

Прогнозные оценки изменений водных ресурсов крупнейших рек Российской Федерации на основе данных по речному стоку проекта CMIP5

М. В. Георгиевский¹, О. Ф. Голованов²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9,

² Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Российская Федерация, 199397, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38

Для цитирования: Георгиевский, М. В., Голованов, О. Ф. (2019). Прогнозные оценки изменений водных ресурсов крупнейших рек Российской Федерации на основе данных по речному стоку проекта CMIP5. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 64(2), 206–218. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.203>

В статье приведен анализ данных речного стока, предоставляемых последним поколением моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) в рамках проекта CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5). Цель исследований — прогноз вероятных изменений годового стока основных рек Российской Федерации. На первом этапе исследований был сделан комплексный анализ расчетных схем стока и качества исходной информации. Анализ качества осуществлялся в несколько шагов. Сначала средний многолетний модельный речной сток за базовый период (1981–2000 гг.) сравнивался со средним многолетним фактическим стоком семи крупнейших рек России (Волги, Печоры, Северной Двины, Оби, Лены, Енисея и Амура). Дополнительно анализировалось пространственное распределение рассчитанного с помощью МОЦАО речного стока по территории нашей страны. Затем проверялась адекватность (наличие отрицательных либо нереалистичных значений стока) смоделированных будущих изменений стока для каждого из прогнозных сценариев. Если по любому из проверочных тестов выявлялась некорректность расчетных данных, то модель исключалась из дальнейших исследований. В результате выполненного анализа были отобраны 24 МОЦАО. На их основе на втором этапе исследований был сформирован модельный ансамбль для прогноза стока на 2021–2040 и 2041–2060 гг. по отношению к периоду 1981–2000 гг. Вычисления производились для умеренно агрессивного (RCP4.5) и для «жесткого» (RCP8.5) прогнозных сценариев. В результате был получен прогноз изменений водных ресурсов 34 крупнейших рек России, а также были построены карты возможных изменений годовых значений слоя стока на территории страны.

Ключевые слова: прогнозные оценки, речной сток, изменения водных ресурсов, основные реки Российской Федерации, МОЦАО, CMIP5.

Посвящается памяти соавтора Олега Голованова — близкого друга и однокашника, трагически погибшего во время научной экспедиции на о. Шпицберген осенью 2017 г.

1. Современные изменения речных водных ресурсов

Для обоснования мероприятий по гарантированному водообеспечению населения страны и отраслей экономики необходимы прежде всего прогнозные оценки

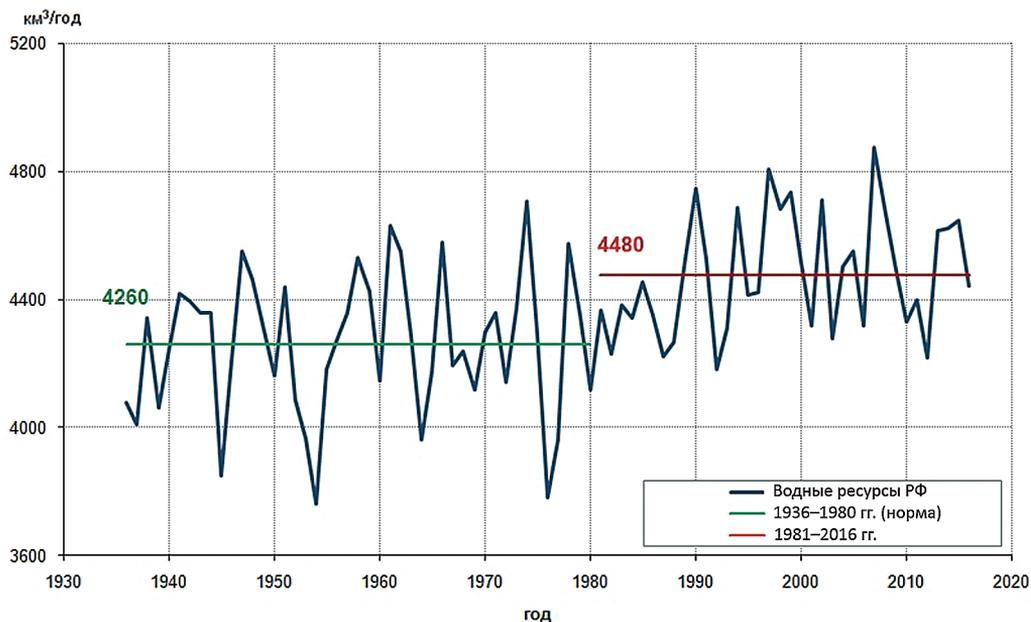


Рис. 1. Многолетняя изменчивость водных ресурсов в целом по территории Российской Федерации (по данным ФГБУ «ГГИ»)

водных ресурсов на перспективу нескольких десятилетий. До настоящего времени методы таких оценок основывались на результатах статистического анализа данных многолетних наблюдений за характеристиками стока рек в предположении стационарности их многолетних изменений. В связи с происходящими и ожидаемыми климатическими изменениями требуется разработка новых подходов к оценке водных ресурсов в будущем.

Повышение приземной температуры и изменение режима увлажненности приводит к изменениям стока на территории Российской Федерации. На рис. 1 показаны графики изменения водных ресурсов в целом по России с 1936 по 2016 г., построенные по данным Государственного гидрологического института (ежегодные справочные издания «Ресурсы поверхностных и подземных вод, их использование и качество»; последние выпуски изданий доступны на сайте ФГБУ «ГГИ»¹).

Начиная с 1981 г. отмечается устойчивое увеличение водных ресурсов в целом по Российской Федерации. На общем фоне фазы повышенной водности рек страны, начавшейся с конца 1970-х — начала 1980-х годов, только четыре года (1982, 1987, 1992 и 2012 гг.) характеризовались водными ресурсами несколько ниже нормы, зато в пяти годах (1990, 1997, 1999, 2002 и 2007 гг.) было превышено максимальное значение, наблюдавшееся ранее (в 1974 г.). В 2007 г. отмечен максимум водных ресурсов страны за весь период наблюдений.

Наиболее значительно годовой сток возрос на крупнейших реках бассейна Северного Ледовитого океана. Водные ресурсы Печоры, Енисея, Лены в 2001–2016 гг. превысили норму на 11–14%.

¹ См.: http://www.hydrology.ru/ru/izdaniya_ggi_New (дата обращения: 03.05.2019).

Общее увеличение водных ресурсов России за 1981–2016 годы составило в среднем 220 км³/год, или на более чем 5,0 % выше, чем в 1930–1980 гг. При этом оно было характерно для всех федеральных округов России. Наибольшее абсолютное увеличение речного стока произошло в Сибирском, Дальневосточном и Северо-Западном федеральных округах, наименьшее — в Центральном и Уральском. Наибольшее относительное увеличение речного стока имело место в Приволжском, Южном (включая Северо-Кавказский), Центральном и Северо-Западном федеральных округах, наименьшее — в Уральском и Дальневосточном.

Столь значительное повышение стока, наблюдающееся в течение нескольких десятилетий, свидетельствует о том, что условия его формирования существенно изменились в результате происходящего потепления климата.

На протяжении последних 15–20 лет были разработаны методы оценок возможных изменений водных ресурсов, основанные на использовании данных, предоставляемых моделями общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО). Полученные с их применением результаты, несмотря на очень большой разброс количественных оценок, показывают, что в перспективе до середины настоящего столетия на преобладающей части Российской Федерации следует ожидать увеличения годового стока рек (Катцов и Говоркова, 2013).

Основной целью настоящей работы была прогнозная оценка наиболее вероятных изменений годового стока основных рек страны на основе использования данных по речному стоку, получаемых непосредственно по МОЦАО.

2. Речной сток в климатических моделях проекта СМIP5 и основные задачи исследования

В настоящее время существует много публикаций, посвященных оценкам вероятных изменений на перспективу различных климатических характеристик, в основном приземной температуры воздуха и атмосферных осадков, основанных на результатах моделирования МОЦАО, или, как их еще называют, климатических, гидродинамических или совмещенных моделей. Однако данный подход не получил широкого применения в прогнозах речного стока. В пленарном докладе VII Всероссийского гидрологического съезда, состоявшегося 19–21 ноября 2013 г. в Санкт-Петербурге, отмечается (Фролов, 2014), что, хотя современная гидрометеорология и достигла заметных успехов в моделировании климата и его изменений, а численные климатические модели могут воспроизводить множество физических процессов в атмосфере, океане и гидросфере суши, гидрологическая компонента в климатических моделях еще недостаточно развита. С одной стороны, скептическое отношение к использованию смоделированных данных речного стока основано на широко распространенном утверждении, что в МОЦАО заложены упрощенные схемы расчета этой характеристики, которые не позволяют адекватно воспроизводить колебания стока. С другой стороны, нельзя игнорировать тот факт, что ведущие научные центры (специалисты) мировой гидрометеорологии постоянно совершенствуют разработанные модели. Если сравнить основные характеристики МОЦАО, представленные в проекте сравнения объединенных² моделей (Coupled

² Под понятием «объединенные» подразумевается совместное использование атмосферной, океанической и других компонент (блоков) модели.

Model Intercomparison Project, CMIP) 3-го этапа (CMIP3) и следующего 5-го этапа (CMIP5)³ (Meehl and Bony, 2011), то можно увидеть существенные изменения:

- улучшилась детализация моделей, что напрямую ведет к увеличению пространственного разрешения предоставляемой смоделированной информации;
- усовершенствовались расчетные схемы основных климатических систем;
- улучшилось качество предоставляемой информации и т. п.

Не вызывает сомнения, что МОЦАО будет развиваться, поэтому комплексный анализ данных речного стока, предоставляемых последним поколением МОЦАО, является актуальной задачей. Отметим, что авторы данной статьи рассматривают представленную в ней методику прогнозирования изменений речных водных ресурсов Российской Федерации на основе ансамблевого осреднения как один из дополнительных способов прогноза, который необходимо использовать совместно с другими принятыми подходами. С учетом постоянного совершенствования климатических моделей данный подход следует рассматривать как один из наиболее перспективных.

Основными задачами исследований стал анализ следующего:

- исходных (смоделированных) данных по речному стоку, предоставляемых последним поколением МОЦАО;
- расчетных схем речного стока моделей проекта CMIP5, предоставляющих информацию по стоку в необходимом для исследований объеме.

Проект CMIP5 включает в себя более 60 МОЦАО. Основная его задача — научное обоснование подготовки 5-го оценочного доклада межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Проект подробно описан в работе (Taylor et al., 2012). Данные моделирования, предоставляемые МОЦАО, участвующими в проекте, доступны для скачивания через портал PCMDI⁴.

Каждая МОЦАО представляют собой комплекс моделей взаимодействующих климатических систем. Расчет речного стока осуществляется в климатической системе «Земная поверхность», включающей поверхность континентов с ее гидрологической системой (внутренние водоемы, болота, реки и т. п.) и почвенный слой с грунтовыми водами. В стандартизированный набор расчетных переменных климатических моделей входят два параметра, характеризующие речной сток: общий речной сток (total runoff flux, mr_{to}) и поверхностный сток (surface runoff flux, mr_{ros})⁵.

При анализе предоставляемой в рамках проекта CMIP5 информации по речному стоку было выявлено, что из более чем 60 моделей, участвующих в проекте, только 29 предоставляют данные по стоку в полном для выполнения исследований объеме. В первую очередь нас интересовали данные за базовый период 1981–2000 г., а также за два прогнозных периода (2021–2040 и 2041–2060 гг.) для двух сценариев изменения климата в будущем (RCP4.5 и RCP8.5). Для сравнения: на предыдущем этапе проекта (CMIP3) информацию по стоку предоставляло не более 10 моделей.

³ См.: <http://www.clivar.org/sites/default/files/documents/Exchanges56.pdf> (дата обращения: 05.05.2019).

⁴ См.: <http://pcmdi9.llnl.gov/> (дата обращения: 05.05.2019).

⁵ См.: http://www-pcmdi.llnl.gov/ipcc/IPCC_output_requirements.htm (дата обращения: 05.05.2019).

На первом этапе исследований авторами был выполнен комплексный анализ основных схем расчета речного стока МОЦАО проекта СМР5. Было выявлено, что схемы расчета в различных моделях существенно отличаются. Тем не менее можно отметить, что наиболее часто в анализируемых моделях используются различные упрощенные версии модели TOPMODEL, разработанной К. Бевеном (Beven and Kirkby, 1979). TOPMODEL представляет собой широко известную и повсеместно применяющуюся модель осадки — сток с распределенными параметрами, в которой исходными данными выступают характеристики топографии речных бассейнов. В схемы МОЦАО включены также блоки расчета суммарного испарения, включая транспирацию, а также промерзания почвы и процессов накопления и стаивания снежного покрова. Более подробно схемы расчета речного стока описаны авторами в работе (Георгиевский и Голованов, 2015). Анализ расчетных схем речного стока показывает, что данная компонента МОЦАО постоянно развивается. Схемы расчета МОЦАО все еще являются упрощенными по сравнению со схемами, использующимися в современных гидрологических моделях. Но в ближайшем будущем непрерывное развитие компьютерных технологий позволит включать в МОЦАО более комплексные и детализированные схемы, в связи с чем роль метода прогнозирования, описываемого авторами в данной статье, может смениться с дополнительно-вспомогательной на основную. Напомним, что в данный момент основным методом прогнозирования речных водных ресурсов является метод, основанный на использовании современными гидрологическими моделями в качестве исходной метеорологической информации данных МОЦАО, таких как температура воздуха и осадки.

После загрузки и обработки информации по речному стоку была осуществлена проверка качества этих данных. Проверка выполнялась в несколько этапов. Сначала средний многолетний модельный речной сток за базовый период (1981–2000 гг.) сравнивался со средними многолетними значениями фактического стока семи крупнейших рек Российской Федерации (Волга, Печора, Северная Двина, Обь, Лена, Енисей и Амур). Дополнительно анализировалось пространственное распределение стока МОЦАО по территории России. Затем выполнялась проверка адекватности (наличие отрицательных либо нереалистичных значений стока и т. п.) смоделированных будущих изменений стока для каждого из прогнозных сценариев, т. е. выявлялись нереалистичные значения. Если по любому из проверочных тестов выявлялась некорректность предоставления данных по речному стоку конкретной МОЦАО, модель исключалась из дальнейших исследований. В результате выполненной проверки было отсеяно пять моделей, а дальнейший анализ осуществлялся на основе данных 24 оставшихся МОЦАО. Также в ходе проверки было выявлено, что значения поверхностного стока m_{rto} существенно занижены по сравнению значениями общего стока m_{rto} , интегрирующего как поверхностную, так и подземную составляющую речного стока. Кроме того, значения m_{rto} были более близки к значениям фактического стока, поэтому именно данный параметр МОЦАО использовался для дальнейшего анализа. Дополнительно при анализе внутригодовых изменений стока было выявлено, что имеет место значительный разброс рассчитанных по МОЦАО значений, поэтому для дальнейших исследований было принято решение использовать только годовые значения речного стока, а анализу сезонных изменений посвятить отдельное исследование.

3. Методика оценки вероятных изменений водных ресурсов на перспективу

В настоящее время наиболее широкое распространение при оценке будущих изменений на основе данных МОЦАО получил подход, основанный на ансамблевом осреднении. Данный подход был выбран авторами для анализа возможных изменений водных ресурсов основных рек Российской Федерации на перспективу до 2050 г. В качестве модельного ансамбля использовались данные по 24 моделям, отобраным на предварительном этапе.

Ввиду того что климатические модели имеют различное пространственное разрешение (от $0.95 \times 1.25^\circ$ для модели CESM1-BGC до $2.8 \times 2.8^\circ$ у моделей BCC-csm1.1, CanESM2, MIROC-ESM и др.), данные по стоку каждой МОЦАО интерполировались с помощью специально разработанного программного обеспечения в единую сетку с разрешением $0.5 \times 0.5^\circ$. Таким образом, была создана база данных исходной информации, включающая в себя сеточные данные по каждой модели за исторический и прогнозные периоды для каждого из прогнозных сценариев. Пространственное покрытие единой сетки данных — $14-82^\circ$ с. ш. и $0-192^\circ$ в. д. Интерполяция осуществлялась простым способом: каждому конкретному узлу сетки присваивалось ближайшее модельное значение. На основе полученных матриц регулярной сетки рассчитывались месячные значения слоя стока для 34 водосборов основных рек России путем осреднения по территории их бассейнов. Из полученных таким образом месячных значений рассчитывались значения годового слоя стока по всем моделям, которые затем использовались для оценки ансамблевых (осредненных для 24 МОЦАО) значений годовых слоев стока.

Расчеты осуществлялись для 2021–2040 и 2041–2060 гг. по отношению к периоду 1981–2000 гг., который был выбран в качестве базового. Вычисления производились как для умеренно агрессивного сценария RCP4.5, так и для жесткого сценария RCP8.5. Полученные результаты осреднялись за 20-летние периоды и сравнивались с соответствующими значениями за период 1981–2000 гг.

RCP4.5 и RCP8.5 — сценарии изменения климата в будущем, зависящие от вариантов радиационного воздействия на атмосферу в перспективе:

- RCP4.5 — умеренно агрессивный сценарий, разработанный группой MiniCAM (Global Change Assessment Model) в Тихоокеанской северо-западной национальной лаборатории Объединенного института исследований глобальных изменений (Pacific Northwest National Laboratory's Joint Global Change Research Institute);
- RCP8.5 — агрессивный сценарий антропогенного воздействия на климат планеты, созданный группами MESSAGE (Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact) и IIASA Integrated Assessment Framework в Международном институте прикладного системного анализа (International Institute for Applied Systems Analysis), Австрия.

Их подробное описание можно найти в работах (Riahi et al., 2007; Wayne, 2013).

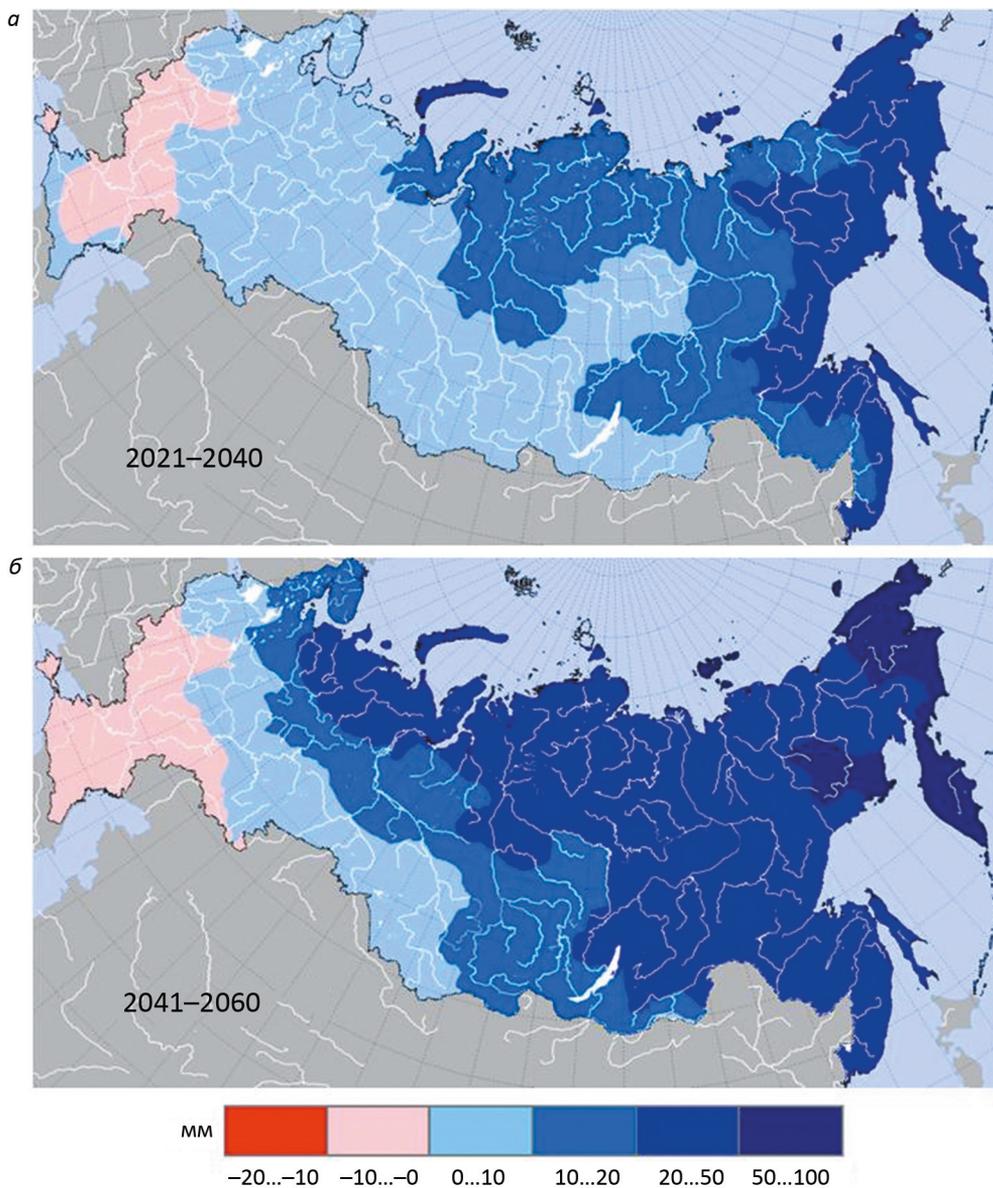
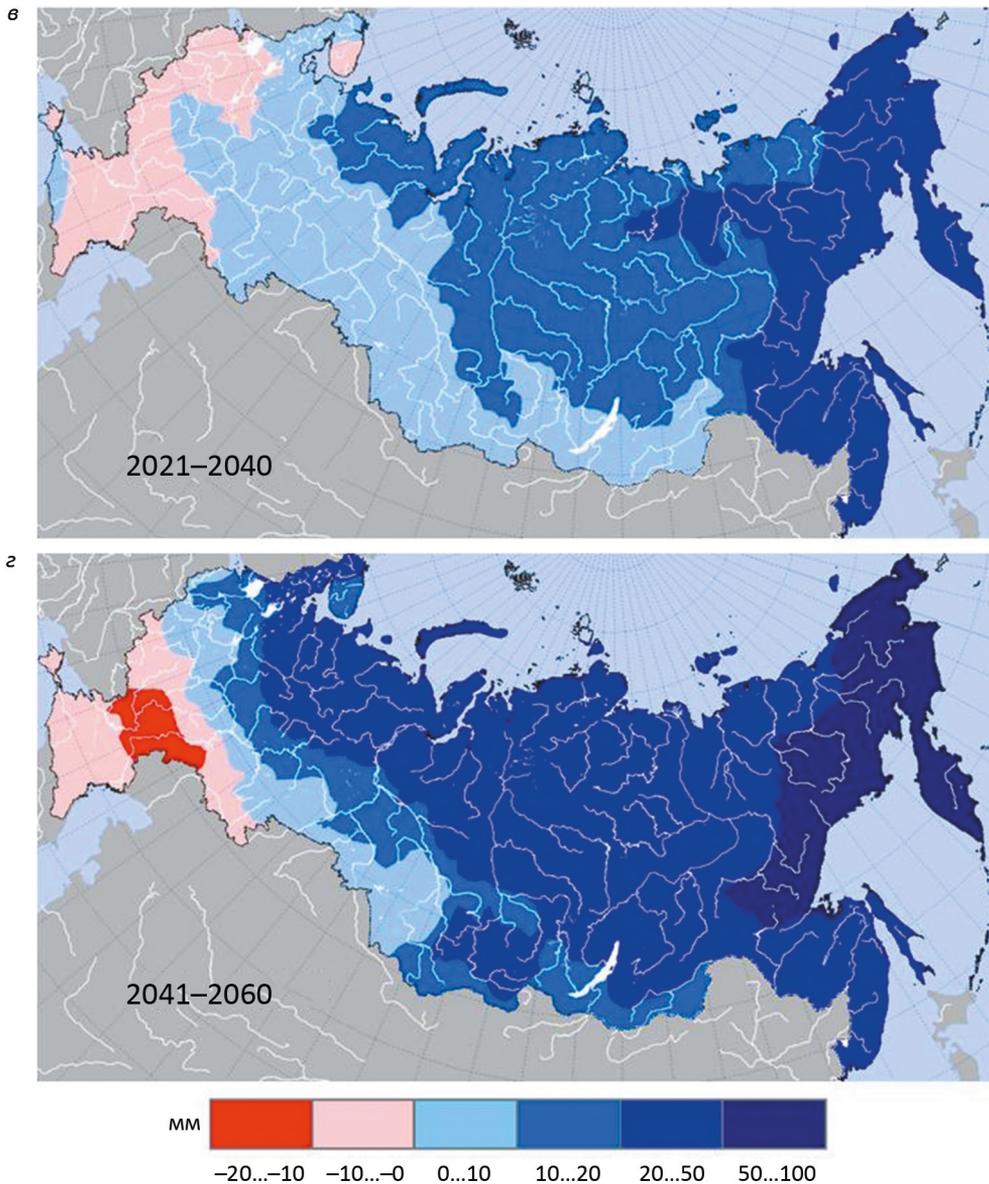


Рис. 2. Возможные изменения годовых слоев стока на территории РФ

4. Анализ возможных изменений водных ресурсов России в будущем, рассчитанных на основе данных по стоку проекта СМIP5

В таблице приведены изменения средних многолетних значений годовых слоев стока на перспективу 2030 и 2050 гг. (т. е. на середину прогнозных периодов 2021–2040 и 2041–2060 гг.) по сравнению с базовым периодом 1981–2000 гг., рас-



по сценариям RCP4.5 (а, б) и RCP8.5 (в, г)

считанные по вышеописанной методике для 34 водосборов крупнейших рек страны на основе двух проекций возможного изменения климата RCP4.5 и RCP8.5. Для более репрезентативной демонстрации вероятных изменений речного стока на рис. 2 приведены схемы пространственных аномалий годовых слоев стока для территории России, осредненные за 2021–2040 гг. и 2041–2060 гг. по отношению к периоду 1981–2000 гг. для прогнозных сценариев RCP4.5 и RCP8.5.

Таблица. Изменения годовых слоев стока (в мм. и %) в первой трети (2021–2040 гг.) и середине (2041–2060 гг.) XXI в. по отношению к базовому периоду (1981–2000 гг.), полученные по ансамблю из 24 МОЦАО проекта СМIP5 для рассматриваемых водосборов РФ по двум сценариям изменения климата (RCP4.5 и RCP8.5)

№	Река — пост	RCP4.5				RCP8.5			
		2011–2030		2041–2060		2011–2030		2041–2060	
		мм	%	мм	%	мм	%	мм	%
1	р. Нева — устье	7±21*	2	10±25	3	1±19	0	19±22	6
2	р. Дон — ст. Раздорская	-4±19**	-3	-8±25	-6	-5±18	-4	-10±27	-8
3	р. Кубань — устье	3±16	2	2±22	2	4±19	2	-7±21	-5
4	р. Терек — ст. Котляревская	3±21	2	-1±22	-1	1±27	1	-5±35	-3
5	р. Сулак — с. Миатлы	5±18	5	-1±11	-1	3±15	2	-1±23	-1
6	р. Волга — Чебоксарский гидроузел	1±24	1	3±24	1	1±20	0	7±30	3
7	р. Волга — с. Верхнее Лебяжье	4±19	2	3±21	1	1±16	1	8±28	3
8	р. Ока — г. Горбатов	2±27	1	4±27	2	4±23	2	10±35	4
9	р. Кама — Камская ГЭС	8±22	3	10±25	3	2±24	1	20±35	6
10	р. Вятка — г. Вятские Поляны	7±24	2	7±26	3	1±21	0	18±35	6
11	р. Белая — г. Бирск	5±26	2	4±28	2	3±23	2	2±32	1
12	р. Урал — с. Кушум	2±15	1	-2±23	-1	1±15	1	-5±23	-4
13	р. Печора — устье	4±19	2	4±20	2	2±16	1	8±28	3
14	р. Мезень — устье	11±26	3	26±38	7	10±28	3	36±41	10
15	р. Онега — с. Порог	5±26	2	16±31	5	3±23	1	26±35	8
16	р. Северная Двина — устье	7±24	2	18±31	5	6±24	2	30±35	9
17	р. Обь — Новосибирская ГЭС	1±22	1	8±24	3	3±18	1	11±25	5
18	р. Обь — г. Колпашево	4±17	2	8±18	4	6±15	3	13±20	6
19	р. Обь — г. Салехард	5±11	3	9±12	5	6±11	4	12±14	7
20	р. Томь — г. Томск	5±23	3	10±24	5	4±17	2	18±26	8
21	р. Иртыш — г. Омск	4±19	2	4±20	2	2±16	1	8±28	3
22	р. Иртыш — устье	4±10	3	5±13	4	4±10	3	5±14	4
23	р. Енисей — Красноярская ГЭС	8±23	3	17±24	6	7±16	2	27±27	9
24	р. Енисей — г. Игарка	10±9	5	18±9	8	12±10	5	28±12	11
25	р. Ангара — с. Богучаны	7±14	4	14±14	8	7±12	4	20±19	11
26	р. Лена — с. Табага	12±16	5	25±14	10	14±10	6	37±19	14

№	Река — пост	RCP4.5				RCP8.5			
		2011–2030		2041–2060		2011–2030		2041–2060	
		мм	%	мм	%	мм	%	мм	%
29	р. Яна — п. Юбилейная	4 ± 19	2	4 ± 20	2	2 ± 16	1	8 ± 28	3
30	р. Индигирка — ст. Воронцово	24 ± 17	8	43 ± 23	14	25 ± 19	9	56 ± 30	17
31	р. Колыма — п. Колымское	24 ± 17	8	46 ± 22	14	25 ± 19	8	61 ± 29	17
32	р. Амур — г. Хабаровск (г/ст)	8 ± 15	4	22 ± 18	11	11 ± 18	6	17 ± 15	9
33	р. Амур — г. Комсомольск-на-Амуре	9 ± 15	4	23 ± 18	11	12 ± 19	6	19 ± 15	9
34	р. Камчатка — с. Долиновка	16 ± 30	2	47 ± 49	7	23 ± 38	4	60 ± 50	9

* Межмодельное среднеквадратическое отклонение.

** Жирным шрифтом выделены отрицательные значения.

Анализируя полученные результаты, можно выделить следующие основные черты в распределении прогнозных изменений стока по территории РФ: на большей части страны следует ожидать увеличения годового стока, наиболее значимые — на востоке и северо-востоке. Исключение составят лишь водосборы рек Северного Кавказа, а также южной части европейской территории страны, включая полностью бассейн реки Дон. Максимальное увеличение ожидается на реках Дальнего Востока и в бассейнах Яны, Индигирки, Колымы и Камчатки. Повышение годового стока на севере азиатской части РФ будет происходить более интенсивно, чем в ее южных частях. К середине столетия изменения годового стока по обоим сценариям лишь усилятся. Но их основные пространственные особенности сохранятся: ожидается дальнейшее снижение годового стока реки Дон, в низовьях рек Волги и Урал, и более ярко выраженным станет его увеличение на северо-востоке и востоке России.

При этом смоделированные изменения до 2030 г., полученные по двум рассмотренным сценариям (RCP4.5 и RCP8.5), почти не различаются ни по значению, ни по знаку. Необходимо отметить, что расчетные изменения годового стока для бассейнов рек на перспективу (см. табл.) в большинстве случаев не превышают межмодельную изменчивость, рассчитанную для моделей, сформировавших ансамбль. Этот факт говорит о том, что ожидаемые изменения годового стока, полученные путем расчетов, в большинстве случаев незначительны и не превышают ошибок их определения. Исключение составляют лишь реки на северо-востоке нашей страны, такие как Индигирка, Колыма и Камчатка, для водосборов которых было получено наиболее значительное увеличение годовых значений речного стока, а также реки Енисей и Лена, для которых ожидается достаточно значительное увеличение речного стока по всей огромной территории их водосборов.

Полученные в ходе исследований результаты показывают, что и в первой трети XXI века, и к его середине следует ожидать незначительного, в пределах статистической погрешности, увеличения значений годового стока почти для всех рассмо-

тренных бассейнов рек по сравнению с его значениями в последние десятилетия XX века. Исключение составят лишь река Дон и некоторые реки Северного Кавказа. Также, несмотря на то что в южных частях бассейнов рек Волга и Урал будет наблюдаться незначительное уменьшение стока, в целом для водосборов этих рек значения годового стока несущественно (в пределах статистической погрешности этих характеристик) повысятся. Наибольших значений вероятное повышение годового стока ожидается в северной-восточной и восточных частях России.

В заключение отметим, что приведенные в настоящей статье оценки возможных в перспективе до середины XXI в. изменений годового стока рек на территории страны в целом совпадают с результатами, полученными в Главной геофизической обсерватории (ГГО) им. А. И. Воейкова с использованием несколько иного подхода (Школьник и др., 2014). В исследованиях ГГО в качестве прогнозных характеристик годового стока принималась разница осадков и испарения, рассчитанная по ансамблю из 26 моделей CMIP5.

5. Заключение

Согласно полученным нами результатам, нет оснований ожидать в ближайшие десятилетия какого-либо значительного изменения годового стока основных рек России, связанного с изменением климата. Для большей части территории страны наиболее вероятно незначительное увеличение годового стока рек, что находится в пределах его естественной изменчивости. Единственное исключение — это водосборы рек Лена, Енисей, Яна, Индигирка, Колыма и Камчатка, где ожидается значимое увеличение стока.

Как показывают модельные расчеты, проведенные в рамках современных представлений об изменении климата в XXI в., водный режим рек России в ближайшие 20 лет по своим основным параметрам будет близким к наблюдавшемуся в последние 30–35 лет. Ожидающееся повышение температуры воздуха зимой позволяет полагать, что имеющая место тенденция увеличения зимнего стока рек нашей страны сохранится в ближайшие десятилетия. При этом относительная доля весеннего стока в годовом стоке будет уменьшаться.

Представленную в статье методику можно использовать как один из подходов к оценке вероятных изменений водных ресурсов наряду с другими принятыми методами. С учетом бурного текущего развития МОЦАО эта методика имеет хорошие перспективы для широкого применения в ближайшем будущем.

Литература

- Георгиевский, М. В., Голованов, О. Ф., 2015. Оценка вероятных изменений стока в бассейне реки Амур на перспективу до 2020 и 2050 годов на основе данных моделей общей циркуляции атмосферы и океана, в: Экстремальные паводки в бассейне Амура: гидрологические аспекты / Георгиевский, В. Ю. (под ред.). Сб. работ по гидрологии. ФГБУ «ГГИ», Санкт-Петербург, 152–168.
- Катцов, В. М., Говоркова, В. А., 2013. Ожидаемые изменения приземной температуры воздуха, осадков и годового стока на территории России в XXI-м веке: результаты расчетов с помощью ансамбля глобальных климатических моделей (CMIP5). Труды ГГО 569, 75–97.
- Школьник, И. М., Мелешико, В. П., Кароль, И. Л., Киселев, А. А., Надежина, Е. Д., Говоркова В. А., Павлова, Т. В., 2014. Ожидаемые изменения климата на территории Российской Федерации в XXI веке. Труды ГГО 575, 65–118.

- Фролов, А. В., 2014. Вклад гидрометеорологической науки в развитие водохозяйственного комплекса страны. 19–21 ноября 2013 г., в: VII Всероссийский гидрологический съезд. Пленарные доклады. Санкт-Петербург, Гидрометеоиздат, 7–25.
- Beven, K. J., Kirkby, M. J., 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24, 43–69.
- Meehl, G. A., Bony, S., 2011. Introduction to CMIP5. WCRP coupled model intercomparison project-phase 5. *CLIVAR exchanges* 16(2), 4–5.
- Riahi, K., Gruebler, A., Nakicenovic, N., 2007. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change* 74(7), 887–935.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., Meehl, G. A., 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *The Bulletin of the American Meteorological Society* 93, 485–498.
- Wayne, G. P., 2013. The Beginner's Guide to Representative Concentration Pathways. URL: https://skepticalscience.com/docs/RCP_Guide.pdf (дата обращения: 05.05.2019).

Статья поступила в редакцию 13 августа 2018 г.
Статья рекомендована в печать 18 марта 2019 г.

Контактная информация:

Георгиевский Михаил Владимирович — mgeorgievsky@hotmail.com

Forecasting changes in river water resources of Russian Federation based on CMIP5 runoff data

M. V. Georgievsky¹, O. F. Golovanov^{†2}

¹ St. Petersburg State University,

7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² State Research Center “Arctic and Antarctic Research Institute”,

38, ul. Beringa, St. Petersburg, 199397, Russian federation

For citation: Georgievsky, M. V., Golovanov, O. F. (2019). Forecasting changes in river water resources of Russian Federation based on CMIP5 runoff data. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 64 (2), 206–218. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.203> (In Russian)

The article is dedicated to the memory of the co-author Oleg Golovanov — my close friend and classmate, who died tragically during a scientific expedition on the island of Spitsbergen in the autumn of 2017.

The article is devoted to the analysis of river runoff data provided by the latest generation of the Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCMs) in the framework of the CMIP5 project. The main aim of this research is to forecast the probable changes in river water resources of the main rivers of the Russian Federation. At the first stage of investigation, a comprehensive analysis of the river runoff computational models and the quality of the initial AOGCMs information were carried out. This analysis was performed in several steps. First, the average long-term model river runoff for the base period of 1981–2000 was compared with the average long-term values of the observed discharge for the seven largest rivers of the Russian Federation (Volga, Pechora, Northern Dvina, Ob, Lena, Yenisei and Amur). In addition, the spatial distribution of the river runoff throughout the territory of Russia provided by the AOGCMs was analyzed. Then, the adequacy (negative or unrealistic runoff values) of the simulated future runoff changes for each of the forecast scenarios was checked. If any of the verification tests revealed incorrect model data, the model was excluded from further

research. As a result, 24 AOGCMs were selected. At the second stage of research, a model ensemble was formed based on the 24 selected models for the implementation of forecasting estimates. The forecasting estimates were carried out for two forecast periods (2021–2040 and 2041–2060) in relation to the 1981–2000 period. Calculations were performed for two (RCP4.5 and RCP8.5) forecast scenarios. As a result, future changes in river water resources of the 34 largest rivers of the Russian Federation were obtained and analyzed; additionally, maps of future changes in annual runoff depth over the territory of Russia were constructed.

Keywords: forecasting changes, river water resources, coupled atmosphere-ocean general circulation models, CMIP5 runoff data.

References

- Beven, K. J., Kirkby, M. J., 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24, 43–69.
- Frolov, A. V., 2014. Vklad gidrometeorologicheskoi nauki v razvitie vodokhoziaistvennogo kompleksa strany. 19–21 noiabria 2013 g. VII Vserossiiskii gidrologicheskii s'ezd. Plenarnye doklady [The contribution of hydrometeorological science to the development of the country's water management complex. VII All-Russian Hydrological Congress. Theses of plenary reports. November 19–21, 2013]. St. Petersburg, 7–25. (In Russian).
- Georgievsky, M. V., Golovanov, O. F., 2015. Otsenka veroiatnykh izmenenii stoka v basseine reki Amur na perspektivu do 2020 i 2050 godov na osnove dannykh modelei obshchei tsirkulatsii atmosfery i okeana [Forecasting changes in river runoff in the Amur River basin for the future up to 2020 and 2050 based on data of general atmospheric and ocean circulation models], in: *Ekstremal'nye povodki v basseine Amura: gidrologicheskie aspekty* / Georgievsky, V. Yu. (ed.). Sb. rabot po gidrologii [Extreme floods in the Amur River basin: hydrological aspects. Collected papers on hydrology]. FGBU "GGI" Publ., St. Petersburg, 152–168. (In Russian).
- Kattsov, V. M., Govorkova, V. A., 2013. Ozhidaemye izmeneniia prizemnoi temperatury vozdukh, osadkov i godovogo stoka na territorii Rossii v XXI-m veke: rezul'taty raschetov s pomoshch'iu ansambliia global'nykh klimaticheskikh modelei (CMIP5) [Expected changes in surface air temperature, precipitation and annual runoff in Russia in the 21st century: results of calculations using an ensemble of global climate models (CMIP5)]. *Trudy GGO* 569, 75–97. (In Russian).
- Meehl, G. A., Bony, S., 2011. Introduction to CMIP5. WCRP coupled model intercomparison project-phase 5. *CLIVAR exchanges* 16(2), 4–5.
- Riahi, K., Gruebler, A., Nakicenovic, N., 2007. Scenarios of long-term socio-economic and environmental development under climate stabilization. *Technological Forecasting and Social Change* 74(7), 887–935.
- Shkolnik, I. M., Meleshko, V. P., Karol I. L., Kiselev A. A., Nadyozhina E. D., Govorkova V. A., Pavlova T. V., 2014. Ozhidaemye izmeneniia klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii v XXI veke [Expected climate change in the Russian Federation in the 21st century]. *Trudy GGO* 575, 65–118. (In Russian).
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., Meehl, G. A., 2012. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *The Bulletin of the American Meteorological Society* 93, 485–498.
- Wayne, G. P., 2013. The Beginner's Guide to Representative Concentration Pathways. URL: https://skepticalscience.com/docs/RCP_Guide.pdf (access date: 05.05.2019).

Received: August 13, 2018

Accepted: March 18, 2019

Author's information:

Mikhail V. Georgievsky — mgeorgievsky@hotmail.com