

Н.Д. Ахмерова¹, Г.В. Айзель², О.Н. Ерина¹, Н.К. Семенова^{1,3},
Ю.А. Симонов³, Д.И. Соколов¹, akhmerova.natali@gmail.com

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

² Потсдамский университет, г. Потсдам, Германия

³ Гидрометеорологический научно-исследовательский центр РФ, г. Москва, Россия

ОЖИДАЕМЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРИТОКА ВОДЫ В МОЖАЙСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ В XXI ВЕКЕ

Можайское водохранилище – важная составная часть системы водоснабжения г. Москвы, в связи с чем прогнозирование его гидрологического режима в XXI веке в условиях климатических изменений имеет большое значение. В данной работе на основе результатов ансамблевых расчетов глобальных климатических моделей при разных сценариях антропогенного воздействия прошлого (RCP 26, 60, 85) и последнего поколения (SSP 126, 370, 585) выполнены прогнозные оценки притока воды в Можайское водохранилище с использованием модели HBV ($NSE=0,689$, $|BIAS|=6,63\%$ на периоде калибровки). Согласно полученным результатам, в соответствии с уточненными сценариями SSP ожидается снижение притока в среднем на $1,4 \text{ км}^3/100 \text{ лет}$, тогда как по сценариям RCP ожидалось увеличение притока в среднем на $2,32 \text{ км}^3/100 \text{ лет}$.

Ключевые слова: Можайское водохранилище, река Москва, моделирование стока, модель HBV, климатические изменения, изменения стока

N. Akhmerova¹, G. Ayzel², O. Erina¹, N. Semenova^{1,3}, Y. Simonov³, D. Sokolov¹,
akhmerova.natali@gmail.com

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

² Institute for Environmental Sciences and Geography,
University of Potsdam, Potsdam, Germany

³ Hydrometeorological Research Center of Russian Federation, Moscow, Russia

EXPECTED CHANGES IN THE INFLOW TO THE MOZHAYSK RESERVOIR IN THE XXI CENTURY

Mozhaysk reservoir is one of the most important components of the water supply system of Moscow. Therefore the study and prediction of its hydrological regime in the XXI century related to the changes of climatic conditions has great importance. It was done in this work using the results of ensemble calculations of global climate models under different scenarios of anthropogenic impact of the past (RCP 26, 60, 85) and the latest generation (SSP 126, 370, 585). The HBV model ($NSE=0,689$, $|BIAS|=6,63\%$ on calibration period) was used to simulate the inflow of water into the Mozhaysk reservoir. According to the results, the inflow will decrease at a rate of $1.4 \text{ км}^3/100 \text{ years}$; according to the previous family of RCP scenarios, on the contrary, an increase in inflow was expected by an average of $2.32 \text{ км}^3/100 \text{ years}$.

Keywords: Mozhaysk reservoir, Moscow River, hydrological models, HBV model, climate change, runoff changes.

Введение

Глобальное потепление – одна из самых серьезных и исследуемых проблем в мире на данный момент. Потепление климата влечет за собой изменение количества выпадающих осадков и таяние ледников, что вызывает изменения в гидрологических системах, оказывая влияние на количество и качество водных ресурсов [10]. Во всем северном полушарии, в том числе на обширной территории России, в зонах избыточного и нормального увлажнения отмечается увеличение годового стока рек.

Москва – один из 25 крупнейших мегаполисов мира, и вопрос водоснабжения города является насущной проблемой на протяжении нескольких веков. Более 65% питьевой воды поступает благодаря Москворецкой системе, в которой важную роль играет Можайское водохранилище, созданное для водоснабжения г. Москвы и многолетнего регулирования стока р. Москвы [2].

Моделирование притока воды для данного водохранилища производилось в работе [4], однако в ней использовалась проприетарная модель ECOMAG, и, кроме того, отсутствует прогноз климатически обусловленных изменений в будущем.

Цель настоящей работы состояла в том, чтобы оценить изменения притока воды в Можайское водохранилище в XXI веке, связанные с вероятными изменениями климатических условий региона, основываясь на прогнозных данных.

Материалы и методы исследования

В качестве исходных данных в работе использовались данные реанализа EWMBI и расходы воды р. Москва (г/п Барсуки). Для моделирования стока на основе сценариев RCP 26, 60, 85 и SSP 126, 370, 585 применялась модель гидрологического стока HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning), разработанная Бергстрёмом [7].

Модель HBV была выбрана из-за ее гибкости, вычислительной эффективности, доказанной в широком диапазоне климатических и физико-географических условий [1; 5], и успешного применения на реках Восточно-Европейской равнины [3; 6]. HBV представляет собой концептуальную модель водосбора, которая преобразует атмосферные осадки, температуру воздуха и потенциальное суммарное испарение в снеготаяние, водоотдачу и затем в сток воды.

В качестве исходных метеорологических данных (суточных температур воздуха и осадков) были использованы результаты реанализа EWMBI с пространственным разрешением $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ за период 1979-2016 гг. [9]. Также для входных данных необходимо потенциальное испарение, которое вычислялось в соответствии с формулой, предложенной [11]:

$$\begin{cases} PE = \frac{R_e}{\lambda \rho} \frac{T_a + 5}{100}, & \text{если } T_a + 5 > 0 \\ PE = 0, & \text{если } T_a + 5 < 0 \end{cases},$$

где PE – потенциальное испарение (мм/сут), R_e – внеземное излучение (МДж/м²·сут), T_a – средняя суточная температура (°C), λ – скрытый тепловой поток (МДж/кг), ρ – плотность воды (1000 кг/м³).

Калибровка модели производилась методом дифференциальной эволюции на основе рядов суточных расходов воды р. Москва (г/п Барсуки), которые были пересчитаны в объемы стока. Результат калибровки модели HBV можно считать удовлетворительным ($NSE=0,689$, $|BIAS|=6,63\%$), а для последних 5 лет периода валидации – хорошими ($NSE=0,773$, $|BIAS|=3,19\%$). При этом величина относительной систематической ошибки не превышает 10% за весь рассматриваемый период, что является хорошим результатом.

В качестве исходных данных для моделирования притока воды в XXI в. использовались данные GCMs (Global circulation model), участников проекта CMIP5: RCP (26, 60, 85) и CMIP6: RCP (26, 60, 85) [8]. Для того, чтобы получить более точные результаты, были выбраны только 3 глобальные климатические модели: IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, GFDL- ESM2M из проекта CMIP5 и IPSL-CM6A-LR, MIROC6, GFDL-ESM4 из проекта CMIP6. Модели имеют различное разрешение и структуру сеток, учитывают различные физические процессы и созданы в различных научных организациях.

Анализ результатов

На основе данных трех глобальных климатических моделей для трех сценариев будущих антропогенных воздействий RCP (прошлые поколения) и SSP (последнее поколение) был получен ансамбль траекторий возможных изменений метеорологических величин в XXI веке.

Для оценки возможных изменений климата использовались две климатические характеристики: среднегодовая температура воздуха и сумма осадков за год. В результате были выделены следующие тренды потепления (с учетом того, что в последнее десятилетие среднегодовая температура составляет $6,1^{\circ}\text{C}$). Для сценариев прошлых поколений прогнозируемое изменение температуры воздуха составит: RCP26 – $1,6^{\circ}\text{C} / 100$ лет; RCP60 – $3,7^{\circ}\text{C} / 100$ лет; RCP85 – $5,8^{\circ}\text{C} / 100$ лет; для нового поколения сценариев: SSP126 – $1,0^{\circ}\text{C} / 100$ лет; SSP370 – $4,0^{\circ}\text{C} / 100$ лет; SSP585 – $5,6^{\circ}\text{C} / 100$ лет.

Таким образом, только согласно наиболее консервативным сценариям темпы роста температуры воздуха замедлятся по сравнению с современными ($0,3^{\circ}\text{C} / 10$ лет); причем, согласно новому сценарию, среднегодовая температура воздуха к концу века останется меньше $7,0^{\circ}\text{C}$.

При этом, согласно остальным сценариям, темпы роста температуры увеличатся и будут достигать от $0,37$ до $0,58^{\circ}\text{C} / 10$ лет. Впрочем, подобные темпы роста температуры воздуха на рассматриваемой территории уже наблюдаются с 2000-х годов.

Согласно новым сценариям, средняя среднегодовая температура воздуха увеличится не так значительно и будет достигать от $6,5$ до $8,2^{\circ}\text{C}$, тогда как предыдущие сценарии прогнозировали большее увеличение среднегодовой температуры: от $7,25$ до $8,8^{\circ}\text{C}$.

Количество осадков, в среднем выпадающих за год, как и среднегодовая температура, продолжит увеличиваться: согласно сценарию RCP26 – на 238 мм / 100 лет; RCP60 – 263 мм / 100 лет; RCP85 – 262 мм / 100 лет; по сценариям

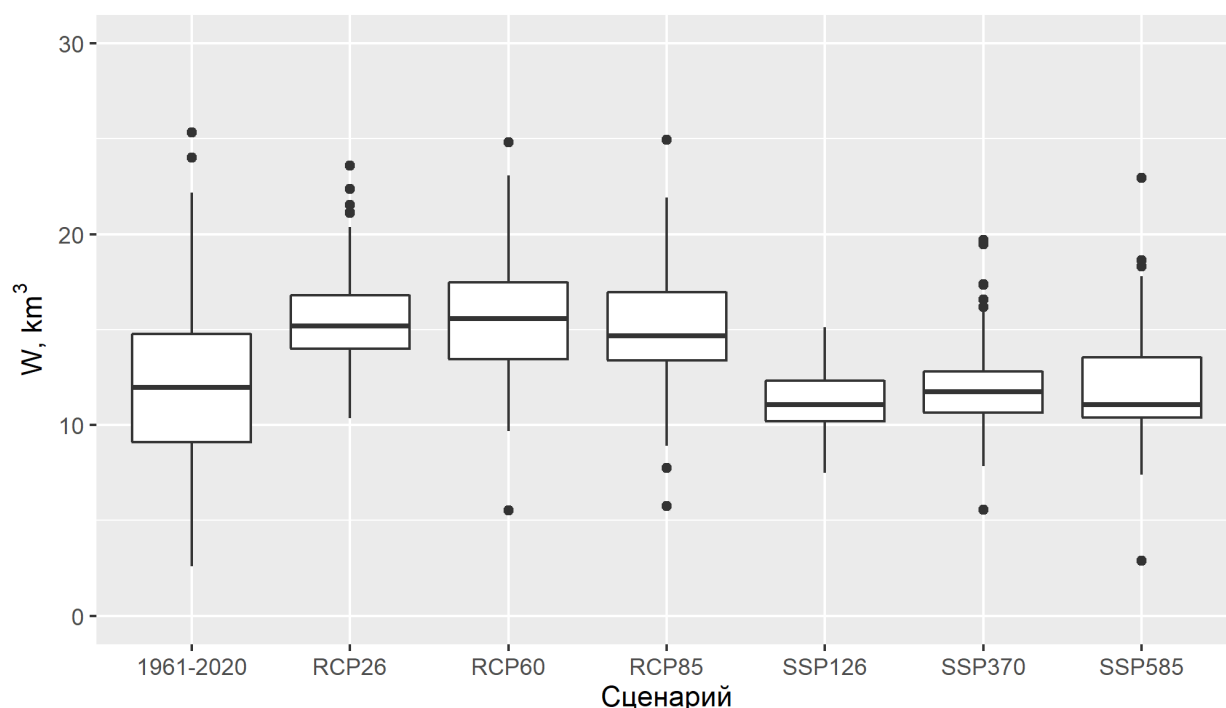
SSP126 – на 88 мм / 100 лет; SSP370 – 148 мм / 100 лет; SSP585 – 138 мм / 100 лет.

Таким образом, темпы увеличения годовых сумм осадков согласно новым сценариям значительно ниже, чем в прошлых (примерно в два раза); кроме того, они ниже наблюдаемых за последние 80 лет (17 мм за 10 лет). При этом темпы изменения температуры практически совпадают по обеим версиям сценариев.

Согласно новым сценариям, в среднем в 2020-2100 гг. суммарно в год будет выпадать от 889 до 892 мм осадков согласно сценариям RCP и от 749 до 762 мм согласно сценариям SSP, тогда как в последнее десятилетие в среднем за год выпадает 662 мм, а в среднем за последние 80 лет – 630 мм.

Согласно прошлым сценариям, в среднем наблюдается тенденция к увеличению стока, тогда как согласно последним, наоборот, к уменьшению (рис.), что вероятно связано с меньшими темпами увеличения количества осадков по новым сценариям, тогда как темпы изменения температуры в обоих версиях примерно совпадают.

Согласно прежним сценариям RCP ожидается увеличение суммарного годового притока в Можайское водохранилище со скоростью от 2,26 до 2,37 км³ / 100 лет; согласно последним сценариям – уменьшение со скоростью от 0,62 до 2,17 км³ / 100 лет.



Изменение объема притока воды в Можайское водохранилище в XXI в.

Максимальные за год расходы, согласно большинству сценариев, будут уменьшаться. Однако максимальные расходы, вызванные зимними паводками, увеличатся согласно сценариям RCP60 и RCP85 на 23,2 и 37,4% соответственно.

Минимальные расходы, наоборот, значительно увеличатся согласно всем сценариям, особенно в летний период: в 3,7-3,9 раз по сценариям RCP и в 3,2-3,5

раз по сценариям SSP. В зимний период минимальные расходы также будут увеличиваться, но меньшими темпами: в 1,8-2,1 раз по прошлым сценариям и в 1,4-1,8 раз по новым.

Таким образом, внутригодовая изменчивость стока, согласно произведенной оценке, уменьшится, особенно согласно последним сценариям (SSP).

Выводы

1. Согласно обновленным климатическим сценариям (SSP) в XXI веке ожидается уменьшение среднесноголетнего объема притока воды в Можайское водохранилище со скоростью от 0,62 до 2,17 км³ / 100 лет, тогда как согласно прошлым сценариям (RCP), наоборот, ожидалось увеличение притока со скоростью от 2,26 до 2,37 км³ / 100 лет.

2. Уменьшится внутригодовая изменчивость годового стока.

3. Максимальные за год расходы, согласно большинству сценариев, будут уменьшаться.

4. Минимальные расходы, наоборот, значительно увеличатся согласно всем сценариям, особенно в летний период.

Библиографический список

1. Копысов С.Г., Земцов В.А., Мацуяма Х., Елисеев А.О. Моделирование гидрографов стока арктических рек Западной Сибири в программе HBV-light для оценки экстремальных расходов половодья // Геосферные исследования. 2020. Т. 4. С. 108-120.

2. Отчётность – Мосводоканал [Электронный ресурс]: годовые отчеты акционерного общества «Мосводоканал» за 2011-2019 годы. Электрон. дан. (9 файлов). М., [2011-2019]. Режим доступа: <https://www.mosvodokanal.ru/forinvestors/reporting/#annual-tab>. Загл. с экрана.

3. Симонов Ю.А., Семенова Н.К., Христофоров А.В. Методика краткосрочных прогнозов расходов воды на реках бассейна Камы на основе использования модели HBV // Метеорология и гидрология. 2021. № 6. С. 66-65.

4. Сучкова К.В. Моделирование генетических составляющих речного стока для водосбора Можайского водохранилища: автореф... дис. кан. геогр. наук. М.: 2020. 24 с.

5. Ayzel G., Izhitskiy A. Climate change impact assessment on freshwater inflow into the small aral sea // Water (Switzerland). 2019. Vol. 11. № 11. 2377.

6. Ayzel G.V. Runoff Predictions in Ungauged Arctic Basins Using Conceptual Models Forced by Reanalysis Data // Water Resources. 2018. Vol. 45. P. 1-7.

7. Bergström S. The HBV model – its structure and applications. SMHI Reports RH No. 4. SMHI, Norrköping. 1992. 32 p.

8. Eyring V., Bony S., Meehl G.A., Senior C.A., Stevens B., Stouffer R.J., Taylor K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization // Geoscientific Model Development. 2016. Vol. 9. № 5. P. 1937-1958.

9. *Frieler K.* et al. Assessing the impacts of 1.5 °C global warming – Simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP2b) // *Geoscientific Model Development*. 2017. Vol. 10. № 12. P. 4321-4345.

10. *Jarraud M., Steiner A.* Summary for policymakers / In Field, C., Barros, V., Stocker, T. & Dahe, Q. (Eds). Cambridge: Cambridge University Press. 2012. P. 3-22.

11. Oudin L., Hervieu F., Michel C., Perrin C., Andréassian V., Anctil F., Loumagne C. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model? // *Journal of Hydrology*. 2005. Vol. 303. № 1-4. P. 290-306