

УДК 621.311.213

## ГИДРОЭНЕРГЕТИКА РОССИИ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА

Член-корреспондент РАН В. В. Клименко, Е. В. Федотова

Поступило 17.08.2018 г.

Рассмотрено влияние изменений климата столетия в России на работу гидроэлектростанций в течение XXI века. Для получения количественных оценок использовано ансамблевое осреднение результатов глобальных климатических моделей для речного стока. Кроме стандартных климатических сценариев гср, рассмотрен сценарий МЭИ, принципиальное отличие которого состоит в выборе наиболее вероятных траекторий развития мировой экономики. Установлено, что выбор сценария оказывает существенное влияние как на качественную картину изменений речного стока по территории, так и на количественные характеристики этого процесса. Выполнена интегральная оценка для изменения выработки гидроэлектростанций, связанного с изменениями климата.

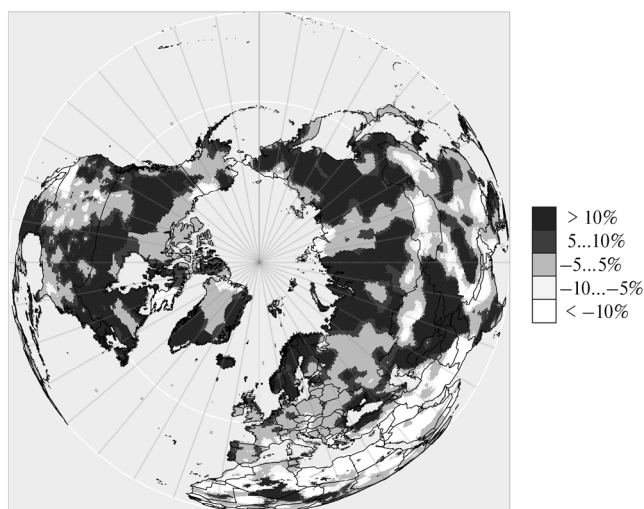
*Ключевые слова:* гидроэнергетика, изменение климата, глобальные климатические модели, климатические сценарии.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524842156-160>

Производство электроэнергии гидроэлектростанциями вносит существенный вклад в удовлетворение постоянно растущего спроса на электричество во всём мире. В России в конце 2010-х годов ГЭС производят примерно 17% общей выработки электроэнергии и располагают 21% общей установленной мощности. В последние десятилетия российская гидроэнергетика вынуждена адаптироваться к новым социально-экономическим и административно-политическим условиям. Влияние на её работу изменений климата пока не столь очевидно, но от того не менее неотвратимо. Исследования последних десятилетий позволяют предположить, что направленные гидрологические изменения в России уже начались и продолжатся, по крайней мере ещё в течение многих десятилетий.

Изменения климата происходили на протяжении всей истории Земли. Особенность современного глобального изменения климата заключается в наличии существенного антропогенного вклада в этот процесс. Именно антропогенный тренд, скорее всего, будет определять неуклонное повышение глобальной температуры на всём протяжении XXI в. [1].

В среднем повышению глобальной температуры на 1°C отвечает увеличение количества осадков на 2% или примерно на 20 мм в год в среднем по земному шару [1, 2]. Именно

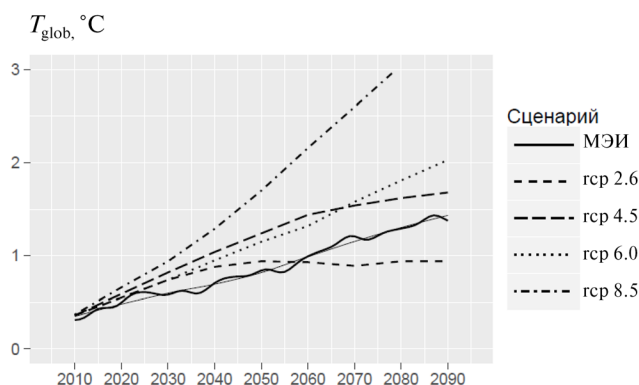


**Рис. 1.** Изменение среднегодового количества осадков при глобальном потеплении на 1°C (период 1997–2016 гг. по сравнению с периодом 1911–1930 гг.) – расчёт авторов по данным [3].

такими значениями в глобальном масштабе характеризовалось изменение климата в XX и начале XXI в. При этом изменение режима выпадающих осадков происходит чрезвычайно неравномерно (рис. 1). Результаты наблюдений [3], теоретического анализа и численного моделирования [4] свидетельствуют, что в результате современных климатических изменений области с высоким количеством осадков, как правило, начинают получать ещё больше влаги, а в засушливых регионах планеты преимущественно происходит иссушение.

Национальный исследовательский университет “МЭИ”,  
Москва

E-mail: [nilgpe@mpei.ru](mailto:nilgpe@mpei.ru); [e.v.kasilova@mpei.ru](mailto:e.v.kasilova@mpei.ru)



**Рис. 2.** Тренды среднеглобальной температуры в XXI столетии (по отношению к уровню 1986–2005 гг.) при разных сценариях антропогенного воздействия: данные [1] для сценариев rcp; результаты работы [5] для прогноза МЭИ.

На всём протяжении XXI в. глобальная температура  $T_{\text{glob}}$  продолжит расти. Результаты моделирования [1, 5] показывают (рис. 2), что при умеренных, наиболее реалистичных, климатических сценариях (rcp 4.5<sup>1</sup> и МЭИ) изменение глобальной температуры на протяжении XXI в. составит не менее 1°C, т.е. будет несколько выше  $\Delta T_{\text{glob}}$ , наблюдавшегося в течение XX столетия. Это повышение температуры неминуемо приведёт к дальнейшей трансформации гидрологических процессов по всей планете.

Оценка долгосрочных изменений речного стока осложнена его высокой природной изменчивостью [1]. Однако наличие существенных изменений в процессах формирования стока очевидно уже сегодня. На территории России наиболее заметным проявлением этих изменений стало выравнивание сезонного распределения стока. В ряде регионов эти изменения столь существенны, что заставляют говорить о формировании нового квазистационарного режима.

Для годового стока на территории России достоверно установлено наличие многолетних фаз снижения и повышения водности, связанных в первую очередь с вариациями глобальной атмосферной циркуляции [5]. Наличие этой долгопериодной компоненты в сочетании со стохастической природой формирования речного стока определяет сложность оценки связи речного стока с изменениями климата. Однако уже сегодня

<sup>1</sup>Сценарии rcp (representative concentration pathways) — набор сценариев, в настоящее время предлагаемых Межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPCC) для оценки климатических условий будущего [1]. Сценарий rcp 4.5, по нашему мнению, в наибольшей степени соответствует наблюдаемым в настоящее время тенденциям.

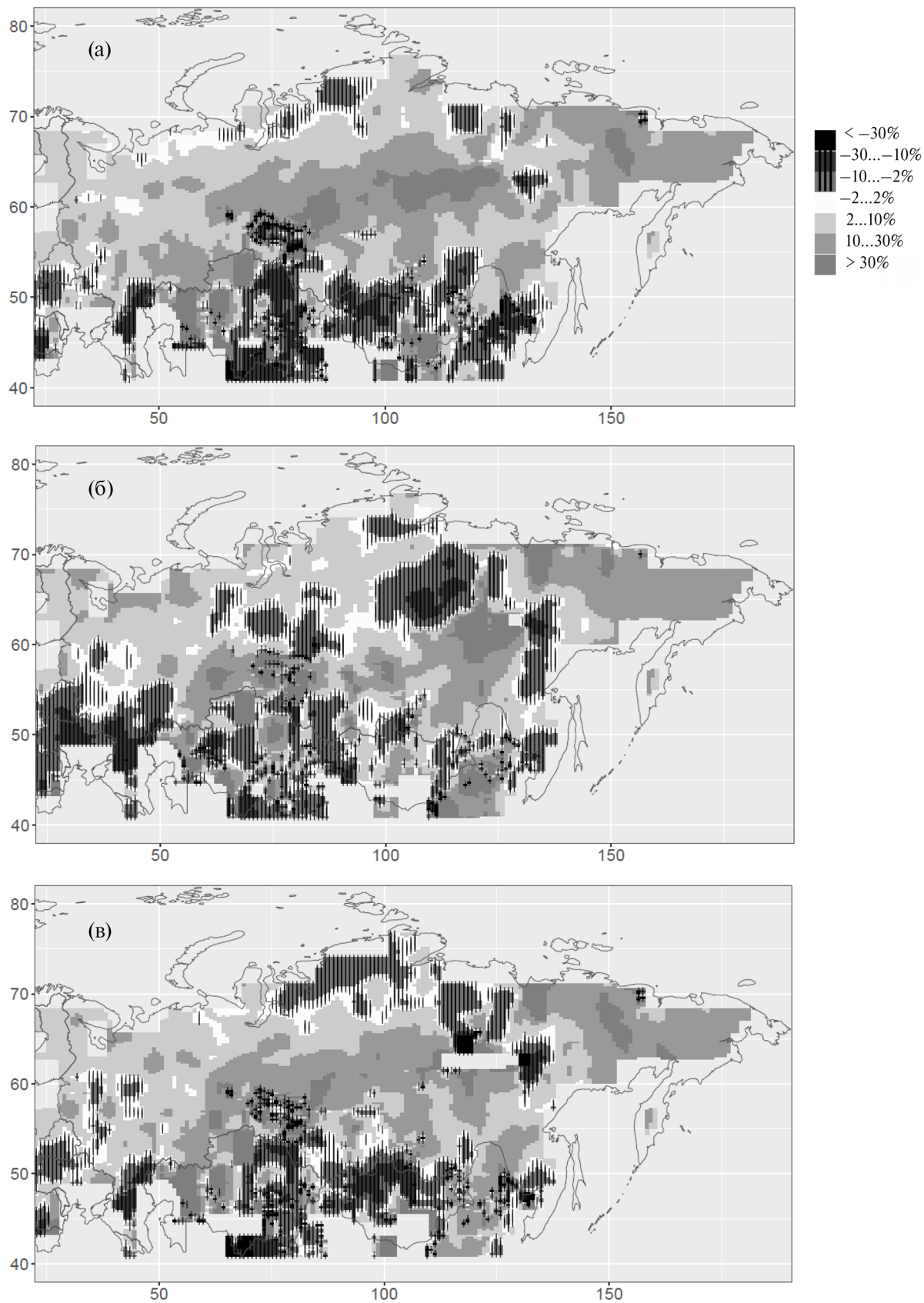
изменения глобального гидрологического цикла могут означать нарушение стационарности временных рядов речного стока, вызванных изменением климата [8]. Это обстоятельство делает крайне затруднительным использование статистических методов для долгосрочных прогнозных оценок и повышает значение гидродинамического моделирования.

Для территории России ведущими исследовательскими группами (ГГО, ГГИ, ИВП РАН) разработано несколько региональных моделей формирования речного стока, которые применялись в том числе при получении прогнозных оценок для XXI столетия [9–12]. Ограничения этого подхода связаны в первую очередь с высокими требованиями региональных моделей к исходным данным и недостатком данных гидрологических наблюдений для территории России.

Другим существенным недостатком опубликованных оценок является в известной мере произвольный выбор сценария антропогенного воздействия на климатическую систему. Все опубликованные на сегодняшний день прогнозы для долгосрочных изменений речного стока на территории России рассматривают обычно один-два из сценариев Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК): как правило, умеренный сценарий rcp 4.5 или чрезвычайно высокий rcp 8.5. Не отрицая научных достоинств такого подхода, следует заметить, что эти сценарии представляют собой некие искусственно построенные траектории для антропогенных форсингов, которые отнюдь не призваны предоставить прогноз последних.

Задача настоящей работы состоит в получении прогнозных оценок речного стока по территории России на протяжении XXI века при наиболее вероятных значениях антропогенных климатических факторов в течение следующих десятилетий. Реалистичная прогнозная оценка этих факторов была осуществлена в соответствии с выполненным нами ранее прогнозом [5]. Принципиальное отличие этого прогноза от сценариев rcp заключено в выборе из всего многообразия возможных траекторий развития в первую очередь тех, которые, по всей вероятности, действительно станут реальностью через несколько десятилетий. Эти результаты прогнозов МЭИ за последние тридцать лет прошли многократную верификацию, показав хорошее соответствие данным наблюдений [6].

Для получения прогнозных оценок речного стока в настоящей работе мы использовали ансамблевое осреднение результатов CMIP5 [13] с валидацией модельных расчётов на доступных



**Рис. 3.** Относительное изменение среднегодовой величины речного стока в Северной Евразии в 2045–2054 гг. по отношению к периоду 2007–2016 гг.: а – по сценарию rcp 2.6, б – по сценарию rcp 4.5, в – по сценарию МЭИ.

данных наблюдений [14, 15]. Для обработки данных валидационных расчётов и регионально-го моделирования был разработан собственный программный комплекс в среде R. По результатам валидационных расчётов было проведено ранжирование глобальных климатических моделей по их способности воспроизводить основные пространственные закономерности долговременных изменений речного стока на территории России. Из 21 модели, показавшей наилучшее соответствие данным наблюдений, был сформирован ансамбль для получения прогнозных оценок.

Прогнозные оценки для XXI века были получены на основе экспериментов для сценариев гср 2.6, 4.5, 8.5. Для каждой точки расчётной сетки по результатам этих трёх экспериментов была построена регрессия модельного значения речного стока на среднеглобальную температуру. Итоговое поле стока для сценария МЭИ было рассчитано по значению глобальной температуры  $T_{glob}$ , соответствующему этому сценарию. Для всех рассмотренных сценариев гср и прогноза МЭИ изменение модельного среднегодового стока в середине XXI века оказывается статистически значимым для большей части территории России. Следует заметить, что оценка антропогенного вклада в этот процесс требует более детального исследования.

В целом результаты прогнозных оценок для речного стока по территории России качественно соответствуют известной тенденции повышения увлажнённости в регионах с высоким количеством осадков и её снижения в засушливых областях (рис. 3). Однако подробности поля речного стока сильно зависят от выбранного климатического сценария. Для сценария МЭИ, который с должным основанием можно считать значительно более реалистичным по сравнению со сценариями гср, пространственное распределение стока по территории России заметно отличается от ближайших по параметрам сценариев гср 2.6 и гср 4.5.

Количественные оценки долговременных тенденций изменения стока и выработки ГЭС получены для крупнейших бассейнов России в рамках сценария МЭИ и умеренного сценария гср 4.5 (табл. 1). Величина годового речного стока тесно связана с выработкой гидроэлектростанций на европейской части России, которые работают в режиме внутригодового регулирования стока. Напротив, в Сибири, где ГЭС работают в режиме межгодового регулирования стока, связь выработки и стока выглядит слабее и становится более тесной лишь при осреднении за многолетние интервалы.

Из приведённых результатов следует, что выбор сценария весьма существенно влияет на

**Таблица 1.** Изменение речного стока и выработки электроэнергии ГЭС России в результате климатических изменений к середине XXI в., %

Бассейн	Изменение речного стока		Изменение выработки ГЭС	
	гср 4.5	МЭИ	гср 4.5	МЭИ
Волжско-Камский каскад	3	5	2	3
Бассейн Енисей–Ангара	6	11	2	4
Бассейн Амура	6	12	2	5
Реки Северо-Запада	7	6	2	3
Бассейн Лены	13	7	7	4
В среднем по России	–	–	3	4

количественную оценку тенденций речного стока даже при использованном весьма упрощенном подходе. Проведённый комплекс расчётов позволяет сделать следующие выводы:

Изменения глобального гидрологического цикла уже произошли и станут более явными в следующие несколько десятилетий. Модельные расчёты позволяют ожидать значимых изменений речного стока к середине XXI в. по сравнению с началом столетия на большей части территории России.

Выбор сценария оказывает существенное влияние как на качественную картину изменений речного стока по территории, так и на количественные характеристики этого процесса.

В результате дальнейшего изменения климата условия работы гидроэлектростанций на большей части территории России улучшатся за счёт повышения гидропотенциала и выравнивания внутригодового распределения стока. Увеличение годовой выработки мы оцениваем в 7–8 млрд кВт·ч или 3–4% от современной величины к середине текущего столетия.

В.В. Клименко благодарит Министерство образования и науки РФ за персональную поддержку (задание 13.4662.2017/ВУ).

Авторы благодарят исследовательские группы CMIP5 за предоставление результатов расчётов и Гамбургский международный центр климатических данных (World Data Center for Climate, Deutsches Klimarechenzentrum) за организацию доступа к данным.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 17–08–00134) в части моделирования климатических изменений и РНФ (грант 18–19–00662) в части исследования гидроэнергетики России.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Eds. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2013. 1552 p.
2. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории РФ / Под ред. В.М. Катцова, С.М. Семенова. М.: Росгидромет, 2014.
3. Данные NCDC: <https://www.ncdc.noaa.gov/temp-and-precip/ghcn-gridded-products/>
4. Held I.M., Soden B.J. // J. Climate. 2006. V. 19. P. 5686–5699.
5. Клименко В.В., Клименко А.В., Микушина О.В., Терешин А.Г. // Теплоэнергетика. 2016. № 9. С. 1–6.
6. Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 2. С. 158–168.
7. Попова В.А., Георгиади А.Г. // Изв. РАН. Сер. геогр. 2017. № 2. С. 47–59.
8. Milly P.C.D., Betancourt J., Falkenmark M., Hirsch R.M., Kundzewicz Z.W., Lettenmaier D.P., Stouffer R.J. // Science. 2008. V. 319. P. 573–574.
9. Катцов В.М., Говоркова В.А. // Тр. ГГО им. А.И. Воейкова. 2013. В. 569. С. 75–97.
10. Акентьева Е.М., Сидоренко Г.И., Тюсов Г.А. // Тр. ГГО им. А.И. Воейкова. 2014. В. 570. С. 95–105.
11. Калугин А.С. Модель формирования стока реки Амур и ее применение для оценки возможных изменений водного режима. Дис. канд. геогр. наук. М., 2016.
12. Георгиевский М.В., Голованов О.Ф. Экстремальные паводки в бассейне Амура: гидрологические аспекты. СПб.: ФГБУ “ГГИ”, 2015. С. 153–170.
13. Knutti R. IPCC Working Group I AR5 snapshot. World Data Center for Climate. 2014. DOI:10.1594/WDCC/ETHr4.
14. GRDC Timeseries Data. Global Runoff Data Centre. Koblenz: Federal Inst. Hydrol., 2017.
15. Gudmundsson L., Seneviratne S.I. // Earth Syst. Sci. Data. 2016. V. 8. P. 279–295.

## RUSSIAN HYDROPOWER UNDER THE GLOBAL CLIMATE CHANGE

Corresponding Member of RAS V. V. Klimenko, E. V. Fedotova

Received August 17, 2018

The influence of the climate change in Russia on the operation of hydroelectric power plants during the 21st century is considered. For obtaining quantitative assessments, the results yielded by global climatic models for river runoff were subjected to ensemble averaging. In addition to the standard RCP climatic scenarios, the MPEI scenario is considered, the fundamental distinctive feature of which is that the most likely development trajectories are selected. It is found that the choice of a scenario has an essential effect on both the qualitative pattern of river runoff changes over the territory and on the quantitative characteristics of this process. An integral assessment for the change in the hydroelectric power plant outputs due to climate change is made.

*Keywords:* hydropower, climate change, global climate models, climate scenarios.