z., Gotovtsev P., Komova A., Vasilov R. Current Status and Potential of Bioenergy in the Russian Federation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 81, part 1, pp. 625-634.
20. Pahle M., Schaeffer R., Pachauri Sh., Eom J., Awasthy A., Chen W., Di Maria C., Jiang K., He Ch., Portugal-Pereira J., Safonov G., Verdolini E. The Crucial Role of Complementarity, Transparency, and Adaptability for Designing Energy Policies for Sustainable Development. *Energy Policy*, 2021, vol. 159. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112662>.
21. Rogelj J., Schaeffer M., Friedlingstein P., Gillett N. P., Van Vuuren D. P., Riahi K., Allen M., Knutti R. Differences Between Carbon Budget Estimates Unravelling. *Nature Climate Change*, 2016, vol. 6, pp. 245-252.
22. Safonov G., Potashnikov V., Lugovoy O., Safonov M., Dorina A., Bolotov A. The Low Carbon Development Options for Russia. *Climatic Change*, 2020, vol. 162, pp. 1929-1945.
23. Schaeffer R., Köberle A., Van Soest H. L., Bertram C., Luderer G., Riahi K., Krey V., Van Vuuren D. P., Kriegler E., Fujimori S., Chen W., He C., Vrontisi Z., Vishwanathan S., Garg A., Mathur R., Shekhar S., Oshiro K., Ueckerdt F., Safonov G., Iyer G., Gi K., Potashnikov V. Comparing Transformation Pathways Across Major Economies. *Climatic Change*, 2020, vol. 162, pp. 1787-1803.
24. Stern N. H. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge, UK, Cambridge University Press, 2007.

25. Vasilyev O., Barikaeva N., Akhmadeev B., Moiseev N. Analysis of Wood Energy Russian Market. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019, vol. 392. DOI:10.1088/1755-1315/392/1/012077.
26. Waisman H., Bataille Ch., Winkler H., Jotzo F., Shukla P., Colombier M., Buira D., Criqui C., Fischelick M., Kainuma M., La Rovere E., Pye S., Safonov G., Siagian U., Teng F., Virdis M. R., Williams J., Young S., Anandarajah G., Boer R., Cho Y., Denis-Ryan A., Dhar S., Gaeta M., Gesteira C., Haley B., Hourcade J. Ch., Liu Q., Lugovoy O., Masui T., Mathy S., Oshiro K., Parrado R., Pathak M., Potashnikov V., Samadi S., Sawyer D., Spencer T., Tovilla J., Trolip H. A Pathway Design Framework for National Low Greenhouse Gas Emission Development Strategies. *Nature Climate Change*, 2019, vol. 9, pp. 261-268.