

## СРАВНЕНИЕ ДВУХ МЕТОДОВ ЗАДАНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПРОЕКЦИЙ В РЕГИОНАЛЬНУЮ ГИДРОЛОГИЧЕСКУЮ МОДЕЛЬ (НА ПРИМЕРЕ БАССЕЙНА р. АМУР)<sup>3</sup>

*Гельфан А.Н., Калугин А.С., Мотовилов Ю.Г.*  
Институт водных проблем РАН, г. Москва, Россия  
andrey.kalugin@iwp.ru

**Введение.** Существующие оценки современного состояния климата и водных ресурсов в бассейне Амура, а также их будущих изменений, получены, в большинстве своем, с помощью глобальных моделей климата [1-3]. Глобальные модели климата, основу которых составляют модели общей циркуляции атмосферы и океана, содержат упрощенную параметризацию процессов гидрологического цикла суши, что приводит к существенным погрешностям в воспроизведении водного режима речных бассейнов за период имеющихся наблюдений и росту неопределенности в оценках возможных изменений водного режима [4]. Перспективы уточнения таких оценок связаны с использованием проверенных по данным наблюдений физико-математических моделей гидрологического цикла речных бассейнов, граничными условиями для которых служат сценарии будущих гидрометеорологических воздействий на речной водосбор. Способность физико-математических моделей к воспроизведению характеристик водного режима реки и других составляющих гидрологического цикла речного бассейна за период наблюдений, которая оценивается в процессе разработки моделей с применением специальных тестов (например, [5]), рассматривается гидрологическим сообществом, как необходимое (хотя и не достаточное) условие получения физически обоснованных оценок гидрологических последствий изменения климата и снижения неопределенности полученных оценок [6].

Цель настоящей статьи – оценка гидрологических последствий изменения климата в бассейне Амура по данным численных экспериментов с региональной моделью формирования речного стока и глобальных климатических моделей. Оценки возможных изменений характеристик стока в XXI веке рассчитаны при 2-х методах задания климатических проекций в качестве граничных условий для гидрологической модели:

(1) по данным расчета с помощью ансамбля глобальных моделей климата проекта СМIP5 и

(2) по данным, полученным методом линейной трансформации фактических рядов метеорологических наблюдений с использованием рассчитанных по моделям климата норм климатических параметров.

### **Результаты моделирования водного режима р. Амур за период наблюдений**

Для проведения численных экспериментов применялась модель формирования стока в бассейне р. Амур, построенная на базе информационно-моделирующего комплекса ECOMAG [7]. В ряде статей описан опыт применения модификаций этой модели при решении актуальных прикладных задач для частных водосборов в бассейне Амура, например, для оценки эффективности действующих и планируемых водохранилищ на реках Зея и Буряя для снижения паводковой опасности на среднем

---

<sup>3</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00700П). Алгоритм построения климатических проекций по данным глобальных моделей климата разработан при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-05-00679).

Амуре [8, 9]. Модель позволяет описать по имеющимся метеорологическим данным (измеренным на метеорологических станциях, расположенных на водосборе р. Амур, или рассчитанным с помощью моделей климата) процессы формирования и таяния снежного покрова, эвапотранспирации, вертикального тепло- и влагопереноса в почве, а также стекание воды по склонам водосбора, подповерхностный и грунтовый сток, движение воды в речной системе с суточным шагом по времени и пространственным разрешением равным размеру ячейки расчетной сетки (для описываемой модели бассейна Амура – 944 км<sup>2</sup>). Большая часть пространственно распределенных параметров модели – измеряемые характеристики речного бассейна, которые заданы из глобальных баз данных о рельефе, свойствах почв, растительности, ландшафтов. Часть параметров калибровалась по данным о расходах воды в разных створах, расположенных на основном русле реки и ее притоках.

При разработке модели в качестве граничных условий задавались временные ряды среднесуточных величин температуры и относительной влажности воздуха, интенсивности осадков, измеренных на 232 метеорологических станциях (169 приходится на российскую часть бассейна) по данным ВНИИГМИ-МЦД. Калибровка модели проводилась по данным о ежедневных расходах воды за период 1994–2003 гг., ее проверка за период 2004–2013 гг. на 15 гидрологических постах с площадями водосборов от 8 тыс. км<sup>2</sup> до 1.8 млн. км<sup>2</sup>. Качество расчетов оценивалось по критерию Нэша-Сатклифа NSE и критерию относительной погрешности расчета BIAS. Для замыкающего створа р. Амур (с. Богородское) за период калибровки модели NSE=0.85, BIAS=–5.5%; за период верификации NSE=0.84, BIAS=0.7%. Результаты апробации модели подробно описаны в [10]. Полученные удовлетворительные результаты воспроизведения водного режима р. Амур за период наблюдений дали основание полагать, что разработанная модель формирования стока применима для оценки гидрологических последствий изменения климата в рассматриваемом бассейне.

**Оценка возможных изменений водного режима р. Амур в XXI веке.** Для оценки возможных изменений водного режима р. Амур при прогнозируемых климатических условиях в XXI веке было проведено две серии численных экспериментов с разработанной с моделью формирования стока. В первой серии граничные условия в модели формирования стока, имитирующие сценарии будущих метеорологических воздействий на водосбор, задавались по данным, рассчитанным с помощью ансамбля глобальных моделей климата. Во второй серии экспериментов граничные условия задавались по данным, полученным путем линейной трансформации фактических рядов метеорологических переменных с использованием информации о прогнозируемых изменениях климатических норм этих переменных. Примененный метод линейной трансформации метеорологических рядов наблюдений (в англоязычной литературе метод «delta-change», DC-метод), впервые описан в [11]. Суть метода – в построении искусственных рядов метеорологических переменных путем внесения в фактические ряды этих переменных малых постоянных возмущений, которые соответствуют прогнозируемым изменениям климатических норм соответствующих переменных. При этом считается, что другие вероятностные свойства (внутрисезонная и межгодовая изменчивости, внутрирядные автоковариации и кросс-ковариации между переменными, пространственные ковариационные функции и др.), присущие фактическим рядам этих переменных, не изменятся в будущем, иными словами, линейно трансформированные фактические ряды могут служить приближением проекций изменения климата.

На основе информации, размещенной на портале Всемирного центра данных по климату, для бассейна Амура были созданы базы метеорологических данных расчетов по ансамблю из 9-ти глобальных моделей климата (Global Climate Models, GCMs) – участников проекта СМIP5. Для каждой модели метеоданные в условиях современного климата предварительно скорректированы для приведения осредненных по площади бассейна Амура, рассчитанных значений климатических норм характеристик к соответствующим нормам, определенным по данным наблюдений за период 1986–2005 гг. ( $T=-0.5^{\circ}\text{C}$ ,  $P=550$  мм,  $D=3.4$  мб).

Вначале с помощью гидрологической модели, на входе которой задавались данные расчетов ансамбля GCMs, были рассчитаны гидрографы стока р. Амур за период наблюдений 1986-2005 гг. Показано, что модель позволяет с удовлетворительной точностью рассчитать норму годового стока реки за указанный период: относительная погрешность расчета стока по данным девяти глобальных моделей климата составила 14%.

Для оценки возможных изменений водного режима р. Амур в XXI веке использованы проекции климата, рассчитанные по 9-ти GCMs при разных сценариях антропогенных воздействий (RCP-сценариев – Representative Concentration Pathways). В табл. 1 показаны результаты расчетов сочетаний средних по бассейну и усредненных по ансамблю GCMs аномалий норм температуры воздуха  $\Delta T$  и атмосферных осадков  $\Delta P$  в течение XXI века для четырех RCP-сценариев. Для бассейна Амура в течение XXI в. для всех сценариев отмечены положительные аномалии среднегодовых норм температуры воздуха и атмосферных осадков.

Таблица 1. Усредненные по ансамблю климатических моделей аномалии средней по бассейну Амура нормы температуры воздуха ( $^{\circ}\text{C}$ , числитель) и осадков (% , знаменатель) по отношению к соответствующим нормам базового периода (1986–2005 гг.)

сценарий период	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
2020–2039	1.4 / 3.6	1.4 / 4.3	1.3 / 3.4	1.6 / 6.3
2040–2059	1.7 / 7.0	2.2 / 8.0	2.0 / 5.6	2.8 / 8.8
2060–2079	1.7 / 6.8	2.9 / 9.6	2.8 / 8.2	4.4 / 15.6
2080–2099	1.7 / 5.8	2.9 / 11.6	3.8 / 12.2	6.0 / 21.7

По временным рядам среднесуточных значений интенсивности осадков, температуры и влажности воздуха, определенным по данным 9-ти моделей климата при четырех RCP-сценариях, с помощью гидрологической модели рассчитаны многолетние ряды расходов воды в замыкающем створе в XXI веке. На основе полученных гидрографов вычислялись аномалии годового стока как отношение рассчитанной по данной модели и при данном RCP-сценарии нормы стока к рассчитанной по данной модели норме годового стока за базовый период (1986–2005 гг.). Аномалии нормы годового стока р. Амур в XXI веке рассчитывались для 4-х двадцатилетних периодов века: 2020–2039, 2040–2059, 2060–2079 и 2080–2099. Показано, что предвычисленные с помощью гидрологической модели по данным разных глобальных моделей климата заметно ( $\pm 20-25\%$ ) отличаются при одном и том же сценарии будущих радиационных воздействий (модельная неопределенность). Для уменьшения неопределенности этого вида проводилось усреднение по ансамблю 9-ти оценок, полученных с помощью гидрологической модели для заданного сценария. В результате полученные величины аномалии нормы годового стока р. Амур в течение

XXI века – отрицательные для сценариев RCP 6.0 и RCP 8.5 и к концу XXI века достигают (-5÷-7)%. При реализации сценариев RCP 2.6 и RCP 4.5 аномалии нормы годового стока близки к нулю.

Алгоритм применения DC-метода построения искусственных временных рядов метеорологических воздействий на водосбор Амура (вторая серия численных экспериментов) заключался в следующем. Ежедневные значения интенсивности осадков  $P_i$  и температуры воздуха  $T_i$  ( $i$  – номер суток от начала расчетов 01.01.1986) измеренные на метеорологических станциях рассматриваемого бассейна в течение базового периода (1986–2005 гг.), изменялись на постоянный множитель  $\Delta P$ , % и на постоянную величину  $\Delta T$ , °C соответственно. Использовалось 16 сочетаний  $\Delta P$  и  $\Delta T$ , каждое из которых соответствует средним по ансамблю климатических моделей величинам  $\Delta P$  и  $\Delta T$  для одного из 4-х RCP-сценариев и одного из 4-х двадцатилетних периодов XXI века (см. табл. 1). В результате для каждой из 232 метеорологических станций, данные наблюдений которых использовались при построении модели, построены искусственные ряды ежедневных значений осадков  $P_i^* = P_i \times \Delta P$  и температуры воздуха  $T_i^* = T_i + \Delta T$  со средними значениями, равными прогнозируемым на разные периоды XXI века по моделям климата.

В результате применения DC-метода получены 16 двадцатилетних рядов среднесуточных величин интенсивности осадков, температуры и влажности воздуха со средними значениями, равными соответствующим средним, которые рассчитаны с помощью GCMs для 4-х периодов XXI в. и 4-х RCP-сценариев. Повторим, что за исключением средних значений полученные искусственные ряды метеорологических переменных аналогичны фактическим рядам соответствующих переменных за период 1986–2005 гг.

Измененные ряды среднесуточных значений интенсивности осадков  $P_i^*$ , температуры воздуха  $T_i^*$  и дефицита влажности воздуха  $D_i^*$  задавались на входе гидрологической модели, и рассчитывались нормы годового стока, соответствующие 16-ти сочетаниям аномалий  $\Delta P$  и  $\Delta T$ . По результатам расчетов определялись аномалии речного стока  $\Delta Y$  (в %), как отношение нормы стока при определенном сочетании параметров  $\Delta P$  и  $\Delta T$  к норме стока, рассчитанной за базовый период 1986–2005 гг. при фактических значениях метеорологических данных. Рассчитанные аномалии приведены в табл. 2.

Таблица 2. Аномалии нормы годового стока (%), рассчитанной по преобразованным рядам метеорологических наблюдений по отношению к соответствующей норме стока за базовый период (1986-2005 гг.)

сценарий период	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6.0	RCP 8.5
2020–2039	-7.2	-4.3	-5.6	-4.4
2040–2059	-1.0	-5.9	-8.8	-12.2
2060–2079	-2.0	-9.9	-13.3	-19.0
2080–2099	-4.9	-5.8	-15.9	-21.2

Полученные по DC-методу аномалии норм годового стока сопоставлялись с аномалиями, рассчитанными по данным GCMs при RCP-сценариях для тех же двадцатилетних периодов. Таким образом, оценивалась чувствительность аномалий годового стока р. Амур к климатическим нормам температуры воздуха и атмосфер-

ных осадков. Показано, что зависимости рассчитанных двумя способами аномалий нормы стока р. Амур от изменений климатических параметров могут быть аппроксимированы линейными функциями:

$$\Delta Y_{GCM} = 2.0 - 9.0\Delta T + 2.1\Delta P; \quad \Delta Y_{DC} = 3.0 - 12.6\Delta T + 2.3\Delta P.$$

Приведенные зависимости хорошо описывают результаты моделирования аномалий речного стока: коэффициенты детерминации равны  $R^2_{GCM}=0.92$ ,  $R^2_{DC}=0.96$ , среднеквадратические погрешности  $\sigma_{GCM}=0.8\%$ ,  $\sigma_{DC}=1.1\%$ .

Полученные оценки показывают, что увеличение средней по бассейну нормы температуры воздуха на  $1^\circ\text{C}$  приводит к уменьшению нормы годового стока р. Амур примерно на 9% при использовании на входе гидрологической модели данных GCMs и на 13% при использовании измененных фактических данных (DC-метод). Причина уменьшения стока – рост рассчитанного испарения с поверхности бассейна с увеличением упругости насыщения водяного пара, сопровождающим рост температуры воздуха. Увеличение средней по бассейну климатической суммы осадков на 10% приводит к увеличению рассчитанного по модели среднемноголетнего стока р. Амур на 21% при использовании на входе гидрологической модели данных GCMs и на 23% и использовании измененных фактических данных (DC-метод), т.е. изменения стока примерно в 2 раза превосходят изменения осадков. Можно предположить, что увеличение амплитуды колебаний стока по сравнению с амплитудой колебаний осадков обусловлено сложением эффектов роста осадков и снижения потерь поверхностного стока вследствие дополнительного увлажнения бассейна.

Таким образом, аномалии нормы годового стока р. Амур оказались одинаково (с учетом точности оценки коэффициентов в уравнениях) чувствительны к изменению норм осадков и температуры воздуха при использовании на входе гидрологической модели двух наборов проекций климата в XXI веке: по данным моделей климата и путем линейной трансформации фактических рядов наблюдений (DC-метод). Иными словами, два набора проекций климата одинаковы, если сравнивать их по среднемноголетнему отклику гидрологической системы бассейна р. Амур на эти проекции. При этом второй набор проекций, заданных по фактическим рядам наблюдений, обладает существенно меньшей модельной неопределенностью, так как различия между моделями климата в оценках климатических норм (используемых для линейной трансформации этих рядов) меньше, чем различия в оценках других климатических параметров (сезонной и межгодовой изменчивости, ковариаций и др.). Использование климатических проекций, характеризующихся меньшей модельной неопределенностью, позволяет повысить устойчивость оценок гидрологических последствий изменения климата в бассейне Амура, рассчитанных с помощью региональной гидрологической модели.

### Литература

1. Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. М.: ГЕОС, 2011. 660 с.
2. Мохов И.И. Гидрологические аномалии и тенденции изменения в бассейне реки Амур в условиях глобального потепления // Доклады академии наук. 2014. Т. 455. № 5. С. 585–588.
3. Nohara D., Kitoh A., Masahiro H., Oki T. Impact of climate change on river discharge projected by multimodel ensemble // J. of Hydrometeorology. V. 7. 2006. P. 1076–1089.
4. Kundzewicz Z.W., Stakhiv E.Z. Are climate models «ready for prime time» in wa-

ter resources management applications, or is more research needed? // *Hydrol. Sci. J.* 2010. V. 55(7). P. 1085–1089.

5. *Gelfan A., Motovilov Y., Krylenko I., Moreido V., Zakharova E.* Testing the robustness of the physically-based ECOMAG model with respect to changing conditions // *Hydrol. Sci. J.* 2015. V. 60(7,8). P. 1266–1285.

6. *Гельфан А.Н.* О проблеме валидации гидрологической модели для диагностических задач. (См. настоящий сборник).

7. *Калугин А.С.* Разработка модели формирования стока реки Амур на базе информационно-моделирующего комплекса ECOMAG // Сб. тр. Всеросс. науч. конф. «Научное обеспечение реализации Водной стратегии РФ на период до 2020 г.». Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2015. Т. 1. С. 149–155.

8. *Данилов-Данильян В.И., Гельфан А.Н., Мотовилов Ю.Г., Калугин А.С.* Катастрофическое наводнение 2013 года в бассейне реки Амур: условия формирования, оценка повторяемости, результаты моделирования // *Водные ресурсы.* 2014. Т. 41. № 2. С. 111–122.

9. *Мотовилов Ю.Г., Данилов-Данильян В.И., Дод Е.В., Калугин А.С.* Оценка противопаводкового эффекта действующих и планируемых водохранилищ в бассейне Среднего Амура на основе физико-математических гидрологических моделей // *Водные ресурсы.* 2015. Т. 42. № 5. С. 476–491.

10. *Калугин А.С.* Модель формирования стока реки Амур и ее применение для оценки возможных изменений водного режима. Дисс. канд. геогр. наук: 25.00.27. М.: ИВП РАН, 2016. 185 с.

11. *Кучмент Л.С., Мотовилов Ю.Г., Назаров Н.А.* Чувствительность гидрологических систем. М.: Наука, 1990. 143 с.