

## Анализ стока сибирских рек в XXI в.

В.И. Кузин, Н.А. Лаптева\*

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН  
630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6*

Поступила в редакцию 20.01.2016 г.

Обсуждаются результаты анализа гидрологических входных данных для модели стока рек Сибирского региона для XXI в. Анализ проводился на данных расчетов по моделям INM, CNRM, GFDL, MIROC5 и HadGEM по сценарию RCP 8.5 проекта CMIP5 МГЭИК. Расчеты показывают положительный тренд в течение века для всех моделей. Эти данные использовались при расчетах речного стока от сибирских рек в Северный Ледовитый Океан. Расчеты речного стока в соответствии с данными также дают положительный тренд при разнице в значениях стока.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, климатический речной сток, бассейны рек Сибири; mathematical modeling, hydrological data, climatic river runoff, Siberia rivers basins.

### Введение

Гидрологическая компонента климатической системы Земли в большой степени связана с гидрологией Арктики и ее ключевой части – Северного Ледовитого океана (СЛО), содержащего по оценкам [1], в среднем около 84 тыс. км<sup>3</sup> пресной воды, влияющей на ледовый режим и термохалинную структуру бассейна. Однако роль пресной воды СЛО не ограничивается региональным воздействием. В качестве примера роли СЛО в климатической системе Земли можно привести возникновение в 60-х, 70-х гг. положительной аномалии солености [2, 3]. Аномалия оказала влияние на интенсивность глубокой конвекции в Северной Атлантике, что привело к изменению режима меридиональной термохалинной циркуляции всего Мирового океана. В связи с этим интерес к гидрологическим процессам в Арктике в последние десятилетия значительно возрос.

Существенным источником притока пресной воды в СЛО является речной сток. Оценки, приведенные в работе [1], составляют 54% всего притока пресной воды, поступающей в бассейн в год. Из этого объема реки Сибири дают порядка 2,24 тыс. км<sup>3</sup>, что составляет 70% от всего речного стока [1, 4]. Наибольшую величину стока в сумме около 1500 км<sup>3</sup> дают такие реки, как Обь, Енисей и Лена [5]. Моделирование речного стока для этих рек во второй половине XX в. было проведено в работах [6, 7]. По данным, приведенным в R-ArcticNET (<http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html>), среднее значение стока остальных рек Сибири составляет около 382 км<sup>3</sup> в год, что дает достаточно зна-

чимые притоки пресной воды в арктические моря СЛО и требует учета. Коэффициент отношения речного стока к осадкам варьируется в зависимости от характера подстилающей поверхности бассейнов рек. Для Оби в связи с наличием обширных болотных массивов и интенсивного испарения он составляет 0,24–0,26. Для Енисея и Лены с обширными массивами многолетней мерзлоты – 0,42–0,48 и 0,46–0,55 соответственно [8, 9]. Для остальных рек Восточной Сибири в связи с почти сплошным распространением зон многолетней мерзлоты в бассейнах он еще выше.

Из анализа данных R-ArcticNET следует, что суммарный годовой сток сибирских рек претерпевает существенные изменения. Для отдельных рек он составляет 30–40%, достигая для восточно-сибирских рек до 60%. При этом в гидрологических характеристиках сибирских рек в последние десятилетия наблюдаются устойчивые положительные тренды [10], связанные, по-видимому, с глобальными климатическими изменениями, что приводит к изменениям в балансе пресной воды в СЛО [11] и требует отдельных исследований.

Наряду с анализом изменений гидрологической составляющей климатической системы Сибири в XX в. [7], полученных на основе данных реанализа MERRA, была рассмотрена проекция изменений речного стока Сибири в XXI в., представленных в работах [12, 13], на основе результатов моделей Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Были получены устойчивые положительные тренды речного стока. Однако для выяснения причин развития этих процессов требуется более детальное рассмотрение.

Настоящая статья продолжает анализ отдельных аспектов проблемы климатических изменений стока

\* Виктор Иванович Кузин (kuzin@sscc.ru); Наталья Александровна Лаптева (lapteva@vector.nsc.ru).

сибирских рек в XXI в. Для выяснения источников изменения речного стока проводится анализ гидрологических характеристик поверхности бассейнов рек Сибири для различных моделей. Для анализа причин изменчивости гидрологических характеристик в течение столетия рассматривается связь индексов атмосферной циркуляции с результатами анализа влагонаполнения по моделям. В завершение приводятся результаты расчетов речного стока сибирских рек в СЛО.

## Результаты моделирования

Используемая для расчетов модель речного стока ИВМиМГ СО РАН является линейной резервуарной моделью типа Калинина–Миллюкова [14]. Весь поток разделяется на три составляющих. Поверхностный, грунтовый и речной стоки определяются на основе решения уравнений модели, сведенных к интегралам свертки (Дюамеля). Конкретная форма модели представлена в работах [6, 15].

При проведении численных экспериментов было выбрано разрешение  $1/3^\circ$  по широте и долготе соответственно. Модель покрывает Сибирский регион по долготе от Урала до Дальнего Востока и по широте от Монголии до Северного Ледовитого океана. В настоящей работе в модели учитывались бассейны таких рек, дающих приток в Карское море, как Обь, Енисей, Пур, Таз, а также субарктических восточно-сибирских рек, дающих приток в море Лаптевых и Восточно-Сибирское море: Хатанга, Анабар, Оленек, Яна, Индигирка, Колыма. Сток крупнейшей в Восточной Сибири р. Лены, с учетом притоков через пять наиболее крупных протоков из дельты в море Лаптевых [16], также был включен в общий сток.

Для указанных бассейнов были сделаны численные расчеты по моделированию стока рек для периода 2016–2100 гг. на основе данных атмосферных характеристик по результатам расчетов шести моделей, участвующих в проекте CMIP5 сценария RCP 8.5. Были выбраны модели INM (Россия), CNRM (Франция), GFDL (США), MIROC5 (Япония), MPI-ESM (Германия) и HadGEM2 (Великобритания). Данные представлены в базах данных МГЭИК ([cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5](http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5)). Предварительно для верификации модели речного стока [7] был проведен анализ данных по изменению климатических и гидрологических характеристик бассейнов и стока из бассейнов рек Сибири во второй половине XX в. на основе данных реанализа MERRA. Результаты расчетов сравнивались с климатическими данными наблюдений для XX в. (R-ArcticNET). Амплитуды и периоды наступления половодья совпали для всех бассейнов рек. Полученные результаты показали достаточную адекватность модели для расчетов климатических стоков рек Сибири.

Для XXI в. на первом этапе было проанализировано влагонаполнение поверхности речных бассейнов для притока в различные моря Западной

и Восточной Сибири, состоящее из жидких осадков, испарения и воды от таяния снега.

Результаты показывают устойчивые положительные тренды влагонаполнения для всех моделей (рис. 1), что в результате приводит к росту стоков в XXI в. Графики показывают наименьшие значения для модели HadGEM и дальше по возрастанию GFDL, MIROC5, CNRM, INM вплоть до наибольшего значения для модели MPI-ESM. Наибольший тренд увеличения наблюдается для данных по модели MPI-ESM. Более слабый рост при близких по наклону трендах дают модели GFDL, CNRM, HadGEM и MIROC5. Наименьшее увеличение дает модель INM.

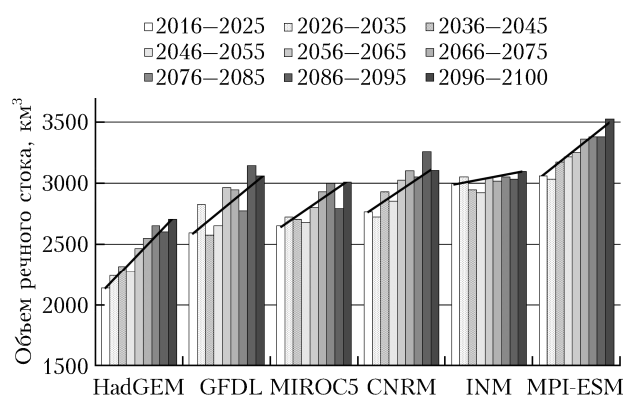


Рис. 1. Влагонаполнение по шести моделям МГЭИК, осредненное по десятилетиям

Анализ показал, что наибольший вклад в увеличение гидрологических характеристик, формирующих сток, дают сезоны зима и осень при умеренном росте весной. Летний период характеризуется отрицательным трендом.

В то же время внутри выбранного периода имеются колебания с периодами порядка нескольких десятилетий. Существует гипотеза о связи этих колебаний с индексом Арктической осцилляции (АО) [17, 18]. Для ее проверки были построены индексы АО для трех моделей: MIROC5, CNRM и INM. На рис. 2 представлены графики суммарного для всех бассейнов влагонаполнения для каждой из выбранных моделей, осредненного по десяти годам с наложенными на график индексами АО для периода 2016–2100 гг. Проведенный корреляционный анализ для этих характеристик, осредненных по десятилетиям, дает значение коэффициента корреляции 0,83; 0,69; 0,5 для MIROC5, CNRM и INM соответственно, что свидетельствует о достаточной обоснованности используемой гипотезы. Следующим этапом был расчет речных стоков в XXI в. для одиннадцати рек по модели стока. В значениях расходов также наблюдается устойчивый положительный тренд в течение столетия.

На рис. 3 представлены речные стоки в бассейн СЛО, рассчитанные по анализируемым входным данным. Можно заметить очевидное соответствие стоков влагонаполнению, что является вполне естественным следствием.

## Заклучение

Проанализированы гидрологические характеристики речных бассейнов Сибири для периода 2016–2100 гг. Результаты показывают положительный тренд влагонаполнения в течение всего столетия. В то же время внутри исследуемого периода существуют колебания с периодом в несколько десятков лет. Для выяснения причин этих колебаний была предложена гипотеза о связи их с изменениями индекса Арктической осцилляции в модели. Корреляционный анализ показал, что для выбранных моделей эта корреляция в достаточной степени существует, что дает основание поддерживать выдвинутую гипотезу. Расчеты речного стока в Северный Ледовитый океан также показывают положительный тренд в течение рассматриваемого периода с колебаниями, соответствующими колебаниям в гидрологических характеристиках поверхности.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-05-00730.

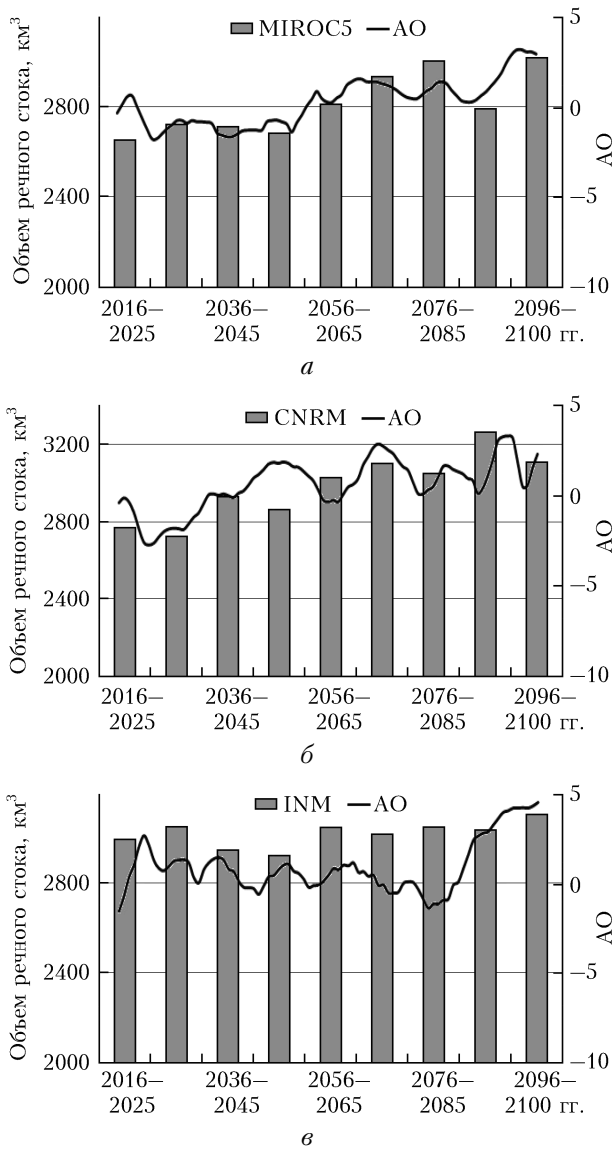


Рис. 2. Баланс между влагонаполнением и индексом Арктической осцилляции для моделей MIROC5 (а), CNRM (б), INM (в)

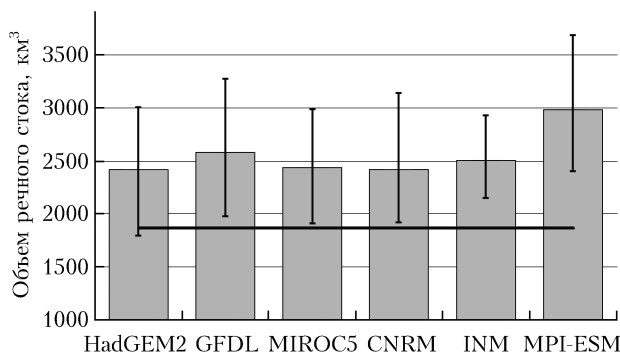


Рис. 3. Речной сток, осредненный за период 2016–2100 гг. Вертикальные линии показывают дисперсию стока, горизонтальная линия обозначает климатический сток в XX в.

1. Serreze M.C., Barrett A.P., Slater A.G., Woodgate R.A., Aagaard K., Lammers R.B., Steele M., Moritz R., Meredith M., Lee C.M. The large-scale freshwater cycle of the Arctic // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. C11010. P. 1–19. DOI: 10.1029/2005JC003424.
2. Dickson R.R., Meincke J., Malmberg S.-A., Lee A.J. The "Great Salinity Anomaly" in the Northern North Atlantic 1968–1982 // *Progr. Oceanogr.* 1988. V. 20. P. 103–151.
3. Ланто С.С. К вопросу о причинах адвекции тепла на север через экватор в Атлантическом океане // Исследование процессов взаимодействия океана и атмосферы. М.: Гидрометеоназдат, 1984. С. 125–129.
4. Aagaard K., Carmack E.C. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation // *J. Geophys. Res.* 1989. V. 94, N 10. P. 14485–14498.
5. Dai A., Trenberth K. Estimates of freshwater discharge from continents: Latitudinal and seasonal variations // *J. Hydrometeorol.* 2002. V. 3, N 6. P. 660–687.
6. Кузин В.И., Лаптева Н.А. Математическое моделирование климатического речного стока из Обь-Иртышского бассейна // *Оптика атмосф. и океана.* 2012. Т. 25, № 6. С. 539–543; Кузин В.И., Лаптева Н.А. Mathematical simulation of climatic river discharge from the Ob-Irtysh basin // *Atmos. Ocean. Opt.* 2012. V. 25, N 6. P. 440–445.
7. Кузин В.И., Лаптева Н.А. Математическое моделирование стока основных рек Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 6. С. 525–529.
8. Бабкин В.И., Постников А.Н. Циклонические осадки и сток Оби и Енисея в маловодные и многоводные годы // *Метеорол. и гидрол.* 2003. № 12. С. 79–85.
9. Berezovskaya S., Yang D., Kane D. Compatibility analysis of precipitation and runoff trends over the large Siberian watersheds // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. L21502. DOI: 10.1029/2004GL121277.
10. Peterson B.J., Holmes R.M., McClelland J.W., Vorosmarty C.J., Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Rahmstorf S. Increasing river discharge to the Arctic Ocean // *Science.* 2002. V. 298. P. 2171–2173.
11. Кузин В.И., Платов Г.А., Голубева Е.Н. Влияние межгодовой изменчивости стока сибирских рек на перераспределение потоков пресной воды в Северном Ле-

- довитом океане и в Северной Атлантике // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2010. Т. 46, № 6. С. 831–845.
12. Кузин В.И., Лантева Н.А. Расчеты стока рек Сибири в XXI в. // Труды междунар. конгресса «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015». СГУГиТ. Т. 1. Новосибирск, 2015. С. 170–174.
  13. Кузин В.И., Платов Г.А., Лантева Н.А. Сток сибирских рек в XXI в. и баланс пресной воды в Арктическом океане // Экология, экономика, информатика. Т. 2. Ростов-на-Дону: Изд-во Южного федерального ун-та, 2015. С. 595–600.
  14. Куммент Л.С. Математическое моделирование речного стока. Л.: Гидрометеониздат, 1972. 190 с.
  15. Hagemann S., Dumenil L. Hydrological discharge model // Techn. report N 17. MPI. Hamburg, 1998. 42 p.
  16. Кузин В.И., Лантева Н.А. Моделирование климатического стока из бассейна р. Лена // Материалы XX Междунар. симп. «Оптика атмосф. и океана. Физика атмосферы» [Электронный ресурс]. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2014. 1 CD-ROM. С. D5-D8.
  17. Thompson D.W., Wallace J.M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // Geophys. Res. Lett. 1998. V. 25, N 9. P. 1297–1230.
  18. Semiletov I.P., Savelieva N.I., Weller G.E. Cause and effect linkages between atmosphere, the Siberian rivers and conditions in the Russian shelf seas // Changes in the Atmosphere-Land-Sea System in the American Arctic. Proceedings of the Arctic Regional Center. Vladivostok, 2002. V. 3. P. 63–97.

**V.I. Kuzin, N.A. Lapteva. Analysis of Siberian rivers runoff in the 21st century.**

The article discusses the results of the analysis of the hydrological input data for the Siberian river runoff model for the XXI century. The data of the INM, CRNM, GFDL, MIROC5, and HadGEM models of the RCP 8.5 scenario of the CMIP5 IPCC Project were used for the analysis. The results show the positive trend for the data for all the models. The data were used for the calculations of the Siberian rivers runoff to the Arctic Ocean. The calculation also gives the positive trend in accordance with the data with some differences in the values.