

География

УДК 556.5

ОЦЕНКА БУДУЩИХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК РЕЧНОГО СТОКА И БИОГЕННОЙ НАГРУЗКИ
В БАССЕЙНЕ ЧЕБОКСАРСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

М. В. СИДОРОВА^{1*}, С. А. КОНДРАТЬЕВ^{2**}, М. В. ШМАКОВА^{2***},
Е. А. КАШУТИНА^{1****}, С. В. ЯСИНСКИЙ^{1*****}

¹ Институт географии, РАН, Москва, Россия

² Институт озероведения, Санкт-Петербургского Федерального
исследовательского центра РАН, Санкт-Петербург, Россия

Анализ возможных гидрологических изменений и биогенной нагрузки в бассейне Чебоксарского водохранилища в XXI в. основан на проекциях будущего климата в ансамбле моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) проекта CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project), отобранных по критерию достоверности воспроизведения регионального климата для двух сценариев климатических изменений. Проведена оценка коэффициента вариации годового стока и стока маловодных лет 95%-й обеспеченности, а также суммы осадков холодного периода для бассейна Чебоксарского вдхр. Приближенная оценка нагрузки общим азотом ($N_{общ}$) и общим фосфором ($P_{общ}$) на Чебоксарское вдхр. выполнена на основе математического моделирования с использованием имеющихся данных наблюдений на пилотных водосборах и рассчитана для XXI в. на основании данных одной МОЦАО.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2025.59.2.557>

Keywords: river runoff, general circulation models, low-water years, flood runoff, nitrogen, phosphorus, nutrient loading.

Введение. Оценка будущих изменений характеристик речного стока представляет собой важную задачу гидрологии, поскольку затрагивает вопросы водообеспечения, эксплуатации гидротехнических сооружений и управления водными ресурсами. В прошлом гидрологическое прогнозирование основывалось на гипотезе стационарности гидроклиматических условий, однако современные исследования показывают, что глобальное потепление приводит к существенным изменениям в водном балансе рек.

Одной из проблем, являющейся последствием как климатических изменений, так и антропогенного освоения водосборов является эвтрофирование, и

* E-mail: sidorova@igras.ru

** E-mail: kondratyev@limno.org.ru

*** E-mail: m-shmakova@yandex.ru

**** E-mail: kashutina@igras.ru

***** E-mail: yasisergej@yandex.ru

это – одна из проблем водохранилищ Волжского каскада [1]. На завершающих стадиях развития процесса антропогенного эвтрофирования в эвтрофных и гиперэвтрофных водных объектах возможно возникновение дисбаланса в соотношении продукционно-деструкционных процессов. Это приводит к возникновению бескислородных (анаэробных) зон, заморным явлениям, уменьшению рыбных запасов, а также к загрязнению воды токсичными веществами в результате развития определенных видов фитопланктона – “цветения” воды [2, 3].

Бассейн Чебоксарского водохранилища, расположенный на средней Волге, представляет особый интерес для исследования в связи с его важной ролью в системе регулирования речного стока. В данной работе проведен анализ изменений коэффициента вариации речного стока, вероятности экстремально маловодных лет и осадков холодного периода с использованием данных ансамбля моделей CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 6). Также выполнена прогностическая оценка возможного выноса биогенных элементов с водосбора водохранилища в результате климатических изменений в регионе.

Материалы и методы. Основой прогнозных оценок в данной работе служат результаты моделирования климата, проведенного в рамках проекта CMIP6 Всемирной программы исследований климата (WCRP) [4]. Это проект взаимного сравнения совмещенных моделей общей циркуляции атмосферы и океана, который объединяет результаты глобального климатического моделирования различных стран. К 2018 г. в рамках CMIP6 было одобрено 23 проекта по сравнению моделей, в которых участвовали 33 группы моделирования из 16 стран. Этими группами разработано 45 моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО) [5]. Модели используют различные схемы формализации глобальных климатических процессов, начальные и граничные условия.

Обязательным этапом перед работой с данными глобальных моделей является их предварительное тестирование по качеству воспроизведения характеристик современного климата. Эта задача была выполнена ранее [5] и из 45 МОЦАО проекта CMIP6 был отобран ансамбль из 9 моделей: FGOALS-f3-L, GISS-E2-2-H, CESM2, BCC-CSM2-MR, E3SM-1-1-ECA, BCC-ESM1, NorESM2-MM, CESM2-WACCM, FIO-ESM-2-0, которые воспроизводили современный климат исследуемой территории наиболее убедительно. Для каждой модели были рассчитаны ошибки воспроизведения средних значений среднемноголетних сумм осадков, среднеквадратических отклонений и площади совпадения трендов сумм осадков за период 1985–2014 гг.

Однако в данной работе оценка характеристик будущего стока приведена только по 4 моделям, для которых наилучшим образом воспроизводился современный климат (осадки) и в которых был смоделирован речной сток для прогнозных периодов. Это модели различных научных групп и стран: BCC-CSM2-MR, CESM2-WACCM, FGOALS-f3-L, FIO-ESM-2-0. Оценка изменений биогенной нагрузки выполнена на основе данных модели BCC-CSM2-MR.

На основе данных выдач по стоку МОЦАО проведена оценка вероятности экстремально маловодных лет и осадков холодного периода как предиктора изменений стока половодья для XXI в. Для оценки максимального стока

рассмотрен только случай весеннего половодья, вызванного таянием снега. Эти оценки позволяют сделать выводы о возможных рисках для водного хозяйства в бассейнах водохранилищ Верхней Волги и Камы.

В качестве базового периода рассматривался период 1985–2014 гг. В качестве прогнозных – два 20-летних периода, условно характеризующих условия середины (2041–2060 гг.) и конца (2081–2100 гг.) XXI в. Периоды такой длины были выбраны, поскольку климатические модели характеризуют изменения именно среднемноголетних характеристик.

Оценки изменений проведены для двух сценариев ScenarioMIP, SSP (общих социально-экономических путей): из пяти предполагаемых траекторий развития человечества в XXI в.:

SSP1-2.6: устойчивый и “зеленый” путь, описывающий мир с низким уровнем выбросов. Основное внимание уделяется благосостоянию людей и минимизации расхода ресурсов.

SSP5-8.5: наиболее пессимистичный сценарий с высоким уровнем выбросов, основанный на интенсивной эксплуатации ископаемого топлива и энергоемком образе жизни [6].

Эти сценарии можно оценивать, как своего рода диапазон возможных изменений – оценку “сверху” и “снизу”.

Методика оценки изменения вероятности появления экстремально маловодных лет. В качестве характеристик экстремального низкого стока рассчитаны объем стока экстремально маловодных лет 95%-й обеспеченности. Для оценки изменения указанных характеристик (обеспеченностью более 95%) были исследованы изменения параметров функции распределения вероятности, а именно полученной ранее нормы стока [7] и коэффициента вариации годового стока (C_y). Наличие этих параметров позволяет рассчитать сток любого квентиля. Оценка изменчивости стока проводилась на основании тех же прогнозных данных о стоке по тем же 4 МОЦАО. Расчеты проводились по каждой модели отдельно, и затем результаты относительных изменений осреднялись по ансамблю моделей.

Возможная интерпретация полученных результатов с точки зрения изменений водных ресурсов такова: с увеличением C_y значения квантилей в области малых годовых расходов снижаются, а в области высоких годовых расходов увеличиваются. Таким образом, общее снижение стока, вызванное уменьшением нормы стока, усугубляется увеличением межгодовой изменчивости стока, т.е. повышением повторяемости маловодных лет. И даже небольшое увеличение изменчивости стока вызывает значительное повышение повторяемости лет с экстремально низкой водностью.

В качестве экстремально маловодных лет, по меркам современного периода, примем годы с обеспеченностью годового стока Q менее 95% (обычно используемые значения при составлении водохозяйственных балансов территорий), то есть $Q_{\text{кр.}} = Q_{95\%}$. При неизменности нормы стока, но увеличении коэффициента его вариации в 1,2 раза обеспеченность расхода $Q_{\text{кр.}}$ во всем диапазоне реальных значений C_y на ЕТР снижается с 95% примерно до 90%. Таким образом, повторяемость маловодных лет $Q \leq Q_{\text{кр.}}$ возрастает в 2 раза (1 раз в 20 лет в современных условиях и 1 раз в 10 лет – в измененных).

Методика оценки изменений стока половодья. На большей части территории России годовой сток на 70% определяется стоком половодья, поэтому именно весеннеев половодье определяет условия использования водных и гидроэнергетических ресурсов. Для ГЭС Волжско-Камского каскада статистическая зависимость годовой выработки электроэнергии от объема годового стока описывается линейными регрессионными уравнениями с коэффициентами корреляции от 0,69 до 0,97 [8].

Для исследуемой территории максимальный сток в году также наблюдается в период весеннего половодья. Именно этот период формирует запасы воды в водохранилищах и обеспечивает бесперебойную работу ГЭС и водозаборов в течение года. Сток за период половодья, в свою очередь, связан с процессами снегонакопления, а его величина во многом определяется запасами воды в снежном покрове. Во многих работах [9, 10] приводятся расчеты максимального снегозапаса как функции от такой характеристики, как осадки за холодный период. Под осадками за холодный период подразумевается сумма осадков за те месяцы, средняя температура которых оказалась ниже 0°C.

В данной работе проведены расчеты суммы осадков за холодный период (за те месяцы, средняя температура которых оказалась ниже 0°C), для базового и прогнозных периодов для каждой из 4 моделей, относительные изменения представлены по ансамблю моделей.

Методика оценки биогенной нагрузки. Использовалась совокупность моделей ILHM (Institute of Limnology Hydrological Model) и ILLM (Institute of Limnology Load Model) [11], представляющая собой модель типа “precipitation-runoff-removal”, трансформирующая метеопараметры (осадки и температуру воздуха) в сток и вынос биогенных элементов с водосбора в зависимости от характеристик подстилающей поверхности и интенсивности внешних воздействий естественного и антропогенного характера. Модель стока ILHM предназначена для расчета гидрографов талого и дождевого стока с водосбора, а также уровней воды в водоеме. Модель биогенной нагрузки ILLM разработана на основе существующих моделей стока и выноса биогенных веществ с водосборных площадей и их поступления в водоемы [11, 12]. Модель “precipitation-runoff-removal” обеспечена информацией об основных источниках биогенной нагрузки на гидрографическую сеть и откалибрована для замыкающего створа пилотного водосбора [13]. В качестве входных данных для оценки биогенной нагрузки в XXI в. использовались месячные осадки и температуры по данным МОЦАО ВСС-CSM2-MR.

Результаты исследований и их обсуждение. Приведенные исследования показывают, что норма стока на исследуемой территории в XXI в. практически не изменяется. Оба сценария демонстрируют незначительные изменения, поскольку ожидаемое увеличение температуры и испарения компенсируется увеличением осадков.

Коэффициент вариации речного стока C_y в XXI в. по сценариям 2.6 и 8.5 имеет тенденцию к росту, то есть вероятность экстремально маловодных и многоводных лет увеличится. Для обоих сценариев этот рост невелик и практически не превышает 10%.

Изменения C_y и нормы стока были использованы для построения функций распределения вероятности речного стока в новых климатических условиях и для расчета изменений критического расхода $Q_{95\%}$. Поскольку значительных снижений нормы стока по бассейнам водохранилищ для исследуемой территории не ожидается, то и $Q_{95\%}$ меняется незначительно, даже для пессимистичного сценария мы видим уменьшение $Q_{95\%}$ лишь на 5% для бассейна Чебоксарского водохранилища. Многие авторы [14–17] отмечают, что сток рек южной части Русской равнины в последние десятилетия несколько уменьшился. Однако для исследуемой территории эта тенденция смягчается увеличением суммы осадков и (как будет показано далее) увеличением меженного питания за счет снижения стока половодья.

Расчет изменения сумм осадков холодного периода ($P_{хол.}$) по сценарию 2.6 показал заметное увеличение характеристики для периода середина XXI в. (32%), очевидно, за счет общего увеличения суммы осадков, однако к концу века с ростом температур этот параметр возвращается к значениям базового периода. А вот пессимистичный сценарий 8.5, характеризующийся гораздо более быстрым ростом температур, демонстрирует снижение $P_{хол.}$ уже к середине века на всей исследуемой территории на 10% и усиление тенденции к концу века, к 2100 г. снижение может составить до 35%. Это можно трактовать как возможное снижение стока половодья и, учитывая отсутствие снижения годового стока, переход водозапасов от фазы половодья к фазам летней и зимней межени.

Изменения фосфорной и азотной нагрузки на Чебоксарское водохранилище с правобережной и левобережной частей водосбора за период 2020–2100 гг., рассчитанные в соответствии с климатическими сценариями RCP 2.6 и 8.5, показали следующие результаты: по сценарию RCP 8.5 можно ожидать снижение фосфорной нагрузки в целом на водохранилище на 57,7 m^3 Р/год, азотной – на 500 m^3 N/год. Реализация сценария RCP 2.6 может привести к возрастанию нагрузки на 44,4 m^3 Р/год и на 2025 m^3 N/год.

Заключение. Анализ расчетов речного стока и биогенной нагрузки по МОЦАО показал, что коэффициент вариации стока имеет тенденцию к росту, что связано с ростом вариабельности осадков, наиболее заметно тенденцию демонстрирует расчет по сценарию 8.5 для конца XXI в. Это может приводить к увеличению числа экстремально засушливых и экстремально многоводных лет, однако расчеты не демонстрируют значимых изменений, что связано с компенсацией тенденций к снижению стока в одних частях бассейна, тенденциями к повышению стока в других частях.

Наиболее заметно изменения климата скажутся на стоке половодья. Осадки холодного периода как основная приходная часть баланса половодья имеют тенденцию к повышению для середины века по сценарию 2.6 и ярко выраженную тенденцию к снижению для конца века по сценарию 8.5. В целом, подобная тенденция уже ярко проявляется в южных частях ЕТР, например в бассейне Дона, и вполне вероятно расширение территории, где половодье теряет свою первостепенную роль в водном режиме.

При реализации экологически неблагополучного сценария RCP 8.5 можно ожидать снижения фосфорной и азотной нагрузки в целом на

водохранилище, а реализация сценария RCP 2.6 может привести к возрастанию биогенной нагрузки.

Подобные изменения необходимо учитывать в стратегическом планировании водохозяйственных отраслей, проектах многолетнего и годового регулирования водохранилищ и других водопользовательских проектах.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РАН в рамках госзадания FMWS-2024-0007 (1021051703468-8).

Поступила 04.04.2025

Получена с рецензией 20.06.2025

Утверждена 15.08.2025

ЛИТЕРАТУРА

1. Минеева Н.М., Семадени И.В., Макарова О.С. Содержание хлорофилла и современное трофическое состояние водохранилищ р. Волги (2017–2018 гг.). *Биология внутренних вод* **2** (2020), 205–208.
2. Горелова Э.М., Кириллова В. А. и др. *Антропогенное эвтрофирование Ладожского озера*. Ленинград, Наука (1982), 304.
3. Россолимо Л.Л. *Изменение лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора*. Москва, Наука (1977).
4. Taylor K.E., Stouffer R.J., Meehl G.A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bulletin of the American Meteorological Society* **93** (2012), 485–498.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
5. Sidorova M., Alieva M., et al. Selection of an Ensemble of Atmospheric and Oceanic General Circulation Models of the CMIP-6 Project for Estimating Possible Runoff Changes in the Volga and Kama Basins. *E3S Web of Conf.* **407** (2023), 02011.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202340702011>
6. O'Neill B.C., Tebaldi C., et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.* **9** (2016), 3461–3482.
<https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
7. Sidorova M., Yasinsky S. Assessment of River Flow Future Changes in the Upper Volga and Kama Basins Based on Climate Modeling Data. *E3S Web Conf.* **555** (2024), 01012.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202455501012>
8. Акентьева Е.М., Сидоренко Г.И., Тюсов Г.А. К оценке влияния наблюдаемых и ожидаемых в будущем климатических изменений на гидроэнергетический потенциал регионов РФ. *Тр. Главной геофиз. обсерватории им. А.И. Вoeикова* **570** (2014), 95–105.
9. Ясинский С.В., Гусев Е.М. Динамико-стохастическое моделирование процессов формирования весеннего склонового стока на малых водосборах. *Почвоведение* **7** (2003), 847–861.
10. Гусев Е.М. *Формирование режима почвенных вод в зимне-весенний период*. Москва, Наука (1993), 158.
11. Кондратьев С.А., Шмакова М.В. *Математическое моделирование массопереноса в системе водосбор-водоток- водоем*. Санкт-Петербург, Нестор-История (2019).
12. Behrendt H., Opitz D. Retention of Nutrients in River Systems: Dependence on Specific Runoff and Hydraulic Load. *Hydrobiologia* **410** (1999), 111–122.
13. Yasinskiy S.V., Kondratyev S.A., et al. Assessment of Nutrient Load on the Cheboksary Reservoir Using the Results of Modeling Runoff and Removal of Biogenic Elements from the Pilot Catchments. *Limnology and Freshwater Biology* **3** (2024), 130–141.
<https://doi.org/10.31951/2658-3518-2024-A-3-130>
14. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л., и др. *Современные ресурсы подземных и поверхностных вод Европейской части России: Формирование, распределение, использование*. Москва, ГЕОС (2015a), 320.

15. Джамалов Р.Г., Фролова Н.Л. и др. Изменения поверхностного и подземного стока рек России и их режимов в условиях нестационарного климата. *Вестн. РФФИ* **6** (2013), 34–42.
16. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Санкт-Петербург, Наукоемкие технологии (2022), 124.
17. Shiklomanov A.I., Lammers R.B., et al. Hydrological Changes: Historical Analysis, Contemporary Status, and Future Projections. In: *Regional Environmental Changes in Siberia and their Global Consequences*. Springer, Dordrecht (2013), 111–154.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8_4

Մ. Վ. ՍԻԴՈՐՈՎԱ, Ս. Ա. ԿՈՆԴՐԱՏՅԵՎ, Մ. Վ. ՇՄԱԿՈՎԱ,
Ե. Ա. ԿԱՇՈՒՏԻՆԱ, Ս. Վ. ՅԱՍԻՆՏՅԱՆ

ԶԵԲՈԿԱՐԻ ԶՐԱՄԲԱՐԻ ԱՎԱՉԱՆՈՒՄ ԳԵՏԱՅԻՆ ՀՈՍՔԻ ԵՎ
ԿԵՆՍԱԾԻՆ ԲԵՌԱՎԱԾՈՒԹՅԱՆ ԾԱՅՐԱՀԵՂ ԲՆՈՒԹՎԱԳՐԵՐԻ
ԱՊԱԳՎԱ ՓՈՓՈԽՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄ

Ամփոփում

Զեբռասարի ջրամբարի ավագանում 21-րդ դարում հնարավոր հիդրոլոգիական փոփոխությունների և սննդանյութերի բեռնվածության վերլուծությունը հիմնված է CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project) մթնոլորտային և օվկիանոսային ընդհանուր շրջանառության մոդելների (AOGCM) համույթի ապագա կլիմայի կանխատեսումների վրա, որոնք ընտրվել են կլիմայի փոփոխության երկու սցենարների համար տարածաշրջանային կլիմայի վերաբարդության հուսալիության չափանիշի համաձայն: Զեբռասարի ջրամբարի ավագանի համար գնահատվել է տարեկան հոսքի և 95% հավանականությամբ սակավաջուր տարիների հոսքի փոփոխականության գործակիցը, ինչպես նաև ցուրտ ժամանակահատվածում տեղումների քանակը: Զեբռասարի ջրամբարի վրա ընդհանուր ազոտի (N_{tot}) և ընդհանուր ֆոսֆորի (P_{tot}) բեռնվածության մոտավոր գնահատումը կատարվել է մաթեմատիկական մոդելավորման հիման վրա՝ օգտագործելով փորձնական ջրհավաք ավագանների վերաբերյալ առկա դիտարկումների տվյալները և հաշվարկվել է 21-րդ դարի համար՝ հիմնվելով մեկ AOGCM-ի տվյալների վրա:

M. V. SIDOROVA, S. A. KONDRATYEV, M. V. SHMAKOVA,
E. A. KASHUTINA, S. V. YASINSKY

ASSESSMENT OF FUTURE CHANGES IN EXTREME CHARACTERISTICS OF RIVER RUNOFF AND NUTRIENT LOADING IN THE BASIN OF THE CHEBOKSARY RESERVOIR

Summary

The analysis of potential hydrological changes and nutrient loading in the basin of the Cheboksary Reservoir in the 21st century is based on future climate projections derived from an ensemble of Coupled Model Intercomparison Project

Phase 6 (CMIP6) General Circulation Models (GCMs). These models were selected according to their reliability in reproducing regional climate patterns under two climate change scenarios. The study evaluates the coefficient of variation in annual runoff and the runoff of low-water years with 95% exceedance probability, as well as the total precipitation during the cold season in the Cheboksary Reservoir basin. An approximate assessment of the total nitrogen (N_{tot}) and total phosphorus (P_{tot}) loading on the Cheboksary Reservoir was conducted using mathematical modeling based on available observational data from pilot watersheds and projected for the 21st century using data from one GCM.