

DOI: 10.18721/JEST.25301
УДК 620.9

В.В. Клименко, А.Г. Терешин, Е.В. Федотова

Национальный исследовательский университет «МЭИ»

РОСТ ПОТЕНЦИАЛА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В РОССИИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

Работа посвящена оценке изменений потенциала возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в условиях изменений климата на территории России. Приведены данные об истории, современном состоянии и перспективах развития ВИЭ в России. Показано, что в настоящее время, без учета крупных ГЭС, обеспечивающих около 6 % потребления первичной энергии в России, вклад остальных ВИЭ в энергетику страны составляет менее 2 %, и, при сохранении нынешних тенденций их развития, в ближайшие десятилетия не превысит 4 % суммарного энергопотребления. На основе данных расчетов на климатических моделях проекта CMIP5 с применением авторской методики формирования модельных ансамблей получены оценки изменения основных климатических параметров (температуры воздуха, количества осадков, скорости ветра) на территории России на период до 2070 г. для наиболее вероятного сценария антропогенного воздействия на глобальную климатическую систему RCP 4.5. Выполнены расчеты изменения прикладных климатических характеристик, определяющих потенциал ВИЭ – объема речного стока, ветропотенциала, биопродуктивности лесов. Показано, что на большей части территории страны эти изменения будут иметь благоприятный характер. Выполненное исследование показало, что суммарный ожидаемый положительный эффект (экономия органического топлива) от увеличения потенциала ВИЭ за счет климатических изменений на территории России на период до 2050 г. – более 10 млн т у.т., – с избытком компенсирует негативные последствия этих изменений для других отраслей энергетики.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, потенциал, изменения климата, модельные оценки, проект CMIP5, сценарий RCP4.5, речной сток, ветропотенциал, биопродуктивность лесов.

Ссылка при цитировании:

Клименко В.В., Терешин А.Г., Федотова Е.В. Рост потенциала возобновляемых источников энергии в России в условиях глобального потепления // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2019. Т. 25, № 3. С. 6–27. DOI: 10.18721/JEST.25301

V.V. Klimenko, A.G. Tereshin, E.V. Fedotova

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»

INCREASE IN RENEWABLE ENERGY POTENTIAL IN RUSSIA DUE TO GLOBAL WARMING

This study presents the assessment of changes in potential renewable energy under climate changes over the Russian territory. The data are analyzed concerning the history, present state and prospects of development of renewable energy sources in Russia. We show that at present, excluding large hydropower plants, which supply about 6 % of primary energy consumption in Russia, the share of all the other renewables in national energy supply comprises less than 2 %, and, if present trends of their development continue in the coming decades,

will not exceed 4% of total energy consumption in Russia. Based on CMIP5 climate models simulations using original selection methodology, we estimated the changes of major climatic parameters (air temperature, precipitation, wind speed) over Russia for the period up to 2070 under the most likely future climate scenario RCP 4.5. The changes in the applied climatic characteristics that define the renewables potential, such as river runoff, wind potential, net primary production of forests are calculated. Results show that climate change has a positive impact on renewables potential over the most part of the country. It is also projected that the total positive impact (in terms of fossil fuel conservation) by increasing the renewable energy potential due to climatic changes over the Russian territory for the time frame up to 2050, exceeding 10 million tce, fully offsets the negative impact of these changes on other energy sub-sectors.

Keywords: renewable energy sources, potential, climate change, model estimates, CMIP5 project, RCP 4.5 scenario, river runoff, wind potential, net primary production of forests.

Citation:

V.V. Klimenko, A.G. Tereshin, E.V. Fedotova, Increase in renewable energy potential in Russia due to global warming, St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 25 (03) (2019) 6–27. DOI: 10.18721/JEST.25301

Введение. Влияние наблюдающихся и ожидаемых изменений климата на различные отрасли экономики уже давно вызывает серьезную озабоченность мирового сообщества [1]. Россия, несмотря на то, что большая часть ее территории лежит в зоне особенно сильных изменений, занимает позицию скорее пассивного наблюдателя и еще не приступила к масштабным адаптационным мероприятиям [2].

Энергетика, основа современной экономики, также в значительной мере подвержена влиянию климатических изменений. Динамика таких климатических характеристик, как температура воздуха, количество осадков, скорость ветра, облачность, определяет уровни потребления различных видов энергии (например, тепла на отопление, электроэнергии на освещение и кондиционирование), потери при передаче и распределении, эффективность производства электроэнергии (тепловые циклы паровых и газовых турбинных установок) [3, 4].

Бурное распространение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в настоящее время в значительной мере определяет развитие мировой энергетики [5]. Согласно долгосрочным прогнозам, именно они в перспективе одногодвух десятилетий могут стать основой глобального энергетического комплекса. Поэтому неудивительно, что значительное число науч-

ных работ посвящено исследованию работы энергетических установок на ВИЭ в условиях меняющегося климата.

В России, богатой водными и лесными ресурсами, по понятным причинам основное внимание уделяется гидроэнергетике [6–10] и использованию биотоплива [11–14].

1. ВИЭ в России

Россия сильно отстает по темпам развития нетрадиционных ВИЭ (НВИЭ, без учета крупных ГЭС и дров для населения) от основных лидеров в этой области (Китай, ЕС, США и др.) [5, 15]. Сегодня основу отечественной энергетики составляет органическое топливо (86 % суммарного потребления первичной энергии в 2018 г., из которых 54 % приходится на природный газ), ГЭС и АЭС дают по 6 % общего энергопотребления, вклад НВИЭ составляет едва более 1 % (рис. 1, а). Для сравнения: доля НВИЭ в энергобалансе ЕС достигает 9,5 %, в Японии – 5,6, США – 4,5, Китае – 4,4 %.

Такая же структура энергоресурсов характерна и для электроэнергетики страны (рис. 1, б) – в 2018 г. на ГЭС, использующих органическое топливо, было произведено 65 % электроэнергии (в том числе 48 % – на газовых энергоблоках). Вклад АЭС и ГЭС составил 19 % и 17 % соответственно, а НВИЭ – лишь 0,6 %.

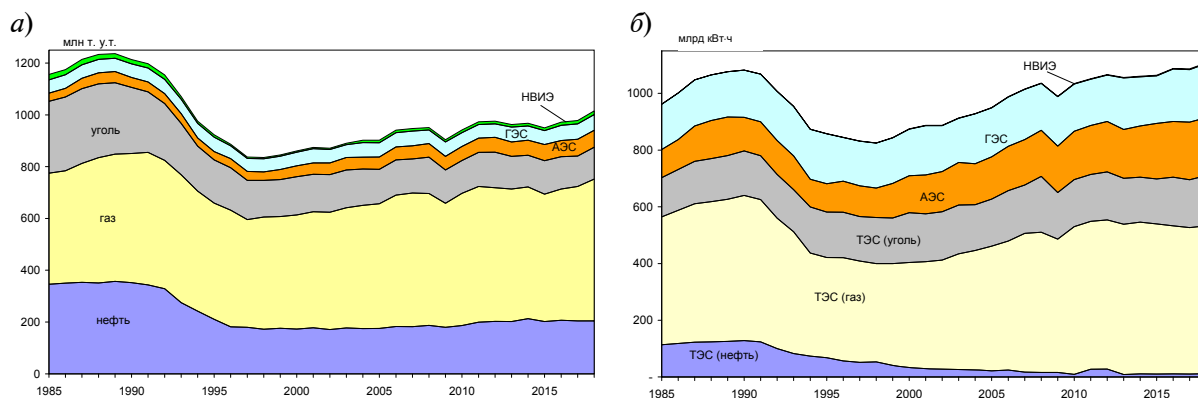


Рис. 1. Потребление первичной энергии (а) и производство электроэнергии (б) в России в 1985–2018 гг.

Fig. 1. Primary energy consumption (a) and electricity production (b) in Russia in 1985–2018

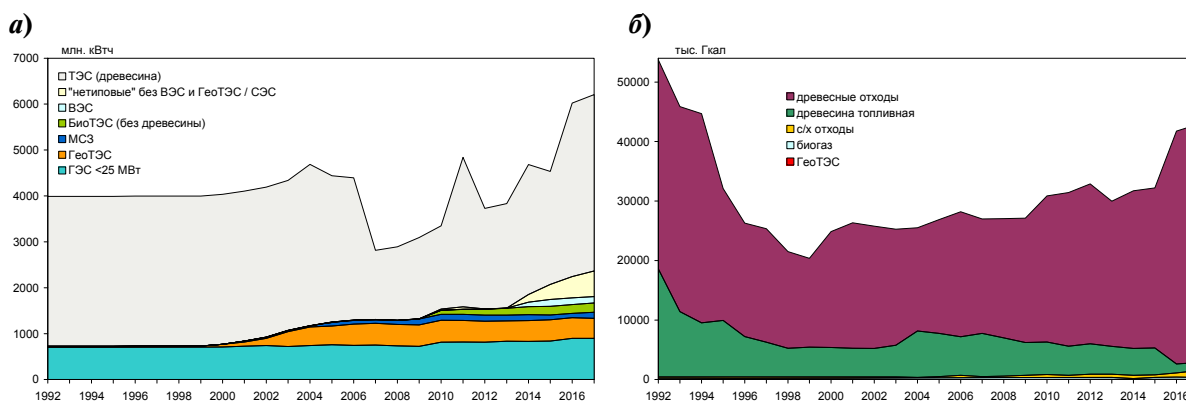


Рис. 2. Выработка электроэнергии и производство тепла (централизованное) из НВИЭ в России в 1992–2017 гг.

Fig. 2. Electricity and heat production (centralized) from renewable energy sources in Russia in 1992–2017

Только наличие значительного числа АЭС и крупных ГЭС, наряду с преобладающей долей природного газа в потреблении органического топлива, позволяет нашей стране сохранять некоторые важные экологические показатели энергетики (например, карбоноёмкость) на уровне среднемировых [15].

Данные энергетической статистики (рис. 2) свидетельствуют о том, что основным ресурсом возобновляемой энергетики в настоящее время в России является биотопливо, обеспечивающее более половины выработки электроэнергии и 90 % централизованного

тепла из ВИЭ (не считая дров для индивидуального печного отопления).

Однако развитие в последние годы ветровой и солнечной энергетики, а также действующие программы по увеличению их установленной мощности дают основание надеяться, что в ближайшие десятилетия их вклад заметно увеличится (табл. 1).

Характерной особенностью большинства ВИЭ является их сильная зависимость от природно-климатических параметров (объёма речного стока для ГЭС, скорости ветра для ВЭС, облачности для СЭС, биопродуктивности для биотоплива).

Таблица 1

Структура потребления возобновляемых энергоресурсов в России, млн т у.т.

The structure of consumption of renewable energy resources in Russia, million tons of coal equivalent

Ресурсы	2000	2005	2010	2015	2020	2030	2050
Гидро (малые ГЭС)	0.227	0.242	0.261	0.267	0.3	0.3	0.4
Солнце	0.000	0.000	0.009	0.105	0.7	1.1	2
Ветер	0.001	0.002	0.001	0.047	0.7	2.4	8
Геотермальные	0.018	0.131	0.158	0.148	0.15	0.15	0.15
Биотопливо, в том числе	4.000	4.328	5.001	5.246	7	10	26
<i>древесина</i>	3.929	4.248	4.860	5.099	7	10	26
<i>сельхозотходы</i>	0.036	0.036	0.084	0.071			
<i>биогаз</i>	0.035	0.044	0.057	0.075			
НВИЭ, всего	4.246	4.703	5.429	5.813	9	14	37
<i>Кроме того, дрова</i>	<i>4.647</i>	<i>5.011</i>	<i>4.195</i>	<i>4.000</i>	<i>4</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Биоресурсы, всего	8.647	9.339	9.196	9.246	11	14	31

Источники. Росстат, Минэнерго, СО ЕЭС, расчеты авторов.

Поэтому для оценки эффективности их функционирования на длительную перспективу необходимы данные об изменениях климата в регионах их размещения.

2. Изменения климата на территории России

2.1. Методика получения прогнозных климатических оценок. Существуют две основные группы подходов к моделированию климата. Первая основана на применении методов математической статистики к данным метеорологических наблюдений. Исторически это наиболее развитый и проработанный подход. Одно из его главных преимуществ заключается в возможности учесть особенности реальных климатических процессов, зафиксированные в накопленном массиве эмпирических данных, такие как спектральные характеристики климатической изменчивости, сезонную динамику или величину реальных климатических норм. Основные ограничения этого подхода связаны с нестационарностью климатической системы, в первую очередь с возрастающим трендом температур, наблюдающимся на протяжении последнего столетия. Эта тенденция с очень высокой вероятностью продолжится, по крайней мере, в течение всего следующего столетия и неизбежно окажет влияние на все процессы в

климатической системе. В результате экстраполяция статистических закономерностей, обнаруживавшихся на протяжении истории наблюдений (обычно это одно-два столетия), в будущее становится не вполне корректной [16].

Для климатических параметров с высокой естественной изменчивостью, таких как скорость ветра или количество осадков, разработка долгосрочных прогнозных оценок требует использования принципиально иных подходов, лежащих в основе второй группы климатических моделей и заключающихся в численном решении уравнений переноса для всей климатической системы. Идея гидродинамического моделирования атмосферных процессов возникла давно, практически одновременно со становлением гидродинамики как науки. Уже в начале двадцатого века обсуждалась принципиальная возможность получения метеорологических прогнозов с помощью гидродинамических моделей. Реализация этой идеи потребовала почти столетия фундаментальных исследований климатических процессов и совершенствования вычислительных методов.

Прорыв в вычислительной гидродинамике, произошедший около двадцати-тридцати лет назад обеспечил в том числе и возможность практического использования гидродинами-

ческих моделей для метеорологических и климатических задач. На сегодняшний день гидродинамическое моделирование стало ведущим подходом к исследованию климата как в прошлом, так и в будущем. Основная трудность этого метода заключается в неразрывной связи, существующей между климатическими процессами, протекающими на разных пространственных и временных масштабах. Климатические условия в конкретной географической локации определяются атмосферными процессами, протекающими на временных масштабах от многих десятилетий до нескольких минут. Включить их все в состав единственной модели было бы не только затруднительно технически, но и ошибочно методически. Расчётные исследования климата проводятся с использованием концепции вложенного моделирования, когда на относительно грубой сетке сначала проводится моделирование процессов переноса планетарного масштаба. Затем результаты этого глобального моделирования используются для постановки граничных условий в региональных климатических моделях, расчетная область которых ограничена некоторым выбранным регионом, но представлена с высоким пространственным разрешением. При необходимости данные регионального климатического моделирования используются в специальных узкоспециализированных моделях, обеспечивающих представление единственного параметра или процесса с точностью, достаточной для непосредственного практического применения, — к примеру, в моделях формирования речного стока.

Классическим подходом к снижению вычислительного погрешности гидродинамических климатических моделей является использование ансамблевого осреднения. Суть этого подхода заключается в использовании для прогнозной оценки нескольких независимых моделей, что позволяет снизить погрешности, связанные с несовершенством представлений о природе климата и вычислительных погрешностей, заложенных в каждую из них.

Прорывным подходом к моделированию климата стала координация усилий разных модельных групп, направленная на сопоставление результатов разных моделей в рамках одного проекта и получении ансамблевых оценок климатических параметров на основе совместного использования лучших климатических моделей. Крупнейшей инициативой такого рода стал Проект межмодельного сопоставления сопряжённых климатических моделей (CMIP). Результаты современной, пятой, фазы этого проекта обеспечивают достаточно высокое качество воспроизведения основных климатических параметров по территории России [2]. На сегодняшний день идет формирование модельного архива следующей, шестой, фазы проекта CMIP и начинается планирование седьмой. Однако, до сих пор наиболее обширная база данных модельных оценок доступна для проекта CMIP5.

Настоящая работа направлена на оценку крупномасштабных тенденций изменений климата, существенных для развития энергетики, по всей территории России на протяжении XXI в. Учитывая субконтинентальный масштаб задачи и соображения однородности используемых модельных методов, мы приняли решение использовать результаты глобального климатического моделирования для непосредственной разработки прогнозных оценок.

Результаты архива CMIP5, доступ к которому был любезно предоставлен Немецким климатическим расчетным центром (DKRZ), для выбранных климатических параметров и сценариев были организованы в локальную базу данных. Обработка этой базы данных была выполнена с помощью специально разработанного авторского программного комплекса на языке R [17]. Доступ к исходному коду этого комплекса организован на условиях свободной лицензии GPL v3.0 в репозитории <https://github.com/ekatef/CMIP5-ArAvr>. Список моделей, использованных в наших расчётах, приведён в таблице Приложения.

2.2. *Модельные оценки основных климатических параметров на территории России в XXI веке.* Прогнозные оценки температуры и количества осадков выполнены с использованием всех доступных для выбранного сценария моделей. Для оценок скорости ветра на основе проведенной процедуры валидации использованы модели, обеспечивающие наилучшее качество распределения ветрового режима на территории России. Кроме того, было выполнено специальное исследование устойчивости полученной прогнозной оценки к составу ансамбля и выбранному

климатическому сценарию. Подробно методика проведенных расчетов представлена в [29].

В настоящей работе были рассмотрены следующие основные климатические параметры, влияющие на условия развития возобновляемой энергетики: температура воздуха, количество осадков и скорость ветра. Результаты выполненных оценок для середины и второй половины XXI в. для климатического сценария гср 4.5, который, на наш взгляд, будет достаточно близко соответствовать температурному режиму для этого периода [15, 33], представлены на рис. 3.

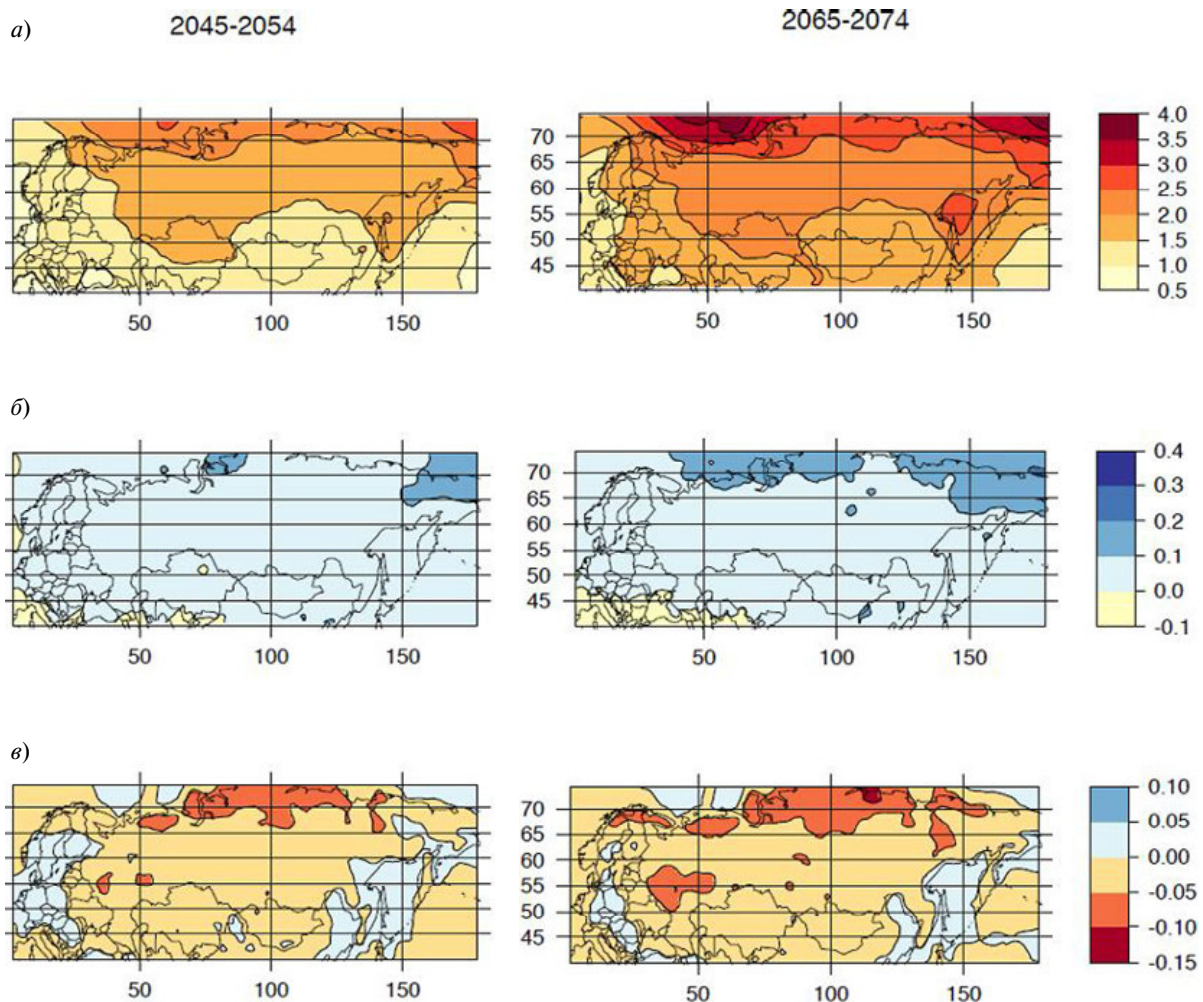


Рис. 3. Ансамблевые оценки для изменения среднегодовых значений основных климатических параметров на территории России в 2045–2054 и в 2065–74 (по сравнению с 2007–2016): *a* – изменение температуры воздуха (°C); *б* – относительное изменение количества осадков; *в* – относительное изменение скорости ветра

Fig. 3. Ensemble estimates for changing the average annual values of the key climatic parameters on the territory of Russia in 2045–2054 and in 2065–74 (compared with 2007–2016): *a* – change in air temperature (°C); *б* – relative change in rainfall; *в* – relative change in wind speed

Характерная особенность современных изменений температуры заключается в их значительной пространственной и сезонной неравномерности. Ярким проявлением пространственной неоднородности является т. н. арктическая амплификация, которая заключается в ускоренном повышении температур в субарктических регионах по сравнению с остальной частью планеты. Иными словами, Россия принадлежит к регионам мира, где современное потепление климата особенно явно выражено (рис. 3, *a*). Если повышение среднеглобальной температуры к 2070 г. по отношению к первому десятилетию XXI века при развитии событий по сценарию гср 4.5 составит менее 1,5 °С, то на большей части территории России можно ожидать повышения среднегодовой температуры в пределах 2–3 °С. Сезонная неравномерность заключается в неравномерном изменении температуры по сезонам. Известно, например, что если в Западной Европе стремительно теплеют летние месяцы, то в России потепление происходит главным образом зимой и весной.

Для режима осадков увеличение среднеглобальной температуры в соответствии с уравнением Клапейрона-Клаузиуса означает повышение содержания влаги в атмосфере и, как следствие, интенсификацию глобального гидрологического цикла. В результате увеличивается количество осадков в регионах с достаточным увлажнением, а в засушливых регионах происходит дальнейшее иссушение. Этот характер пространственных изменений описывается ставшей классической формулой «wet getting wetter». Еще одна характерная черта современных гидрологических изменений заключается в изменении интенсивности осадков: в регионах, обнаруживающих тенденцию к повышению увлажнения, возрастает доля осадков, выпадающих в виде ливней. В целом, практически вся территория России попадает в зону, где вероятно повышение

среднегодового количества осадков (рис. 3, *b*). Снижения увлажнения следует опасаться только в самой южной части страны.

Изменение приповерхностной скорости ветра – т. е. скорости, соответствующей высотам в 10–100 м – в целом по Северному полушарию в последние десятилетия имеет тенденцию к снижению над континентами и увеличению над поверхностью океана. Вопрос о влиянии естественной климатической изменчивости на наблюдаемый сдвиг ветрового режима до сих пор не имеет однозначного ответа. Несомненно, однако, что направленные изменения климата вносят свой вклад в этот процесс [29]. Существующие прогнозные оценки для изменения ветрового режима отличаются некоторой противоречивостью. Это связано с высокой естественной изменчивостью скорости ветра, не всегда корректным выбором модельных сценариев и особенностями воспроизведения ветрового режима глобальными климатическими моделями [19].

Для России наиболее детальные оценки изменения скорости ветра были выполнены в составе комплексного климатического исследования Главной геофизической обсерватории им. Воейкова [20]. В этих расчетах авторы использовали результаты CMIP5 для сценария гср 4.5, проведя валидацию глобальных климатических моделей и выбрав те шестнадцать из них, которые наилучшим образом воспроизводят сезонные колебания температуры и осадков. Расчетные изменения скорости ветра составили при этом до ± 1 м/с. Считая это изменение незначительным, авторы воздержались от подробного анализа полученного результата. Между тем, для приповерхностной скорости ветра на территории России величины в 1 м/с порой означают относительное изменение скорости ветра на треть, что способно повлечь за собой изменение выработки ветроустановок почти на порядок.

Выполненные нами оценки (рис. 3, в) использовали ту же методику, что [20], с тем отличием, что валидация моделей проводилась по качеству воспроизведения ими ветрового режима в Северной Евразии [19]. Достоверность полученных оценок обеспечивалась сопоставлением разных вариантов мультимодельного ансамбля. В результате было обнаружено, что в XXI-м столетии над территорией России формируется характерная полярная структура поля изменения приповерхностной скорости ветра. Если в западной части страны скорость ветра несколько снижается, то в Восточной Сибири и Приморье формируется область повышенных скоростей. Этот эффект, по-видимому, связан со сдвигом атмосферной циркуляции, в частности, с ослаблением Сибирского антициклона и активизацией циклонической деятельности над Тихим океаном, наблюдавшейся в последние десятилетия и связываемой обычно с современным изменением климата. Этот качественный результат удивительно стабилен во всех рассматриваемых ансамблях и, более того, нечувствителен к выбору климатического сценария. Одну и ту же картину увеличения скорости ветра на юге Дальнего Востока мы получили и для оптимистического сценария гср 2.6, и для драматического гср 8.5.

3. ГЭС

В России в конце 2010-х гг. ГЭС производят примерно 17 % общенациональной выработки электроэнергии, обладают 21 % общей установленной мощности электростанций России и представляют собой наиболее развитую область возобновляемой энергетики.

Влияние на работу российских ГЭС изменений климата в последние десятилетия уже стало заметным, хотя выражается оно пока, в основном, в перераспределении речного стока по сезонам. Более теплые зимы на территории России приводят к смещению сроков половодья и более плавному его протеканию. Увели-

чение количества выпадающих летом осадков во многих регионах приводит к увеличению летнего стока. В результате распределение стока становится более равномерным по сезонам, что уже сегодня приходится учитывать при управлении режимами крупных гидрокасков.

Что касается изменения величины речного стока, оценка долговременных изменений его изменений осложняется наличием многолетних фаз снижения и повышения водности, связанных в первую очередь с вариациями глобальной атмосферной циркуляции [21]. Наличие этой долгопериодической компоненты в сочетании со стохастической природой формирования речного стока определяют сложность оценки связи речного стока с изменениями климата и приводят к необходимости более детальных исследований.

Динамика речного стока и связанного с ним гидроэнергетического потенциала определяется изменением двух основных климатических факторов: температуры воздуха и количества осадков, влияющих на процесс формирования речного стока для территории России противоположным образом. Если практически повсеместное увеличение осадков способствует увеличению стока, то повышение температуры означает увеличение испаряемости и способно привести к снижению стока. Детальный анализ [6] позволяет сделать вывод, что на значительной части территории России и практически во всех областях страны, где расположены ГЭС, среднегодовой речной сток обнаруживает на протяжении XXI века тенденцию к возрастанию (рис. 4). Наряду с увеличением равномерности распределения стока внутри года, это позволяет заключить, что условия работы ГЭС на территории России, в основном, будут улучшаться. Средняя величина повышения выработки российских ГЭС к середине XXI века составит 3–4 %, что вполне соответствует недавним данным [9].

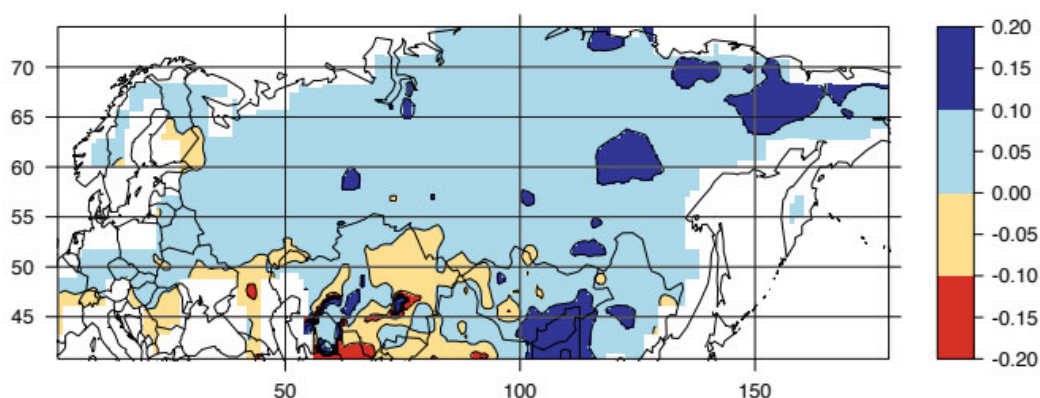


Рис. 4. Относительное изменение речного стока на территории России к середине текущего столетия
 Fig. 4. The relative change in river flow in Russia by the middle of this century

Важное исключение могут составить малые ГЭС юга России, где изменение климата с высокой вероятностью приведет к снижению гидрологических ресурсов (рис. 4). Для рек с ледниковым питанием вероятно нелинейное изменение стока: увеличение в несколько ближайших десятилетий из-за таяния ледников с последующим существенным снижением. Эти эффекты определяются локальными климатическими процессами, учет которых требует использования существенно более детальных климатических моделей, что выходит за рамки нашего рассмотрения. Однако, с учетом формирования в объединённой энергосистеме Юга летнего максимума нагрузки и повышения вероятности, что тепловые и атомные станции по мере потепления климата будут сталкиваться с ограничением выдачи мощности из-за высокой температуры охлаждающей воды, этот вопрос представляется заслуживающим самого внимательного анализа.

4. ВЭС

Ветровая энергетика, которая наряду с солнечной принадлежит к энергетическим технологиям, лидирующим по темпам развития в мире, относится к технологиям ВИЭ, развитие которых поддерживается национальной энергетической стратегией России. Рассматриваются два вида применения ветроуста-

новок: энергоснабжение изолированных энергосистем и развитие ветровой генерации в зонах централизованного энергоснабжения. Исследование возможностей ветроэнергетики в составе микроэлектрических сетей, в первую очередь, в субарктических регионах, составляет предмет отдельного направления отечественных энергетических исследований. В частности, показано [22, 23], что сочетание ветровых, солнечных и дизельных генерирующих установок предоставляет большие возможности для повышения надежности и эффективности энергоснабжения и, в конечном счете, для улучшения уровня жизни на Крайнем Севере, — несмотря на закономерные технологические трудности, сопровождающие развитие возобновляемой генерации в регионах мира с суровыми климатическими условиями.

Для успешной интеграции ветроэнергетики в состав централизованных энергетических систем принципиальное значение имеет корректный учет влияния климатических условий на работу ветрогенераторов. Для долгосрочной динамики ветроэнергетических ресурсов наши расчеты дают изменение относительной скорости ветра в пределах от -15% до $+10\%$ по территории России ко второй половине XXI века по сравнению с началом столетия. Следует иметь в виду, что соответствующее измене-

ние выработки ветроустановок в 2–3 раза превышает изменение скорости ветра из-за резкой зависимости электрической мощности ветроустановки от скорости ветра.

Детали пространственной структуры модельных оценок для полей скорости ветра достаточно сильно зависят от условий расчета, в частности, состава использованного ансамбля и принятого при расчетах сценария. Однако, существуют крупномасштабные особенности изменений скорости ветра, инвариантные относительно сценария и модельного ансамбля, которые, по-видимому, можно считать достаточно достоверными.

Наиболее выраженного снижения скорости ветра следует ожидать в центральной и южной частях европейской территории России, на юге Западной Сибири, а также в отдельных арктических и субарктических регионах Сибири, что согласуется с данными наблюдений [18]. В отдельных районах снижение скорости ветра может привести к снижению выработки ветрогенераторов вплоть до 15 %. К счастью, это едва ли означает наличие серьезных рисков для развития национальной ветроэнергетики, поскольку эти области заметного снижения скорости ветра находятся в тех регионах, где интенсивное развитие ветроэнергети-

ки сейчас не обсуждается. Европейское южное побережье, Балтийское море и Кольский полуостров, где планируется строительство ветропарков, вероятно, будут подвержены относительно небольшим изменениям скорости приземного ветра в диапазоне $\pm 5\%$.

Еще один вывод, следующий из наших расчетов, заключается в выраженной тенденции к увеличению средней скорости ветра на юге Дальнего Востока, соответствующей повышению выработки до 10–15 % (рис. 5). Для Чукотки и Камчатки, где предпринимаются попытки использовать ветроустановки в составе местных изолированных энергосистем, существующий разброс в модельных оценках пока не позволяет сделать однозначный вывод и требует уточненных расчетов. Имеет смысл еще раз подчеркнуть, что выполненные расчеты направлены в первую очередь на получение надежных крупномасштабных прогнозов изменения ветрового потенциала в долгосрочной перспективе. Мезомасштабная комбинированная гидродинамика атмосферы с локальными топографическими эффектами оказывает огромное влияние на работу ветроустановок, что делает необходимым применение процедур регионализации при использовании полученных результатов в детальных моделях энергосистем.

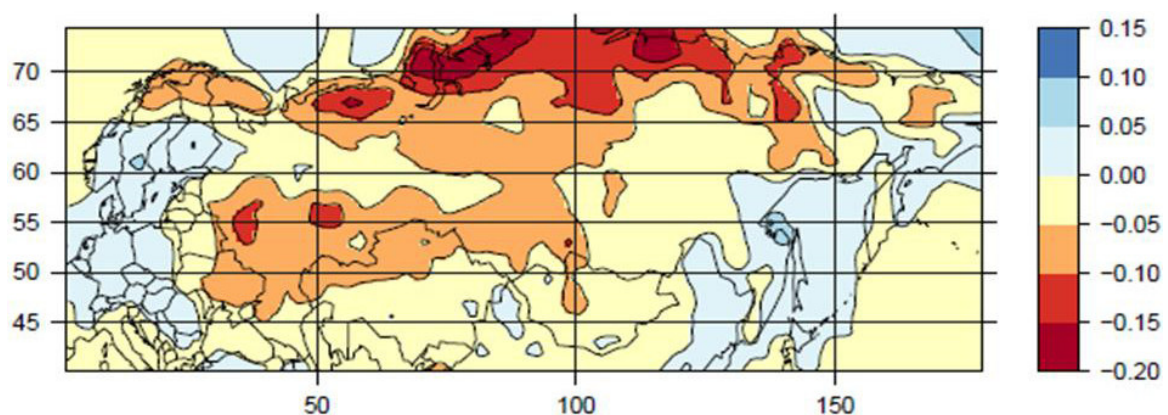


Рис. 5. Относительное изменение технического ветропотенциала на территории России к середине текущего столетия

Fig. 5. The relative change in the technical wind potential in Russia by the middle of this century

Таким образом, вопреки сложившемуся мнению, изменения климата приведут к заметному изменению ветрового режима на территории России в XXI веке. Однако, в степной зоне европейской части России и Западной Сибири, где на сегодняшний день планируется введение большей части промышленных ветропарков, влияние этих изменений будет небольшим. При этом для южной части Дальнего Востока ожидаемые изменения носят однозначно благоприятный характер.

Основные сложности в развитии ветроэнергетики России, тем не менее, будут безусловно связаны с особенностями климата, определяющими характер генерации электроэнергии ветроустановкой. Особенности спектра атмосферной турбулентности приводят к пульсирующему характеру ветровой выработки, что кардинальным образом отличает ВЭС от тепловых или атомных электростанций. Тем не менее, работа ветроустановок в составе энергосистем никоим образом не должна означать неизбежного снижения надежности электроснабжения потребителей. Более того, как показывает опыт развития ветровой энергетики в Германии, увеличение доли ветровой выработки привело даже к повышению надежности немецкой энергосистемы. Безусловно, это произошло не автоматически, но было связано в том числе с развитием электрических сетей, предназначенным именно для интеграции в энергосистему возрастающей доли высокопеременной выработки ВИЭ.

Принципиальную сложность при современном уровне техники представляет обеспечение работы энергосистемы лишь в случае когда доля возобновляемых источников в этой системе приближается к 100 %. Для решения этой задачи разработан целый ряд концепций, включая адаптационное управление нагрузкой потребителя (prosumers), координацию работы многих генерирующих установок ВИЭ (virtual

power plant), использование разного рода накопителей энергии и т. д. В ближайшие одно-два десятилетия весьма вероятен переход этих технологий из состояния лабораторных разработок к реальному внедрению в энергосистемы.

Использование в составе энергосистемы 1–5 % возобновляемой генерации, что соответствует российским планам по развитию ВИЭ на ближайшие несколько лет, никаких принципиальных технических трудностей на сегодняшний день не представляет. Однако, накопленный опыт эксплуатации ветроустановок позволяет утверждать, что их успешная интеграция в энергосистемы требует изменения подхода к управлению энергосистемой и ее структуры по сравнению с энергосистемами, основанными на использовании крупных ТЭС, АЭС или ГЭС. Для России вплоть до сегодняшнего дня исследования этого вопроса практически не проводились. Более того, вступивший в силу в январе 2019 г. ГОСТ Р 58057–2018, рассматривающий общие требования к планированию развития (!) единой энергетической системы и изолированных энергосистем не предусматривает абсолютно никаких технических решений, направленных на интеграцию ВИЭ выработки ВИЭ. В качестве полноправных участников энергосистем стандарт рассматривает ТЭС, АЭС и ГЭС. Единственное упоминание ветровых и солнечных электростанций заключается в требовании их стопроцентного резервирования. Фактически это означает, что на сегодня ввод ветрогенератора в России должен дублироваться одновременным вводом равной тепловой мощности, что делает крайне сомнительными экономические перспективы ВИЭ, особенно с учетом низких цен на ископаемое топливо. Разработка альтернативных подходов к обеспечению надёжности энергосистем России, имеющих в своем составе установки ВИЭ, представляется настоятельно требующей самых интенсивных исследований.

5. Биотопливо

В России биотопливо в настоящее время составляет основу нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ) – в 2015 г. 90 % тепловой и электрической энергии, произведенной из НВИЭ, обеспечили древесное топливо, сельскохозяйственные отходы и биогаз, причем вклад двух последних видов топлива был ничтожен (рис. 1 и табл. 1). В настоящей работе пересчет электрической и тепловой энергии в первичную энергию проводился по среднему удельному расходу топлива в России на КЭС (0,326 г.у.т./кВт·ч) и в котельных (166 кг.у.т./Гкал) соответственно. Доля биоэнергетики в России оказывается немногим ниже, чем в среднем по миру, и составляет около 0,5 % от общей выработки электроэнергии.

Настоящий раздел посвящен оценке изменений энергетического потенциала лесных ресурсов в России, связанных с глобальными изменениями углеродного цикла и региональных изменений климата на территории страны. Ставилась задача рассчитать изменения размера доступных древесных ресурсов, пригодных для энергетического использования, вызванные повышением биопродуктивности лесов за счет увеличения содержания углекислого газа в атмосфере и изменения климатических условий. При этом необходимо сказать, что энергетический потенциал лесов России огромен – в них ежегодно продуцируется не менее 4 млрд т органического углерода или 5 млрд т в пересчете на условное топливо, т. е. в пять раз больше годового энергопотребления страны.

Лесная промышленность России, как и другие отрасли экономики страны, в последние десятилетия претерпевала радикальные изменения. После двукратного роста лесозаготовок в послевоенное время (со 150 млн м³ в 1945 г. до 350 млн м³ в 1960 г.) наблюдался 30-летний период стабильно высоких объемов вывозки древесины, сменившийся резким спадом в 1990-е гг. [26]. Минимум заготовки леса был достигнут в 1998 г. на уровне 100 млн м³, после чего начался период ста-

бильного роста объемов рубок, превысивших в 2017 г. 200 млн м³ [12].

Данные различных источников по энергетическому использованию древесины в России сильно разнятся [12]. Анализ официальных материалов Росстата, Рослесхоза и Минэнерго, вызывающих сильные сомнения специалистов лесной отрасли [12–14], позволяет заключить, что в последние десятилетия в качестве топлива использовалось около 40 млн м³ древесины в год, из которых примерно половину составляли дрова для населения, а оставшуюся часть – древесные отходы, используемые на электростанциях и в котельных. По нашим данным, действительный масштаб энергетического использования древесины существенно выше и составляет не менее 50–60 млн м³.

Для оценки потенциальных объемов использования древесных ресурсов в энергетике были использованы данные по применению в качестве топлива отходов лесозаготовок и деревообработки, а также утилизации продукции из дерева в странах – крупнейших производителях древесины (табл. 2). Как видно из приведенных данных, в указанных странах 20–30 % от объема заготовленной деловой древесины находит применение в качестве топлива. В России в настоящее время этот показатель находится на уровне 10 %, но для перспективной оценки нами использовано значение в 25 %.

Таблица 2

Доля древесины, используемая в качестве топлива (кроме дров для населения), в общем объеме заготавливаемой деловой древесины в некоторых странах

The share of wood used as fuel (except firewood for domestic use) in the total volume of harvested commercial wood in some countries

Страна	2000	2005	2010	2015
США	0.26	0.27	0.36	0.36
Канада	0.16	0.18	0.22	0.19
Швеция	0.19	0.10	0.28	0.25
Финляндия	0.20	0.24	0.34	0.24

Источник. ООН и FAO.

Для расчетов объема лесозаготовок был использован средний («умеренный») из разработанных совместно специалистами FAO и Рослесхоза сценарий [27], экстраполированный нами до 2050 г.. Согласно этому сценарию возможный объем заготовки древесины в России к середине текущего столетия может достичь 380 млн м³/год, что соответствует средним объемам рубок за период 1960–1990 гг. Таким образом, энергетическое использование лесных ресурсов к 2050 г. может составить 95 млн м³. С учетом консервативной оценки децентрализованной заготовки дров для населения в 20 млн м³/год суммарный объем древесного топлива в России может составить около 115 млн м³/год, или, оценивая теплотворную способность древесины в 0.266 т у.т./м³, более 30 млн т у.т./год [11].

Однако эти расчеты справедливы для неизменных природно-климатических условий. Наша же планета переживает период беспрецедентных в исторических масштабах изменений содержания углекислого газа – основного источника питания растений – и температурно-влажностных характеристик климата, которые определяют величину биопродуктивности лесов.

В результате многолетних исследований в различных естественных экосистемах [28], достаточно надежно установлены зависимости первичной нетто-продуктивности (запасании углерода растениями) деревьев от климатических параметров. В диапазоне среднегодовых температур от –5 °С до 10 °С и годового количества осадков от 200 до 1000 мм, соответствующего зонам лесных экосистем России, увеличение чистой биопродуктивности лесов (NPP – Net Primary Production) составляет 0,34 т С/га с повышением температуры воздуха на 1 градус и 0,07 т С/га с увеличением количества осадков на 10 мм/год, что полностью подтверждается результатами детальных исследований последних лет [29, 30].

Чувствительность наземной растительности к изменению концентрации углекислого газа в атмосфере оценивается различными моделями в очень широком диапазоне от 12 до 76 % при удвоении концентрации CO₂ и в среднем еще десять лет назад принималась равной 48 %. Однако, результаты многочисленных полевых ис-

пытаний, в том числе долговременных натуральных экспериментов (FACE – Free-air CO₂ Enrichment) свидетельствуют о гораздо более сдержанном эффекте фертилизации, в среднем на уровне 20–25 % [29]. В настоящей работе используется компромиссная оценка в 28 %, соответствующая той, что используется в нашей боксово-диффузионной модели углеродного цикла с развитым биосферным блоком [31], которая применялась здесь для расчетов глобальных изменений содержания диоксида углерода в атмосфере. В качестве входных данных использовались сценарии антропогенного воздействия на атмосферу [32, 33], разработанные в НИУ «МЭИ» с учетом обязательств, принятых странами-участницами РКИК ООН на основе Парижского соглашения (2015 г.), которое, независимо от причин, по которым оно было принято, несомненно задает долговременный тренд развития мировой энергетики. Прогнозируемое повышение концентрации диоксида углерода с 350 млн⁻¹ в 1990 г. до 460 млн⁻¹ к 2050 г. приведет к увеличению NPP за этот период примерно на 10 %.

Модельные оценки изменения среднегодовой температуры воздуха и годового количества осадков к середине нынешнего столетия на территории России представлены на рис. 3. Следует отметить, что использованный в настоящей работе сценарий антропогенного воздействия на глобальную климатическую систему находится в нижней части обширного диапазона аналогичных сценариев RCP, используемых в современных климатических моделях [33]. Согласно модельным расчетам на основе наиболее агрессивных из них, среднегодовая температура воздуха на планете к середине текущего столетия превысит доиндустриальный уровень на 2–2.5 градуса, а ее изменения на территории России по сравнению с современными значениями составят 2.5–4 градуса [29]. Однако данные измерений состава атмосферы и температуры воздуха в течение последних десятилетий вполне определенно говорят в пользу того, что наблюдаемые климатические изменения соответствуют реализации наиболее умеренных вариантов [33], к которым относится и используемый в настоящей работе.

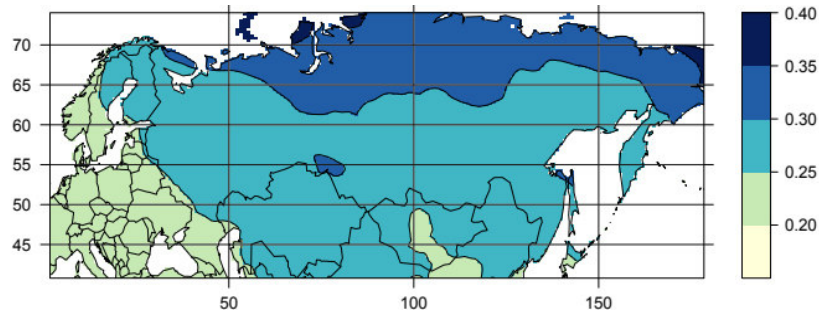


Рис. 6. Изменения чистой продуктивности лесов России к середине текущего столетия (относительно современных значений)

Fig. 6. Changes in the net productivity of Russian forests by the middle of this century (relative to modern values)

Таблица 3

Доля заготовки древесины δV (от суммарного объема в России в 2008–2017 гг.), запасы древесины W и их удельные значения w , площади лесов S , содержание углерода в лесах C и его удельные значения c , прогнозируемые изменения температуры воздуха ΔT , количества осадков ΔP и биоэнергетических ресурсов δNPP к 2050 г. (по сравнению с периодом 1971–2010 гг.) по федеральным округам России

The share of wood harvesting δV (of the total volume in Russia in 2008–2017), wood reserves W and their specific values w , forest area S , carbon content in forests C and its specific values c , projected changes in air temperature ΔT , rainfall ΔP and bioenergy resources δNPP by 2050 (compared with the period 1971–2010) in the federal districts of Russia

Федеральный округ	$\delta V, \%$	W , млрд м ³	S , млн га	w , м ³ /га	C , Гт С	c , т С/га	ΔT , °С	ΔP , мм	δNPP (Т), %	δNPP (Р), %	δNPP (Т, Р, С), %
Центральный	10.7	4.0	23	176	2	72.2	2.5	7	18	1	31
Северо-Западный	25.8	10.4	89	118	4	48.4	1.9	9	16	1	29
Южный	0.4	0.5	3	167	0	68.7	2.5	4	14	1	26
Северо-Кавказский	0.1	0.3	2	163	0	67.1	2.5	2	14	0	25
Приволжский	15.9	5.7	38	151	2	61.9	2.3	7	19	1	32
Уральский	8.0	8.1	69	117	3	48.0	2.3	10	23	2	37
Сибирский	31.3	33.2	277	120	14	49.2	2.7	10	30	2	45
Дальневосточный	7.9	20.6	295	70	8	28.7	2.3	11	26	2	40
Россия	100.0	82.8	795	104	34	42.8	2.4	7.5	25	2	40

Источники. Росстат, расчеты авторов.

Результаты расчетов изменения чистой продуктивности лесов России к середине текущего столетия приведены на рис. 6.

Результаты расчетов увеличения объемов заготовки древесины в энергетических целях за счет изменения биопродуктивности лесов России к середине текущего столетия по федеральным округам сведены в табл. 3.

Эти расчеты должны быть скорректированы на возможное увеличение потерь леса из-за ожидаемого распространения болезней и вредителей, которое оценивается примерно в 10 % [13, 14]. Таким образом, в целом с тех же площадей

вырубок к 2050 г. за счет повышения биопродуктивности отечественных лесов можно будет заготовить примерно на 30 % больше древесины, чем в последние десятилетия. Следовательно, обусловленное наблюдающимися и ожидаемыми природно-климатическими изменениями увеличение доступных энергетических ресурсов древесного топлива может к середине столетия составить более 9 млн т у.т., что по абсолютной величине значительно превышает климатические эффекты для других отраслей энергетики – как отрицательные для ТЭС и АЭС (ожидаемое снижение КПД тепловых циклов электростан-

ций, что приведет к дополнительному расходу топлива в 2,0 млн т у.т./год [3–4], так и положительные для ГЭС (вероятный рост электрогенерации на 4 %, или 7–8 млрд кВт·ч/год, что эквивалентно снижению расхода органического топлива на 2,5 млн т у.т./год)

Заключение

Возобновляемые источники энергии, как и другие отрасли энергетики, в значительной мере зависят от климатических условий, причем влияние изменения этих условий носит разнонаправленный характер.

Проведенное исследование показало, что наблюдающиеся и ожидаемые на территории России изменения климата в целом благоприятны для основных отраслей ВИЭ, использующих гидроэнергетические ресурсы, энергию ветра и древесное топливо. Этот эффект повышения энергетического потенциала ВИЭ в наибольшей степени будет выражен на юге

российского Дальнего Востока. Это означает, что местным энергосистемам будет предоставлен, быть может, уникальный шанс модернизации на более современной технологической базе по сравнению с угольными электростанциями, составляющими существенную часть сегодняшних энергосистем. Изменение климата благоприятствует плану внедрения возобновляемых источников энергии в изолированные энергосистемы, реализация которых в настоящее время постепенно начинается в энергетических системах Дальнего Востока.

Суммарный энергетический эффект (замещение органического топлива) к середине текущего столетия может составить более 10 млн т у.т. по инерционному сценарию, а при ускоренном развитии ВИЭ в России – в 2–3 раза больше, что значительно превышает по абсолютной величине негативные эффекты климатических изменений в теплоэнергетике за счет снижения эффективности работы паровых и газовых турбин (рис. 7)

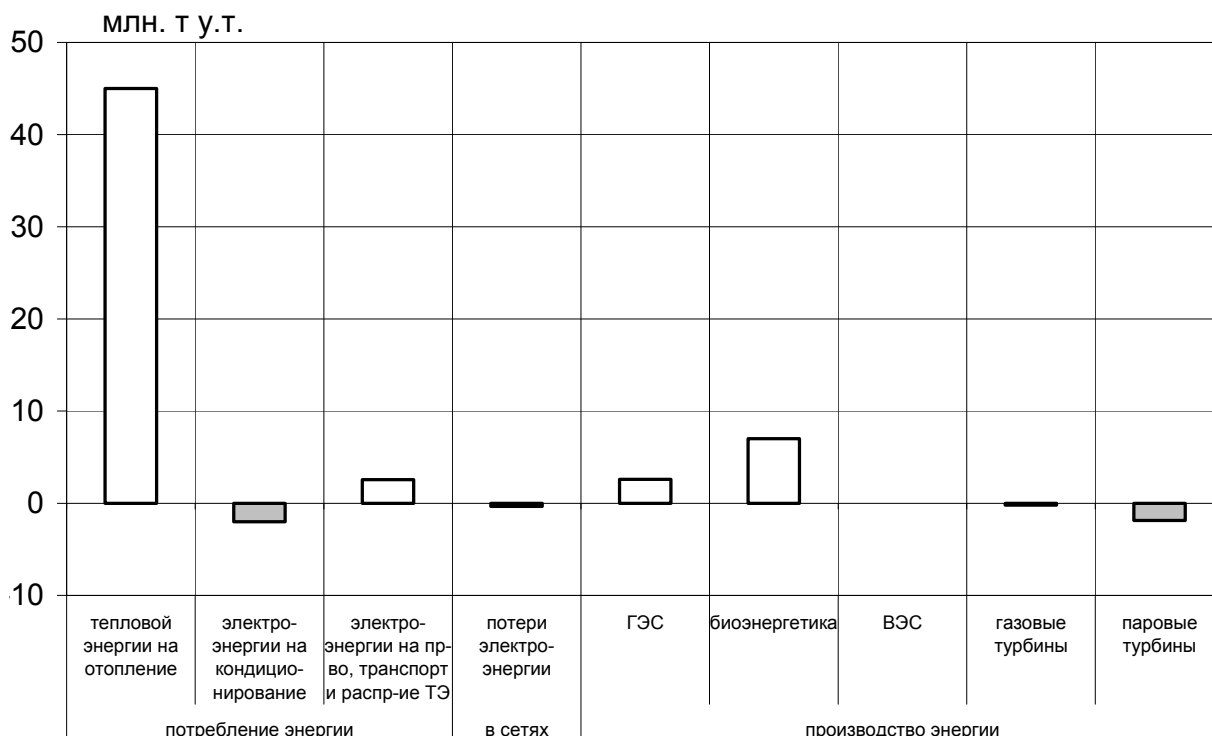


Рис. 7. Экономия потребления органического топлива за счет влияния климатических изменений на производство, распределение и потребление различных видов энергии в России

Fig. 7. Fossil fuels conservation due to the impact of climate change on the production, distribution and consumption of various types of energy in Russia

Однако, в силу значительной пространственной неравномерности наблюдающихся и ожидаемых изменений климатических характеристик (температуры воздуха, количества осадков, скорости ветра), их учет необходим при проектировании новых объектов ВИЭ. Так, модельные расчеты указывают на снижение речного стока в южных регионах европейской части России и уменьшение ветроэнергетического потенциала в западной части страны, что нужно принимать во внимание при разработке схем размещения малых ГЭС и ветропарков. Однако, наиболее критическим для развития ВИЭ в России, безусловно, является учёт особенностей возобновляемой генерации при ее интеграции в энергосистемы.

В работе использованы данные Федеральной службы статистики России (Росстат, www.gks.ru), Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации Росгидромета (ВНИИГМИ-МЦД, www.meteo.ru), Организации по продо-

вольствию и сельскому хозяйству ООН (FAO, www.faostat.org), Международного энергетического агентства (IEA, www.iea.org), компании British Petroleum (www.bp.org), Национальной службы по исследованиям атмосферы и океана (NOAA, www.noaa.gov), Министерства энергетики РФ (Минэнерго, www.minenergo.gov.ru), Системного оператора ЕЭС России (СО ЕЭС, www.so-ups.ru)

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 13.1137.2017/ПЧ) в части моделирования климатических изменений на территории России, РФФИ (грант 17-08-00134) в части оценки потенциала энергетических биоресурсов в России и РФФИ (грант 18-79-10255) в части анализа практик применения НВИЭ с учетом изменения климатических условий. Авторы благодарны Немецкому климатическому расчетному центру и рабочим группам проекта CMIP5, перечисленным в таблице Приложения, за предоставленный доступ к результатам глобальных климатических моделей.

Приложение

Модели CMIP5, результаты которых были использованы в настоящей работе для получения ансамблевых оценок

Название модели	Институт	Описание
ACCESS 1.0 ACCESS 1.3	Научный и промышленный исследовательский центр Содружества / Метеорологический центр, Австралия (CSIRO-BOM)	[П1]
BNU-ESM	Пекинский педагогический университет, Китай (BNU)	[П2]
CanESM2	Канадский центр моделирования и анализа климата (CCCMA)	[П3]
CMCC-CESM CMCC-CMS CMCC-CM	Европейско-Средиземноморский центр изучения изменений климата, Италия (CMCC)	[П4]
CNRM-CM5	Национальный центр метеорологических расчетов, Европейский расчетный центр и образования в области научных вычислений, Франция (CNRM-CERFACS)	[П5]
CSIRO-Mk 3.6.0	Научный и промышленный исследовательский центр Содружества / Центр изучения изменений климата в Квинсленде, Австралия (CSIRO-QCCCE)	[П6]
GFDL-CM3 GFDL-ESM2G GFDL-ESM2M	Лаборатория геофизической гидродинамики, США (NOAA GFDL)	[П7, П8]
HadGEM2-CC HadGEM2-ES	Центр прогнозирования и исследования климата Хедли, Великобритания (MOHC)	[П9]
IPSL-CM5A-LR IPSL-CM5A-MR IPSL-CM5B-LR	Институт Пьера Симона Лапласа, Франция (IPSL)	[П10]

Окончание таблицы

Название модели	Институт	Описание
MIROC-ESM MIROC-ESM-CHEM MIROC5	Токийский университет, Институт исследований атмосферы и океана, Национальный институт экологических исследований и Японское агентство океанологии и технологии, Япония (MIROC)	[П11, П12]
MPI-ESM-LR MPI-ESM-MR	Метеорологический институт ми. Макса Планка, Германия (MPI-M)	[П13]
MRI-CGCM3 MRI-ESM1	Институт метеорологических исследований, Япония (MRI)	[П14]
bcc-csm1-1-m bcc-csm1-1	Пекинский климатический центр, Китай (BCC)	[П15]
inmcm4	Институт вычислительной математики Российской академии наук, Россия (INM)	[П16]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ К ПРИЛОЖЕНИЮ

[П1] Bi D., Dix M., Marsland S., O'Farrell S., Rashid H., Uotila P., Hirst A., Kowalczyk E., Golebiewski M., Sullivan A., Yan H., Hannah N., Franklin C., Sun Z., Vohralik P., Watterson I., Zhou X., Fiedler R., Collier M., Ma Y., Noonan J., Stevens L., Uhe P., Zhu H., Griffies S., Hill R., Harris C., Puri K. The ACCESS coupled model: description, control climate and evaluation // Australian Meteorological and Oceanographic Journal. 2013. Vol. 63. P. 41–64. DOI: 10.22499/2.6301.004

[П2] Ji D., Wang L., Feng J., Wu Q., Cheng H., Zhang Q., Yang J., Dong W., Dai Y., Gong D., Zhang R.H., Wang X., Liu J., Moore J.C., Chen D., Zhou M.. Description and basic evaluation of Beijing Normal University Earth System Model (BNU-ESM) version 1 // Geoscientific Model Development Discussions. 2014. Vol. 7, no. 5. P. 2039–2064. DOI: 10.5194/gmd-7-2039-2014

[П3] Arora V.K., Boer G.J. Terrestrial ecosystems response to future changes in climate and atmospheric co2 concentration // Biogeosciences. 2014. Vol. 11, no. 15. P. 4157–4171. DOI: 10.5194/bg-11-4157-2014

[П4] Fogli P.G., Iovino D. CMCC-CCESM-NEMO: Toward the New CMCC Earth System Model. 2014 CMCC Research Paper No. 248. URL: <https://ssrn.com/abstract=2603176>. DOI: 10.2139/ssrn.2603176

[П5] Voldoire A., Sanchez-Gomez E., Salas y Méliá D., Decharme B., Cassou C., Sénési S., Valcke S., Beau I., Alias A., Chevallier M., Déqué M., Deshayes J., Douville H., Fernandez E., Madec G., Maisonnave E., Moine M.P., Planton S., Saint-Martin D., Szopa S., Tyteca S., Alkama R., Belamari S., Braun A., Coquart L., Chauvin F. The CNRM-CM5.1 global climate model: Description and basic evaluation // Climate Dynamics. 2013. Vol. 40, No. 9–10. P. 2091–2121. DOI: 10.1007/s00382-011-1259-y

[П6] Gordon H.B., O'Farrell S.P., Collier M.A., Dix M.R., Rotstayn L.D., Kowalczyk E.A., Hirst A.C., Watterson I.G. The CSIRO Mk3.5 Climate Model. Technical Report No. 21. The Centre for Australian Weather and Climate Research, Aspendale, Vic., Australia. 2010. 62 p.

[П7] Griffies S.M., Winton M., Donner L.J., Horowitz L.W., Downes S.M., Farneti R., Gnanadesikan A., Hurlin W.J., Lee H.C., Liang Z., Palter J.B., Samuels B.L., Wittenberg A.T., Wyman B.L., Yin J., Zadeh N. The GFDL CM3 coupled climate model: Characteristics of the ocean and sea ice simulations // Journal of Climate. 2011. Vol. 24. P. 3520–3544. DOI: 10.1175/2011JCLI3964.1

[П8] Dunne J.P., John J.G., Shevliakova S., Stouffer R.J., Krasting J.P., Malyshev S.L., Milly P.C., Sentman L.T., Adcroft A.J., Cooke W., Dunne K.A., Griffies S.M., Hallberg R.W., Harrison M.J., Levy H., Wittenberg A.T., Phillips P.J., Zadeh N. GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon earth system models. Part II: Carbon system formulation and baseline simulation characteristics // Journal of Climate. 2013. Vol. 26, No. 7. P. 2247–2267. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00150.1

[П9] Martin G.M., Bellouin N., Collins W.J., Culverwell I.D., Halloran P.R., Hardiman S.C., Hinton T.J., Jones C.D., McDonald R.E., McLaren A.J., O'Connor F.M., Roberts M.J., Rodriguez J.M., Woodward S., Best M.J., Brooks M.E., Brown A.R., Butchart N., Dearden C., Derbyshire S.H., Dharssi I., Doutriaux-Boucher M., Edwards J.M., Falloon P.D., Gedney N., Gray L.J., Hewitt H.T., Hobson M., Huddleston M.R., Hughes J., Ineson S., Ingram W.J., James P.M., Johns T.C., Johnson C.E., Jones A., Jones C.P., Joshi M.M., Keen A.B., Liddicoat S., Lock A.P., Maidens A.V., Manners J.C., Milton S.F., Rae J.G., Ridley J.K., Sellar A., Senior C.A.,



Totterdell I.J., Verhoef A., Vidale P.L., Wiltshire A. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations // *Geoscientific Model Development Discussions*. 2011. Vol. 4, no. 3. P. 723–757. DOI: 10.5194/gmd-4-723-2011

[П110] Dufresne J.L., Foujols M.A., Denvil S., Caubel A., Marti O., Aumont O., Balkanski Y., Bekki S., Bellenger H., Benschila R., Bony S., Bopp L., Braconnot P., Brockmann P., Cadule P., Cheruy F., Codron F., Cozic A., Cugnet D., de Noblet N., Duvel J.P., Ethé C., Fairhead L., Fichet F., Flavoni S., Friedlingstein P., Grandpeix J.Y., Guez L., Guilyardi E., Hauglustaine D., Hourdin F., Idelkadi A., Ghattas J., Joussaume S., Kageyama M., Krinner G., Labetoulle S., Lahellec A., Lefebvre M.P., Lefevre F., Levy C., Li Z.X., Lloyd J., Lott F., Madec G., Mancip M., Marchand M., Masson S., Meurdesoif Y., Mignot J., Musat I., Parouty S., Polcher J., Rio C., Schulz M., Swingedouw D., Szopa S., Talandier C., Terray P., Viovy N., Vuichard N. Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: From CMIP3 to CMIP5 // *Climate Dynamics*. 2013. Vol. 40, no. 9–10. P. 2123–2165. DOI: 10.1007/s00382-012-1636-1

[П111] Watanabe M., Suzuki T., O'Ishi R., Komuro Y., Watanabe S., Emori S., Takemura T., Chikira M., Ogura T., Sekiguchi M., Takata K., Yamazaki D., Yokohata T., Nozawa T., Hasumi H., Tatebe H., Kimoto M. Improved climate simulation by MIROC5: Mean states, variability, and climate sensitivity // *Journal of Climate*. 2010. Vol. 23. P. 6312–6335. doi:10.1175/2010JCLI3679.1

[П112] Watanabe S., Hajima T., Sudo K., Nagashima T., Takemura T., Okajima H., Nozawa T., Kawase H., Abe M., Yokohata T., Ise T., Sato H., Kato E., Takata K., Emori S., Kawamiya M. MIROC-ESM 2010: Model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments //

Geoscientific Model Development Discussions. 2011. Vol. 4, no. 2. P. 1063–1128. DOI: 10.5194/gmd-4-845-2011

[П113] Giorgetta M.A., Jungclaus J., Reick C.H., Legutke S., Bader J., Böttinger M., Brovkin V., Crueger T., Esch M., Fieg K., Glushak K., Gayler V., Haak H., Hollweg H., Ilyina T., Kinne S., Kornbluh L., Matei D., Mauritsen T., Mikolajewicz U., Mueller W., Notz D., Pithan F., Raddatz T., Rast S., Redler R., Roeckner E., Schmidt H., Schnur R., Segschneider J., Six K.D., Stockhause M., Timmreck C., Wegner J., Widmann H., Wieners K., Claussen M., Marotzke J., Stevens B. Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5 // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2013. Vol. 5. P. 1–26. DOI: 10.1002/jame.20038

[П114] Yukimoto S., Adachi Y., Hosaka M., Sakami T., Yoshimura H., Hirabara M., Tanaka T.Y., Shindo E., Tsujino H., Deushi M., Mizuta R., Yabu S., Obata A., Nakano H., Koshiro T., Ose T., Kitoh A. A New Global Climate Model of the Meteorological Research Institute: MRI-CGCM3. Model Description and Basic Performance // *Journal of the Meteorological Society of Japan*. 2012. Vol. 90A. P. 23–64. DOI: 10.2151/jmsj.2012-a02

[П115] Xiao-Ge X., Tong-Wen W., Jie Z. Introduction of CMIP5 Experiments Carried out with the Climate System Models of Beijing Climate Center // *Advances in Climate Change Research*. Vol. 4. P. 41–49. 2015. DOI: 10.3724/sp.j.1248.2013.041

[П116] Volodin E.M., Dianskii N.A., Gusev A.V. Simulating present-day climate with the INMCM4.0 coupled model of the atmospheric and oceanic general circulations // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2010. Vol. 46, no. 4. P. 414–431. DOI: 10.1134/s000143381004002x

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field C.B., Barros V.R., Dokken D.J., Mach K.J., Mastrandrea M.D., Bilir T.E., Chatterjee M., Ebi K.L., Estrada Y.O., Genova R.C., Girma B., Kissel E.S., Levy A.N., MacCracken S., Mastrandrea P.R., White L.L. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1132 p.

[2] Второй оценочный доклад об изменении климата и их последствиях на территории РФ / под ред. В.М. Катцова, С.М. Семенова. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.

[3] Klimenko V.V., Fedotova E.V., Tereshin A.G. Vulnerability of the Russian power industry to the climate change // *Energy*. 2018. Vol. 142. P. 1010–11022. DOI: 10.1016/j.energy.2017.10.069

[4] Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г., Федотова Е.В. Влияние изменений климата на производство, распределение и потребление энергии в России // *Теплоэнергетика*. 2018. № 5. С. 5–16.

[5] Порфирьев Б.Н., Рогинок С.А. Энергетика на возобновляемых источниках: перспективы в мире и в России // *Вестник РАН*. 2016. Т. 86, № 1. С. 963–971.

[6] Клименко В.В., Федотова Е.В. Гидроэнергетика России в условиях глобальных изменений климата // *Доклады РАН*. 2019. Т. 484. № 2. С. 156–160.

- [7] Александровский А.Ю., Клименко В.В., Терешин А.Г., Микушина О.В., Касилова Е.В., Волков Д.М., Борщ П.С., Подольский М.С., Пугачев Р.В., Солдаткин А.Ю., Сычев Д.С. Особенности функционирования гидроэнергетики России в изменяющихся внешних условиях (на примере Волжско-Камского каскада ГЭС) / под общ. ред. проф. А.Ю. Александровского и чл.-корр. РАН В.В. Клименко. М.: ИД Энергия, 2016. 170 с.
- [8] Федоров М.П., Елистратов В.В., Акентьева Е.М. Гидроэнергетика в условиях вероятных климатических изменений // Гидротехническое строительство. 2014. № 6. С. 17–23.
- [9] Федоров М.П., Акентьева Е.М., Елистратов В.В., Масликов В.И., Сидоренко Г.И. Водно-энергетические режимы гидроэлектростанций в условиях климатических изменений / под ред. Ю.С. Васильева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. 274 с.
- [10] Васильев Ю.С., Сидоренко Г.И., Фролов В.В. Методика обоснования параметров малых гидроэлектростанций // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2012. № 1–1 (147). С. 76–84.
- [11] Klivenko V., Mikushina O., Tereshin A. Increase of Energy Potential of Russian Forest resources due to Climate Change and CO₂ Fertilization // E3S Web Conf. 2019. Vol. 103 Id. 02005. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910302005>
- [12] Левин А.Б., Суханов В.С., Шереметьев Д.В. Энергетический потенциал топливного ресурса лесной биоэнергетики РФ // Лесной вестник. 2010. № 4. С. 37–42.
- [13] Кракнер Ф., Ледук С., Фусс С., Щепашенко Д.Г., Швиденко А.З. Подходы к развитию устойчивой биоэнергетики на основе лесных ресурсов северной Евразии // Сибирский лесной журнал. 2018. № 1. С. 16–25.
- [14] Замолодчиков Д., Краев Г. Влияние изменений климата на леса России. Зафиксированные воздействия и прогнозные оценки // Устойчивое лесопользование. 2016. № 4. С. 23–31.
- [15] Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. От Рио до Киото и Парижа: как усилия по охране глобального климата влияют на развитие мировой энергетики // Теплоэнергетика. 2019. № 11. (in press)
- [16] Milly P.C.D., Betancourt J., Falkenmark M., Hirsch R.M., Kundzewicz Z.W., Lettenmaier D.P., Stouffer R.J. Stationarity is dead: Whither water management? // Science. 2008. Vol. 319. P. 573–574.
- [17] Klivenko V.V., Fedotova E.V. Development of multi-model ensemble climate estimates using open source environment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 211. id. E2111084/ DOI: 10.1088/1755-1315/211/1/012084
- [18] Бульгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н. Изменения режима ветра на территории России в последние десятилетия // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2013. Вып. 568. С. 156–173.
- [19] Carvalho D., Rocha A., Gómez-Gesteira M., Silva Santos C. Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections // Renewable Energy. 2017. Vol. 101. P. 29–40. DOI: 10.1016/j.renene.2016.08.036
- [20] Школьник И.М., Мелешко В.П., Стадник В.В., Хлебникова Е.И., Акентьева Е.М., Генехович Е.Л., Киселев А.А. Влияние климата на производство и потребление энергии в России // Тр. Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2014. Вып. 573. С. 92–222.
- [21] Попова В.А., Георгиади А.Г. Спектральные оценки связи изменчивости стока Волги и Северо-атлантического колебания в 1882–2007 гг. // Изв. РАН. Серия географическая. 2017. № 2. С. 47–59.
- [22] Елистратов В.В., Виноградова (Чернова) А.В. Моделирование режимов работы энергетического комплекса ВЭС-ГЭС в децентрализованной системе энергоснабжения // Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 9–10. С. 12–24. DOI: 10.15518/isjaee.2016.09-10.012-024
- [23] Кузнецов Н.М., Коновалова О.Е., Победоносцева В.В. Управление энергоэффективностью в регионах Арктической зоны РФ // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 8, № 17. С. 20–34.
- [24] Gustavsson L., Haus S., Lundblad M., Lundström A., Ortiz C.A., Sathre R., Le Truong N., Wikberg P.-E. Climate change effects of forestry and substitution of carbon-intensive materials and fossil fuels // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 67. P. 612–624.
- [25] Giuntoli J., Agostini A., Caserini S., Lugato E., Baxter D., Marelli L. Climate change impacts of power generation from residual biomass // Biomass and Bioenergy. 2016. Vol. 89. P. 146–158.
- [26] Колесников И.В., Велищанский В.М., Литвиненко Б.Д., Локшин М.М., Некрасов Н.С., Акимов В.М., Гиряев М.Д. Лесопользование в Российской Федерации в 1946–1992 гг. М.: Рослесхоз, 1996. 313 с.
- [27] Прогноз развития лесного сектора Российской Федерации до 2030 года / под ред. А. Петрова,



М. Лобовикова. Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных наций. Рим: ФАО, 2012. 96 с.

[28] **Кобак К.И.** Биотические компоненты углеродного цикла. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 248 с.

[29] Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.]. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 p.

[30] **Schaphoff S., Reyera C.P.O., Schepaschenko D., Gertena D., Shvidenko A.** Observed and projected climate change impacts on Russia's forests and its carbon balance // Forest Ecology and Management. 2016. Vol. 361. P. 432–444.

[31] **Klimenko A.V., Klimenko V.V., Fyodorov M.V., Snytin S.Yu.** Modification of Major CO₂ Sources under Conditions of the Man-Change Environment, Proc. of the 5th International Energy Conference. Seoul, Korea, 5 (1993) 56–61.

[32] **Клименко В.В., Клименко А.В., Микушина О.В., Терешин А.Г.** Парижская конференция по климату – поворотный пункт в истории мировой энергетики // Доклады РАН. 2016. Т. 468, № 5. С. 521–524.

[33] **Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г.** Опыт построения дальних прогнозов воздействия мировой энергетики на атмосферу Земли // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 2. С. 158–168.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

КЛИМЕНКО Владимир Викторович – член-корреспондент РАН, доктор технических наук, главный научный сотрудник, руководитель лаборатории Национального исследовательского университета «МЭИ»

E-mail: nilgpe@mpei.ru

ТЕРЕШИН Алексей Германович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Национального исследовательского университета «МЭИ»

E-mail: TereshinAG@mpei.ru

ФЕДОТОВА Екатерина Валерьевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Национального исследовательского университета «МЭИ»

E-mail: KasilovaEV@mpei.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 06.09.2019

REFERENCES

[1] Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C.B. Field, V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

[2] Vtoroy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii RF [The Second Roshydromet Assessment Report on Climate Change and its Consequences in the Russian Federation]. Ed. V.M. Kattzov, S.M. Semenov. Moscow: Roshydromet, 2014.

[3] **V.V. Klimenko, E.V. Fedotova, A.G. Tereshin,** Vulnerability of the Russian power industry to the climate change, Energy, 142 (2018) 1010–11022. DOI: 10.1016/j.energy.2017.10.069

[4] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin, Ye.V. Fedotova,** Impact of climate change on energy production, distribution, and consumption in Russia, Thermal Engineering, 65 (5) (2018) 247–257.

[5] **B.N. Porfiryev, S.A. Roginko,** A. Energy on renewable sources: Prospects for the world and for Russia, Herald of the Russian Academy of Sciences, 86 (6) (2016) 433–440.

[6] **V.V. Klimenko, Ye.V. Fedotova,** Russian hydropower under the global climate change, Doklady Physics, 64 (1) (2019) 39–43.

[7] **A.Yu. Aleksandrovskiy, V.V. Klimenko, A.G. Tereshin, O.V. Mikushina, Ye.V. Kasilova, D.M. Volkov, P.S. Borshch, M.S. Podolskiy, R.V. Pugachev, A.Yu. Soldatkin, D.S. Sychev,** Osobennosti funktsionirovaniya gidroenergetiki Rossii v izmenyayushchikhsya vneshnikh usloviyakh (na primere Volzhsko-Kamskogo kaskada GES) [Peculiarities of Hydropower Operation in Russia under Changing External

Conditions (the Volga-Kama Cascade Case Study]. Ed. A.Yu. Aleksandrovsky, V.V. Klimenko. Moscow: Energija Publ. House, 2016.

[8] **M.P. Fedorov, V.V. Yelistratov, Ye.M. Akentyeva**, Hydraulic power engineering under conditions of probable climate changes, *Power Technology and Engineering*, 48 (4) (2014) 277–283.

[9] **M.P. Fedorov, Ye.M. Akentyeva, V.V. Yelistratov, V.I. Maslikov, G.I. Sidorenko**, Vodno-energeticheskiye rezhimy gidroelektrostantsiy v usloviyakh klimaticheskikh izmeneniy [Water – power regimes of hydropower plants under conditions of climate change]. Ed. by Yu.S. Vasiliev. St. Petersburg: StPbPU Publ., 2017.

[10] **Yu.S. Vasilyev, G.I. Sidorenko, V.V. Frolov**, Metodika obosnovaniya parametrov malyykh gidroelektrostantsiy [Method of substantiation of parameters of small hydropower plants]. St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology, 1–1 (147) (2012) 76–84.

[11] **V. Klimenko, O. Mikushina, A. Tereshin**, Increase of Energy Potential of Russian Forest resources due to Climate Change and CO2 Fertilization, *E3S Web Conf.*, 103 (2019). Id. 02005. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910302005>

[12] **A.B. Levin, V.S. Sukhanov, D.V. Sheremetyev**, Energeticheskiy potentsial toplivnogo resursa lesnoy bioenergetiki RF [Power potential of fuel resources of wood bioenergy in Russia], *Lesnoy vestnik [Forestry Bulletin]*, 4 (2010) 37–42.

[13] **F. Kraxner, S. Leduk, S. Fuss, D.G. Shchepashchenko, A.Z. Shvidenko**, Sustainable forest-based bioenergy in Eurasia, *Sibirskiy Lesnoj Zurnal [Siberian Journal of Forest Science]*, 1 (2018) 16–25.

[14] **D. Zamolodchikov, G. Krayev**, Vliyaniye izmeneniy klimata na lesa Rossii. Zafiksirovannyye vozdeystviya i prognoznyye otsenki [Impact of climatic changes on Russian forests: recorded impacts and forecasts], *Ustoychivoye lesopolzovaniye*, 4 (2016) 23–31.

[15] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin**, From Rio to Paris via Kyoto: How the efforts to protect the global climate affect the development of the world power industry, *Thermal Engineering*, 66 (11) (2019) 769–778.

[16] **P.C.D. Milly, J. Betancourt, M. Falkenmark, R.M. Hirsch, Z.W. Kundzewicz, D.P. Lettenmaier, R.J. Stouffer**, Stationarity is dead: Whither water management? *Science*, 319 (2008) 573–574.

[17] **V.V. Klimenko, E.V. Fedotova**, Development of multi-model ensemble climate estimates using open-source environment, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 211 (2018) Id. E2111084. DOI: [10.1088/1755-1315/211/1/012084](https://doi.org/10.1088/1755-1315/211/1/012084)

[18] **O.N. Bulygina, N.N. Korshunova, V.N. Razuvayev**, Izmeneniya rezhima vetra na territorii Rossii v posledniye desyatiletiya [Changes in the wind regime over Russia in the last decades], *Tr. Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voyeykova [Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory]*, 568 (2013) 156–173.

[19] **D. Carvalho, A. Rocha, M. Gómez-Gesteira, C. Silva Santos**, Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections, *Renewable Energy*, 101 (2017) 29–40. DOI: [10.1016/j.renene.2016.08.036](https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.08.036)

[20] **I.M. Shkolnik, V.P. Meleshko, V.V. Stadnik, Ye.I. Khlebnikova, Ye.M. Akentyeva, Ye.L. Genikhovich, A.A. Kiselev**, Vliyaniye klimata na proizvodstvo i potrebleniye energii v Rossii [Impact of climate change on energy production and consumption in Russia], *Tr. Glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A.I. Voyeykova [Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory]*, 573 (2014) 92–222.

[21] **V.A. Popova, A.G. Georgiadi**, Spektralnyye otsenki svyazi izmenchivosti stoka Volgi i Severoatlanticheskogo kolebaniya v 1882–2007 gg. [Spectral Evaluations of the Link between Variability of the Volga River Runoff and the North Atlantic Oscillation in 1882–2007], *Izv. RAN. Seriya geograficheskaya [RAS Proceedings. Geograph Series]*, 2 (2017) 47–59.

[22] **V.V. Yelistratov, A.V. Vinogradova (Chernova)**, Modelirovaniye rezhimov raboty energeticheskogo kompleksa VES-GES v detsentralizovannoy sisteme energosnabzheniya [Simulation of WPP/HPP power system operating modes in decentralized power supply system], *Alternativnaya energetika i ekologiya [Alternative Energy and Ecology]*, 9–10 (2016) 12–24. DOI: [10.15518/isjiae.2016.09-10.012-024](https://doi.org/10.15518/isjiae.2016.09-10.012-024)

[23] **N.M. Kuznetsov, O.Ye. Konovalova, V.V. Pobedonostseva**, Upravleniye energoeffektivnostyu v regionakh Arkticheskoy zony RF [Management of energy efficiency in the regions of the arctic zone of the Russian federation], *Trudy Kolskogo nauchnogo tsentra RAN [Transactions of Kola Science Centre. Energy Technology Series 17]*, 8 (17) (2018) 20–34 20–34.

[24] **L. Gustavsson, S. Haus, M. Lundblad, A. Lundström, C.A. Ortiz, R. Sathre, N. Le Truong, P.-E. Wikberg**, Climate change effects of forestry and substitution of carbon-intensive materials and fossil fuels, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67 (2017) 612–624.

[25] **J. Giuntoli, A. Agostini, S. Caserini, E. Lugato, D. Baxter, L. Marelli**, Climate change impacts of power generation from residual biomass, *Biomass and Bioenergy*, 89 (2016) 146–158.



- [26] **I.V. Kolesnikov, V.M. Velishchanskiy, B.D. Litvinenko, M.M. Lokshin, N.S. Nekrasov, V.M. Akimov, M.D. Giryayev**, Lesopolzovaniye v Rossiyskoy Federatsii v 1946–1992 gg. [Forest management in Russia 1946–1992]. Rosleskhoz [Research and Information Centre for Forest Resources], Moscow, 1996.
- [27] **A. Petrov, M. Lobovikov (eds)**, The Russian Federation Forest Sector: Outlook Study to 2030. FAO, Roma, 2012.
- [28] **K.I. Kobak**, Bioticheskiye komponenty uglerodnogo tsikla. [Biotic Components of the Carbon Cycle]. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1988.
- [29] Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. R.K. Pachauri, L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.
- [30] **S. Schaphoff, C.P.O. Reyer, D. Schepaschenko, D. Gertena, A. Shvidenko**, Observed and projected climate change impacts on Russia's forests and its carbon balance, Forest Ecology and Management, 361 (2016) 432–444.
- [31] **A.V. Klimenko, V.V. Klimenko, M.V. Fyodorov, S.Yu. Snytin**, Modification of Major CO₂ Sources under Conditions of the Man-Change Environment, Proc. of the 5th International Energy Conference. Seoul, Korea, 5 (1993) 56–61.
- [32] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, O.V. Mikushina, A.G. Tereshin**, The 2015 Paris climate conference: a turning point in the world's energy history, Doklady Physics, 61 (6) (2016) 301–304.
- [33] **V.V. Klimenko, A.V. Klimenko, A.G. Tereshin**, Test of developing long-term forecasts of world energy impact on the earth's atmosphere, Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics, 51 (2) (2015) 138–147.

THE AUTHORS

- KLIMENKO Vladimir V.** – *National Research University «Moscow Power Engineering Institute»*
E-mail: nilgpe@mpei.ru
- TERESHIN Aleksei G.** – *National Research University «Moscow Power Engineering Institute»*
E-mail: TereshinAG@mpei.ru
- FEDOTOVA Ekaterina V.** – *National Research University «Moscow Power Engineering Institute»*
E-mail: KasilovaEV@mpei.ru

Received: 06.09.2019