

УДК 556.013

ВОЗДЕЙСТВИЕ БУДУЩИХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА СТОК С ВОДОСБОРА ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

С. А. Кондратьев*, **М. В. Шмакова**

*Институт озераедения РАН, Санкт-Петербургский Федеральный
исследовательский центр РАН (ул. Севастьянова, 9, Санкт-Петербург,
Россия, 196105), *kondratyev@limno.org.ru*

Выполнена прогностическая оценка возможных изменений стока с водосбора Онежского озера на примере трех крупнейших притоков – рек Шуи, Суны и Водлы в результате предполагаемых изменений климата в XXI веке в соответствии со сценариями выбросов парниковых газов RCP 2.6 и RCP 8.5 – лучшим и худшим с точки зрения воздействия на окружающую среду соответственно. Информация об изменении значений метеозаэлементов, необходимых для расчетов стока, получена на основе климатических моделей MPI-ESM-MR и IPSL-CM5A. Для оценки возможного изменения стока в результате изменений регионального климата использована модель формирования стока на водосборе IHM. При использовании материалов обеих климатических моделей существенное увеличение температуры воздуха в сценарии RCP 8.5 приводит к возрастанию расчетных значений испарения, которое в большой степени компенсирует увеличение стока реки за счет возрастания осадков. Согласно сценарию RCP 2.6 значимых изменений испарения не происходит. В случае сочетания RCP 2.6 и MPI-ESM-MR отмечается небольшое снижение стока к концу 21 века. Можно предположить, что изменение стока с водосбора Онежского озера будет находиться в промежутке между оценками, сделанными по двум экстремальным сценариям, и не стоит ожидать экстремальных изменений гидрологического режима речных водосборов в рассматриваемом регионе.

Ключевые слова: речной сток; расход воды; климатический сценарий; осадки; температура воздуха; модель

Для цитирования: Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Воздействие будущих климатических изменений на сток с водосбора Онежского озера // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 6. С. 41–49. doi: 10.17076/lim1581

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант 22-17-00193.

S. A. Kondratyev*, M. V. Shmakova. IMPACT OF FUTURE CLIMATE CHANGE ON RUNOFF IN LAKE ONEGO CATCHMENT AREA

*Institute of Limnology RAS (9 Sevastyanova, 196105 St. Petersburg, Russia),
* kondratyev@limno.org.ru*

The aim of this study is to predict the possible changes in runoff from Lake Onego catchment using the three largest tributaries Shuya, Suna and Vodla as a case study for assessing expected climate change in the 21st century in accordance with the greenhouse gas emission scenarios RCP 2.6 and RCP 8.5 – the best and the worst in terms of environmental impact, respectively. Information about the change in meteorological elements required for runoff calculations was obtained on the basis of the climate models MPI-ESM-MR and IPSL-CM5A. To assess the possible change in runoff as a result of changes in the regional climate, the runoff model ILHM was used. When both climate models are applied, a significant increase in air temperature in the RCP 8.5 scenario leads to an increase in the estimated values of evaporation, which largely compensates for the increase in river runoff due to increased precipitation. In the RCP 2.6 scenario, there are no significant changes in evaporation. A combination of RCP 2.6 and MPI-ESM-MR produces a slight decrease in runoff by the end of the 21st century. It can be assumed that the change in runoff from the catchment of Lake Onego will be in the interval between the estimates made in the two extreme scenarios and one should not expect extreme changes in the hydrological regime of rivers in this region.

Keywords: river runoff; water discharge; climate scenario; precipitation; air temperature; model

For citation: Kondratyev S. A., Shmakova M. V. Impact of future climate change on runoff in Lake Onego catchment area. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 6. P. 41–49. doi: 10.17076/lim1581

Funding. The study was funded by the Russian Science Foundation grant #22-17-00193.

Введение

Онежское озеро – второе по величине пресноводное озеро Европы. В естественном состоянии имело площадь 9720 км² и принимало сток с водосборного бассейна площадью 53 100 км². После строительства в 1953 г. на р. Свирь Верхне-Свирской ГЭС озеро стало водохранилищем с площадью зеркала 9840 км² [Ресурсы..., 1972]. Около 70 % территории бассейна относится к Республике Карелия, остальная часть расположена в Ленинградской, Вологодской и Архангельской областях. Гидрографическую сеть бассейна Онежского озера образуют 6765 рек общей длиной 22 741 км и 9516 озер общей площадью 13 441 км². Более половины бассейна занято водосборами трех главных его притоков: рек Шуи (площадь водосбора 10,1 тыс. км²), Суны (7,7) и Водлы (13,7). Максимальное количество водотоков (95 %) составляют малые, длиной менее 10 км, и лишь реки Шуя, Суна, Водла и Андома имеют протяженность более 100 км [Онежское..., 2010] (рис. 1). По характеру водного режима реки бассейна относятся к восточноевропейскому типу, с высоким весенним половодьем, низкой летней и зимней меженью и увеличением стока в осенний период. Сток из озера осуществляется по реке Свирь, несущей свои воды в Ладожское озеро [Экосистема..., 1990].

На предыдущих этапах исследований Онежского озера значительное внимание уделялось изучению воздействия климатических факторов на гидрологический режим озера и его водосбора [Назарова и др., 2001; Кондратьев и др., 2008; Лозовик и др., 2016]. В прогностических оценках возможного изменения стока с водосбора использовался климатический сценарий, разработанный сотрудниками Института физики атмосферы РАН и Института озероведения РАН в конце 90-х годов прошлого века [Голицын и др., 2002]. Однако за последние десятилетия достигнуты значительные успехи в развитии климатических исследований, построены новые сценарии выброса парниковых газов, усовершенствована теория моделирования циркуляции атмосферы и океана, созданы региональные и глобальные климатические модели высокого разрешения [Climate..., 2014]. В этой связи целью настоящей работы явилась прогностическая оценка возможных изменений стока с водосбора Онежского озера на примере водосборов трех крупнейших притоков озера – рек Шуи, Суны и Водлы в результате предполагаемых изменений климата в 21 веке в соответствии со сценариями RCP (Representative Concentration Pathways) [van Vuuren et al., 2011; Wayne..., 2013].



Рис. 1. Схема расположения водосборов изучаемых рек
 Fig. 1. Schematic map of the catchments of the rivers under study

Материалы и методы

Для оценки последствий возможных климатических изменений использованы два RCP-сценария: RCP 2.6 и RCP 8.5 – лучший и худший с точки зрения воздействия на окружающую среду соответственно [Nakicenovic, Swart, 2000; Moss, 2010; Meinshausen, 2011; Rogelj et al., 2012]. Сценарий RCP 2.6 требует, чтобы выбросы диоксида углерода (CO_2) начали неуклонно снижаться и достигли нуля к 2100 г. Выбросы метана (CH_4) должны уменьшиться наполовину, при этом уровень выбросов диоксида серы (SO_2) составит примерно 10 % от уровня 1980–1990 годов. В сценарии RCP 8.5 выбросы продолжают расти в течение всего 21 века теми же темпами, что и сейчас. Цифры в аббревиатурах сценариев (2.6 и 8.5) указывают на дополнительное количество энергии излучения ($\text{Вт}/\text{м}^2/\text{с}$), которое будет накоплено атмосферой в результате выбросов парниковых газов.

Значения метеорологических параметров (осадков и температуры воздуха), соответствующих реализации сценариев социально-экономической деятельности человека RCP в изучаемом регионе на период до 2100 года, рассчитаны с использованием климатических моделей MPI-ESM-MR (Институт Макса Планка, Германия) и IPSL-CM5A (Институт Пьера Симона Лап-

ласа, Франция), участвующих в Фазе 5 Проекта взаимного сравнения моделей Всемирной программы исследований климата (WCRP CMIP5), рекомендованных в Пятом оценочном докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) в 2014 году. Получение необходимых для расчетов данных осуществлялось путем подачи соответствующего запроса, включающего координаты места (в нашем случае – метеостанции Петрозаводск), название климатических моделей (MPI-ESM-MR и IPSL-CM5A), тип RCP-сценария (RCP 2.6 и RCP 8.5), названия метеорологических переменных и временное разрешение данных на сайте Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды [CORDEX..., 2021].

Средние значения метеорологических элементов (среднегодовых значений температуры воздуха и годовых слоев осадков) за периоды 2006–2020 и 2086–2100 гг., полученные для разных сценариев выброса парниковых газов (RCP 2.6 и RCP 8.5) и рассчитанные по разным климатическим моделям (MPI-ESM-MR и IPSL-CM5A), содержатся в табл. 1.

Представленные данные иллюстрируют возможное возрастание значений метеорологических параметров к концу 21 века во всех случаях за исключением реализации сценария RCP 2.6 по немецкой модели MPI-ESM-MR,

Таблица 1. Средние значения среднегодовой температуры воздуха (°C) и осадков (мм/год) за периоды 2006–2020 и 2086–2100 гг. при реализации различных сценариев выброса парниковых газов и рассчитанные по разным климатическим моделям

Table 1. Mean values of mean annual air temperature (°C) and precipitation (mm/year) for the periods 2006–2020 and 2086–2100 under different scenarios of greenhouse gas emissions and calculated by different climate models

Модель Model	RCP 2.6		RCP 8.5	
	2006–2020	2086–2100	2006–2020	2086–2100
Годовой слой осадков, мм/год Annual precipitation, mm/year				
MPI-ESM-MR	770	755	755	956
IPSL-CM5A	863	998	925	1010
Среднегодовая температура воздуха, °C Average annual temperature, °C				
MPI-ESM-MR	3,0	3,9	3,3	8,2
IPSL-CM5A	3,0	3,2	2,9	6,7

т. е. для случая максимально возможного сокращения выбросов парниковых газов. Максимальное увеличение как осадков, так и температуры воздуха дает реализация сценария RCP 8.5, согласно которому выбросы продолжают расти в течение всего 21 века теми же темпами, что и сейчас. Максимальное возрастание осадков может составить 27 %, температуры воздуха – 148 % по отношению к уровню 2006–2020 гг. (RCP 8.5, MPI-ESM-MR).

Источником метеорологической информации, необходимой для расчетов стока, послужили материалы наблюдений МС Петрозаводск, имеющиеся в открытом доступе. По данным мониторинга СЗУГМС, среднегодовая температура воздуха и годовой слой осадков (мм/год) по МС Петрозаводск за 2006–2020 гг. составили соответственно 4,0 °C и 610 мм/год. Средние значения слоя годового стока оцениваются в 380 мм/год для р. Водлы, 363 мм/год для р. Суны и 318 мм/год для р. Шуи.

Для решения задачи оценки возможного изменения стока притоков Онежского озера в результате изменений регионального климата использована модель формирования стока на водосборе ILHM [Кондратьев, Шмакова, 2019], предназначенная для расчетов гидрографов талого и дождевого стока с водосбора. Модель имеет концептуальную основу и описывает процессы снегонакопления и снеготаяния, испарения и увлажнения почв зоны аэрации, формирования стока, а также регулирование стока водоемами в пределах однородного водосбора, характеристики которого принимаются постоянными для всей его площади. Модель может работать как с месячным шагом по времени, так и с годовым. В процессе моделирования водосбор представляется в виде

однородной имитирующей емкости, накапливающей поступающую воду и затем постепенно ее отдающей. Значения основных параметров гидрологической модели, определяющих форму гидрографа стока, могут задаваться в зависимости от озерности, т. е. доли площади водоемов в общей площади водосбора.

Калибровка и верификация модели проводилась по данным измерений расходов воды на рассматриваемых реках (рис. 1) в створах Северо-Западного УГМС. Для калибровки модели использовались большая часть имеющихся измеренных значений расходов воды (2008–2015 гг.) в створах изучаемых рек. Верификация проводилась по результатам сравнения измеренных и рассчитанных значений расходов воды за последние годы (2016–2019 гг.). Результаты калибровки и верификации модели формирования стока ILHM представлены на рис. 2. Полученное значение критерия Нэша – Сатклифа NS (83 % для Шуи, 65 % для Суны и 83 % для Водлы) является подтверждением адекватности модели изучаемым процессам формирования стока на водосборе.

Результаты и обсуждение

На рис. 3 представлен годовой ход прогнозных значений среднегодовой температуры воздуха и годовых слоев осадков для текущего столетия по сценариям RCP 2.6 и RCP 8.5, оцененным по модели MPI-ESM-MR для условий водосбора Онежского озера. Кроме того, на этом рисунке приведены результаты расчета испарения с водосбора р. Водлы и ее годового стока по модели формирования стока ILHM. Аналогичная информация, полученная на основе климатической модели IPSL-CM5A, представлена на рис. 4.

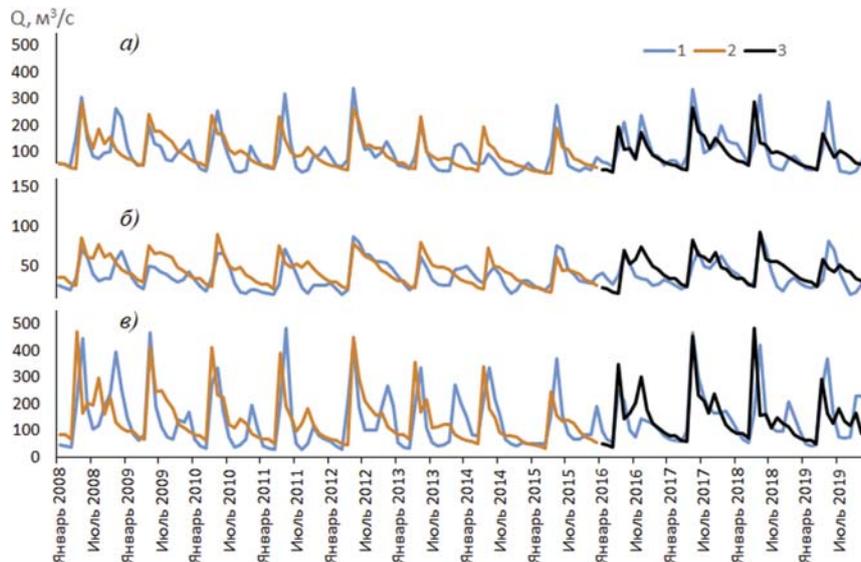


Рис. 2. Сравнение измеренных и рассчитанных гидрографов стока (мм/мес.) с водосборов рек Шуи, створ – д. Бесовец, 95 060 км² (а), Суны, створ – пгт. Поросозеро, 3370 км² (б) и Водлы, створ – г. Пудож, 12 000 км² (в): 1 – измерения СЗУГМС, 2 – результаты калибровки модели стока ILHM, 3 – результаты ее верификации

Fig. 2. Comparison of the measured and calculated runoff hydrographs (mm/month) from the catchments of the Shuya River, Besovets village, 95 060 km² (a), the Suna River, Porosozero settlement, 3370 km² (б) and the Vodla River, Pudozh city, 12 000 km² (в):

1 – measurements by Roshydromet, 2 – results of ILHM runoff model calibration, 3 – results of its verification

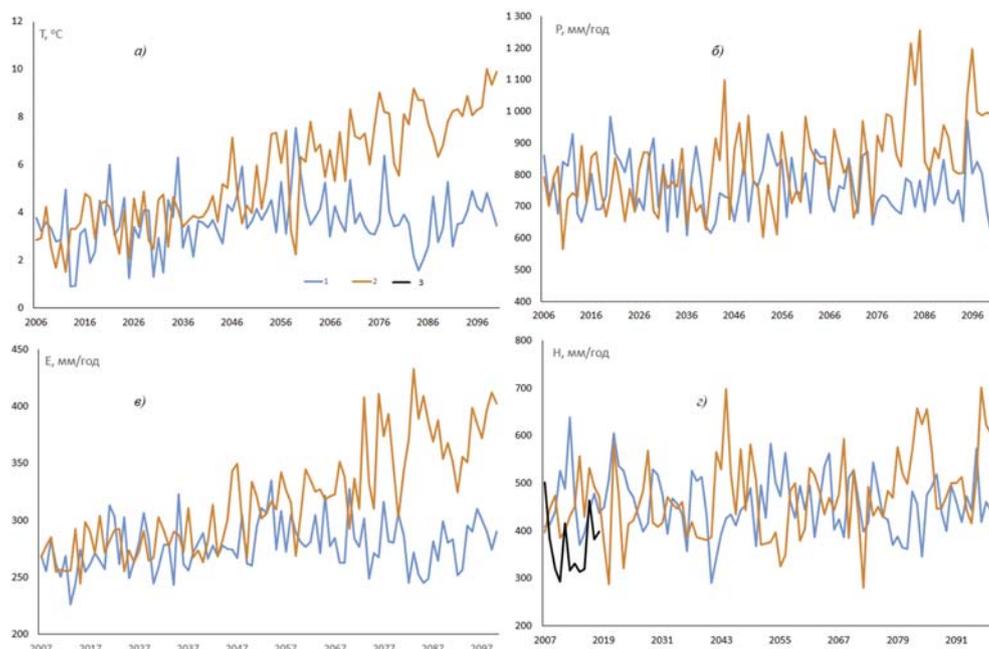


Рис. 3. Возможные изменения среднегодовых осадков (а) и температуры воздуха (б) в соответствии с моделью MPI-ESM-MR, а также рассчитанные значения испарения с водосбора (в) и стока р. Водлы (г) на перспективу до 2100 г. Здесь и на рис. 4: 1 – RCP 2.6, 2 – RCP 8.5, 3 – измерения СЗУГМС

Fig. 3. Possible changes in mean annual precipitation (а) and air temperature (б) in accordance with the MPI-ESM-MR model, as well as calculated values of evaporation from the catchment (в) and Vodla River runoff (г) for the future until 2100.

Here and in Fig. 4: 1 – rcp 2.6, 2 – rcp 8.5, 3 – measurements by Roshydromet

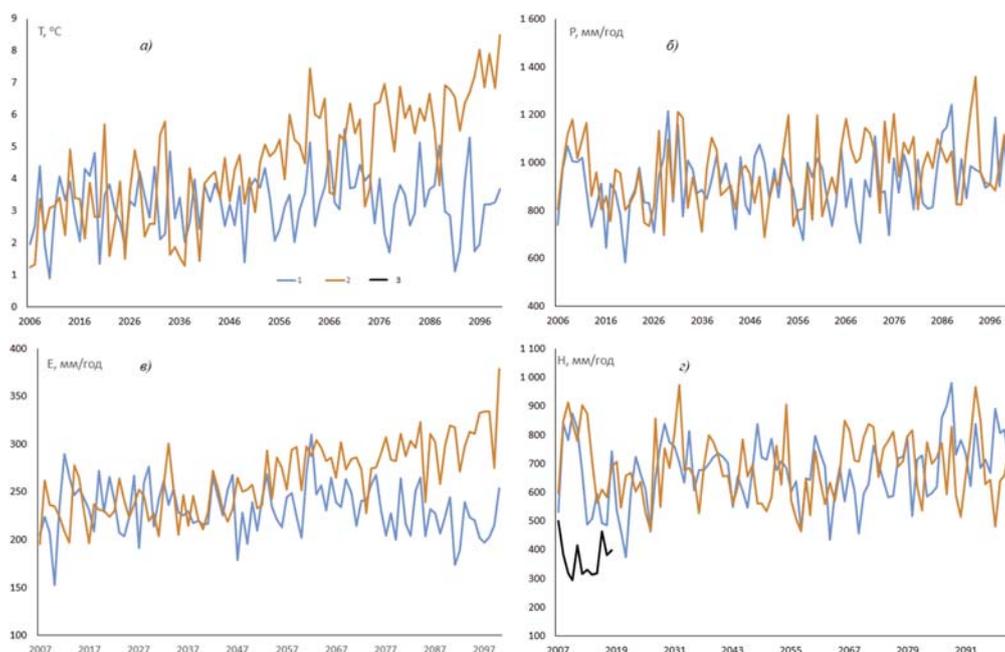


Рис. 4. Возможные изменения среднегодовых осадков (а) и температуры воздуха (б) в соответствии с моделью IPSL-CM5A, а также рассчитанные значения испарения с водосбора (в) и стока р. Водлы (г) на перспективу до 2100 г.

Fig. 4. Possible changes in mean annual precipitation (a) and air temperature (б) according to IPSL-CM5A model and calculated values of evaporation from the catchment (в) and Vodla river runoff (г) for the perspective until 2100

Нетрудно видеть, что при использовании материалов обеих климатических моделей существенное увеличение температуры воздуха в сценарии RCP 8.5 приводит к увеличению расчетных значений испарения, которое в высокой степени компенсирует увеличение стока реки за счет возрастания осадков. В сценарии RCP 2.6 значимых изменений испарения не происходит. А в случае сочетания RCP 2.6 и MPI-ESM-MR отмечается небольшое снижение стока к концу 21 века.

Сравнение полученных спрогнозированных среднегодовых расходов воды и их измеренных значений, выполненное на основании рис. 3 и 4, выявило завышение стока, смоделированного с использованием материалов модели IPSL-CM5A, по отношению к реальному в начале 21 века (рис. 4, г). Поэтому при последующем анализе рассматривались результаты, полученные по климатической модели MPI-ESM-MR. В табл. 2 представлены рассчитанные средние значения годового стока трех исследуемых рек для рассматриваемых двух сценариев выбросов парниковых газов.

В результате к концу 21 века среднегодовой сток с водосбора р. Водлы при реализации сценария RCP 8.5 увеличивается не более чем на 18 % относительно периода 2006–2015 годов. В то же время сценарий RCP 2.6 дает сни-

жение стока также на 18 % (MPI-ESM-MR), так как здесь отмечается небольшое возрастание температуры воздуха, а осадки имеют отрицательный тренд (табл. 1). Эта же тенденция, хотя и менее выраженная, характерна и для рек Шуи и Суны.

Как отмечалось выше, рассмотренные сценарии отражают лучший (RCP 2.6) и худший (RCP 8.5) варианты антропогенного воздействия на окружающую среду. Скорее всего, ситуация с изменением климата в результате деятельности человека будет протекать по некоему промежуточному сценарию, так как, с одной стороны, человечество предпринимает значительные усилия по снижению выбросов в атмосферу, с другой, едва ли удастся даже к концу 21 века достигнуть абсолютного внедрения «зеленых технологий» во все сферы хозяйственной деятельности на всей планете. А следовательно, и прогностическая оценка последствий климатических изменений будет находиться в промежутке между оценками, сделанными в настоящей работе по экстремальным сценариям. Таким образом, можно заключить, что не стоит ожидать экстремальных изменений гидрологического режима притоков Онежского озера.

Анализ различий во внутригодовой динамике метеорологических величин, рассчитанных

по модели MPI-ESM-MR для различных сценариев выброса парниковых газов, показал относительно равномерное возрастание температуры воздуха при переходе от RCP 2.6 к RCP 8.5 для всех сезонов года (рис. 5, а). Количество выпавших осадков при реализации сценария RCP 8.5 существенно увеличится в осенне-зимний период

и немного снизится в начале лета (рис. 5, б) по сравнению с экологически благоприятным сценарием. Согласно результатам моделирования, итогом указанных различий может стать смещение рассчитанного пика весеннего половодья при относительном постоянстве слоя годового стока, как это показано на рис. 5 (в).

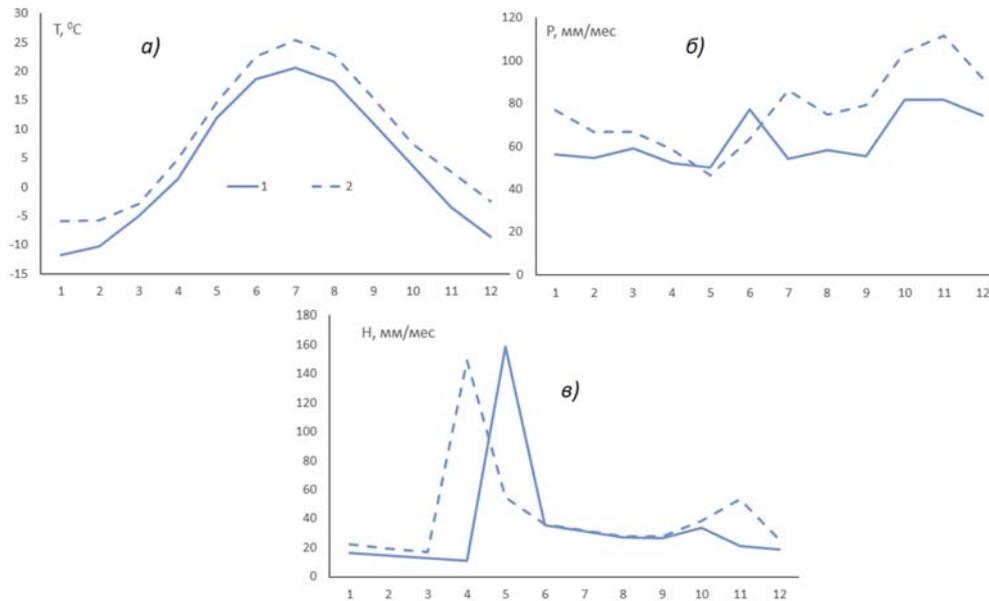


Рис. 5. Среднемесячная температура воздуха Т (а), месячные слои осадков Р (б) для условий м/ст. Петрозаводск, а также рассчитанные значения стока с водосбора р. Водлы (в) за период 2086–2100 гг.:

1 – RCP 2.6, 2 – RCP 8.5. Климатическая модель MPI-ESM-MR

Fig. 5. Mean monthly air temperature T (a), monthly precipitation P (б) for the Petrozavodsk station and calculated Vodka River runoff (в) for the period 2086–2100:

1 – RCP 2.6, 2 – RCP 8.5. MPI-ESM-MR climatic model

Заключение

Следует заметить, что составление каких-либо оценок и прогнозов развития социально-экономической деятельности населения Земли, а соответственно, и выбросов парниковых газов в атмосферу, на перспективу до 2100 г. является весьма неблагоприятным занятием, тем более в настоящее время. Именно поэтому в работе рассмотрены только экстремальные сценарии развития ситуации, отражающие лучший (RCP 2.6) и худший (RCP 8.5) варианты антропогенного воздействия на окружающую среду. Разумно предположить, что ситуация с изменением климата в результате деятельности человека будет протекать по некоему промежуточному сценарию. Сделанные оценки последствий реализации этих сценариев (табл. 2) показывают, что разброс возможных будущих изменений

стока рек Шуи, Суны и Водлы не превосходит $\pm 18\%$ от современных значений. Из сказанного следует, что едва ли в рассматриваемом регионе произойдут экстремальные изменения гидрологического режима речных водосборов. Сделанный вывод качественно сходен с результатами работы [Добровольский, 2017], из которой следует, что бассейн Онежского озера расположен на территории, где прогнозируемые значения слоя стока меньше, чем среднеквадратичная ошибка этого прогноза.

Возможно выполнить уточнение проделанных расчетов гидрографов стока изучаемых рек за счет проведения дополнительной корректировки сценариев изменения осадков и температуры воздуха посредством введения корректирующих коэффициентов, компенсирующих различия между измеренными и прогнозными значениями за 2006–2020 гг.

Таблица 2. Рассчитанные средние значения годового стока исследуемых рек (мм/год). Климатическая модель MPI-ESM-MR

Table 2. Calculated mean annual of the studied rivers runoff (mm/year). MPI-ESM-MR climatic model

RCP 2.6			RCP 8.5		
2006–2020	2086–2100	%	2006–2020	2086–2100	%
р. Водла Vodla River					
497	408	–18	429	505	18
р. Суна Suna River					
523	490	–6,3	503	525	4.3
р. Шуя Shuya River					
424	393	–7,3	415	481	16

Эта процедура выполнена на предыдущих этапах исследований [Кондратьев и др., 2008]. Однако такого рода уточнения результатов расчета не повлияют на основной вывод, касающийся отсутствия перспектив экстремальных изменений гидрологического режима водосборов притоков Онежского озера. Не стоит забывать, что в этом случае возникает вопрос о соответствии данных измерений и рассчитанных значений расхода воды для периода 2006–2020 гг., который является «разгонным» для используемых климатических моделей.

Кроме того, важно помнить, что теоретические аспекты воздействия изменений климата на окружающую среду, и водные системы в частности, находятся в стадии интенсивного развития. Весьма вероятно, что в скором времени будут разработаны новые сценарии эмиссии парниковых газов и климатические модели, имеющие гораздо более серьезное научное обоснование. Поэтому нужно быть готовым к уточнению прогностических оценок воздействия будущих изменений климата на водные системы.

Литература

Голицын Г. С., Ефимова Л. К., Мохов И. И., Семенов В. В., Хон В. Ч. Изменения температуры и осадков в бассейне Ладожского озера по расчетам климатической модели общей циркуляции в XIX–XXI // Известия РГО. 2002. Т. 134(6). С. 80–87.

Добровольский С. Г. Глобальная гидрология. М.: Геос, 2017. 525 с.

Кондратьев С. А., Назарова Л. Е., Бовыкин И. В., Шмакова М. В., Маркова Е. Г. Водный режим водосбора Онежского озера под воздействием изменений климата // Известия РГО. 2008. Т. 140(3). С. 21–26.

Кондратьев С. А., Шмакова М. В. Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор – водоток – водоем. СПб.: Нестор-История, 2019. 246 с.

Лозовик П. А., Бородулина Г. С., Карпечко Ю. В., Кондратьев С. А., Литвиненко А. В., Литвинова И. А. Биогенная нагрузка на Онежское озеро по данным натуральных наблюдений // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 5. С. 35–52. doi: 10.17076/lim303

Назарова Л. Е., Сало Ю. А., Филатов Н. Н. Изменения климата и водные ресурсы Восточной Финляндии (препринт). Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2001. 34 с.

Онежское озеро. Атлас / Отв. ред. Н. Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2010. 151 с.

Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 2. Карелия и Северо-Запад. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 700 с.

Экосистема Онежского озера и тенденции ее изменения / Ред. З. С. Кауфман. Л.: Наука, 1990. 264 с.

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 / Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.

CORDEX regional climate model data on single levels / European Centre for Medium-Range Weather Forecast. 2021. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.bc91edc3?tab=overview> (дата обращения: 11.05.2022).

Meinshausen M. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300 // Climatic Change. 2011. Vol. 109. P. 213–241. doi: 10.1007/s10584-011-0156-z

Moss R. H. The next generation of scenarios for climate change research and assessment // Nature. 2010. Vol. 463. P. 747–756. doi: 10.1038/nature08823

Nakicenovic N., Swart R. IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, 2000. 129 p.

Rogelj J., Meinshausen M., Knutti R. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates // Nature Clim. Change. 2012. No. 2. P. 248–253. doi: 10.1038/nclimate1385

van Vuuren D. P., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G. C., Kram T., Krey V., Lamarque J.-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S. J., Rose S. K. The representative concentration pathways: an overview // Climatic Change. 2011. Vol. 109. P. 5–31. doi: 10.1007/s10584-011-0148-z

Wayne G. P. The beginner's guide to representative concentration pathways. *Skeptical Science*, August 2013. 24 p.

References

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. Core Writing Team R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.). IPCC, Geneva, Switzerland; 2014. 151 p.

CORDEX regional climate model data on single levels / European Centre for Medium-Range Weather Forecast. 2021. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.bc91edc3?tab=overview> (accessed: 11.05.2022).

Dobrovolskii S. G. Global hydrology. Moscow: Geos; 2017. 525 p. (In Russ.)

Kaufman Z. S. (ed.). Ecosystem of Lake Onega and trends of its changes. Ed. Leningrad: Nauka; 1990. 264 p. (In Russ.)

Golitsyn G. S., Efimova L. K., Mokhov I. I., Semenov V. V., Khon V. Ch. Temperature and precipitation changes in the Lake Ladoga basin according to the calculations of the climate model of general circulation in XIX–XXI. *Izvestiya RGO – The RGS Herald*. 2002;134(6):80–87. (In Russ.)

Kondrat'ev S. A., Nazarova L. E., Bovykin I. V., Shmakova M. V., Markova E. G. Water regime in the catchment area of Lake Onega under the impact of climate change. *Izvestiya RGO – The RGS Herald*. 2008;140(3):21–26. (In Russ.)

Kondrat'ev S. A., Shmakova M. V. Mathematical modeling of mass transfer in the system catchment – watercourse – reservoir. St. Petersburg: Nestor-Istoriya; 2019. 246 p. (In Russ.)

Lozovik P. A., Borodulina G. S., Karpechko Yu. V., Kondrat'ev S. A., Litvinenko A. V., Litvinova I. A. Biogenic load on Lake Onega according to field observations *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN – Transactions of the Karelian Research Centre of the RAS*. 2016;5:35–52. doi: 10.17076/lim303 (In Russ.)

Meinshausen M. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*. 2011;109:213–241. doi: 10.1007/s10584-011-0156-z

Moss R. H. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*. 2010;463:747–756. doi: 10.1038/nature08823

Nazarova L. E., Salo Yu. A., Filatov N. N. Climate change and water resources in Eastern Fennoscandia (preprint). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2001. 34 p. (In Russ.)

Nakicenovic N., Swart R. IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press; 2000. 129 p.

Filatov N. N. (ed.). Lake Onego. Atlas. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2010. 151 p. (In Russ.)

Surface Water Resources of the USSR. T. 2. Karelia and Northwest. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1972. 700 p. (In Russ.)

Rogelj J., Meinshausen M., Knutti R. Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. *Nature Clim. Change*. 2012;2:248–253. doi: 10.1038/nclimate1385

van Vuuren D. P., Edmonds J., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., Hurtt G. C., Kram T., Krey V., Lamarque J.-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S. J., Rose S. K. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*. 2011;109:5–31. doi: 10.1007/s10584-011-0148-z

Wayne G. P. The beginner's guide to representative concentration pathways. *Skeptical Science*, August 2013. 24 p.

Поступила в редакцию / received: 13.05.2022; принята к публикации / accepted: 18.07.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Кондратьев Сергей Алексеевич

д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник

e-mail: kondratyev@limno.org.ru; 3718470@gmail.com

Шмакова Марина Валентиновна

д-р геогр. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: m-shmakova@yandex.ru

CONTRIBUTORS:

Kondratyev, Sergey

Dr. Sci. (Phys.-Math.), Chief Researcher

Shmakova, Marina

Dr. Sci. (Geog.), Leading Researcher