

РАСЧЕТЫ СТОКА РЕК СИБИРИ В XXI ВЕКЕ

Виктор Иванович Кузин

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, тел. (383)330-64-50, e-mail: kuzin@sscc.ru

Наталья Александровна Лаптева

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, младший научный сотрудник, тел. (383)330-64-50, e-mail: lapteva@vector.nsc.ru

В статье обсуждаются результаты расчетов по линейной резервуарной модели климатический речной сток для Сибирского региона. При верификации модели применялись данные реанализов ERA40 и MERRA для расчета стоков в XX веке. Расчеты для XXI века проводились на данных расчетов по моделям INM, CNRM и GFDL по сценарию RCP 8.5 проекта CMIP5 IPCC.

Ключевые слова: математическое моделирование, климатический речной сток, бассейны рек Обь, Енисей и Лена.

CALCULATION OF THE SIBERIAN RIVERS RUNOFF IN THE XXI CENTURY

Victor I. Kuzin

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentjeva, doctor, Head of the Laboratory, tel. (383)330-64-50, e-mail: kuzin@sscc.ru

Natalya A. Lapteva

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 6 prospect Akademika Lavrentjeva, junior Researcher, tel. (383)330-64-50, e-mail: lapteva@vector.nsc.ru

The article discusses the results of calculations by the linear reservoir model climatic river runoff for the Siberian region. For the verification of the model the ERA40 and MERRA reanalysis data for the XX century were used. For the XXI century calculations by the data of the INM, CRNM, GFDL models of the scenario RCP 8.5 of the Project CMIP5 IPCC were done.

Key words: mathematical modeling, climatic river runoff, Ob, Yenisei and Lena rivers basins.

Введение.

В последние десятилетия неоспоримым фактом стали климатические изменения, происходящие в Арктическом регионе. Важным следствием этих изменений является то, что эти процессы могут привести к откликам в глобальной климатической системе на основе механизмов обратных связей. В существенной степени это относится к гидрологической составляющей климата Арктики и ее важной составляющей Северного Ледовитого океана, содержащего по оцен-

кам [1] в среднем около 84 тыс. куб. км пресной воды. В качестве примера наличия обратной связи в системе Арктики можно привести возникновение в Северном Ледовитом океане в 60-х, 70-х годах прошлого столетия аномалии солености [2], возникшей вследствие колебаний в арктической климатической системе. Распространяясь в северные моря Атлантики, аномалия оказала влияние на интенсивность глубокой конвекции, формирующей глобальный "конвейерный пояс" [3, 4], что привело к изменению режима меридиональной термохалинной циркуляции Мирового океана [5]. Именно поэтому интерес к гидрологическим процессам в Сибири и Арктике в последние десятилетия существенно возрос.

Существенным источником притока пресной воды в Северный Ледовитый океан является речной сток. Оценки, приведенные в работах [1,5] дают значения в среднем 3.2 - 3.3 тыс. куб. км в год, что составляет около 54 % всего притока пресной воды, поступающей в бассейн. Из этого объема крупные реки Сибири дают порядка 1.9 тыс. куб. км в год, что составляет 59% от всего речного стока. Наибольшую величину стока дают такие реки как Обь, Енисей и Лена. Эти реки приносят 46% притока всей речной воды в Северный Ледовитый океан [6,7]. Основываясь на данных, приведенных в R-ArcticNET [<http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html>] суммарный сток для трех рек оценивается величиной 1.5 тыс. куб. км в год. Остальные реки дают среднее значение стока около 381.7 куб. км в год.

Однако, как видно из приведенных оценок и основываясь на данных Гидрометслужбы [8, 9] и данных R-ArcticNET суммарный годовой расход сибирских рек за период второй половины XX века претерпевает существенные межгодовые вариации. Изменения для отдельных рек составляют от 25 до 40%. Существенную роль при этом, как можно предполагать, играет межгодовая климатическая изменчивость атмосферной циркуляции и характеристики поверхности. Для Западной Сибири это связано с особенностями климатических условий: наличием обширных болотных массивов, типами растительности, вследствие чего наблюдается обратный баланс между осадками и эвапотранспирацией [1]. Результирующий речной сток составляет около 24% от всего количества воды, поступающей в бассейн. В отличие от этого, водные запасы рек Восточной Сибири вследствие наличия многолетней мерзлоты пополняются в основном дождевыми и талыми снеговыми водами, которые составляют 44% - 60% от всего поступающего количества воды. Этот факт был учтен при формировании влагозапаса в почве и грунтового стока.

Наряду с межгодовой изменчивостью в гидрологических характеристиках сибирских рек наблюдаются устойчивые положительные тренды [10].

Все эти факты свидетельствуют о том, что влияние изменчивости гидрологических характеристик в Сибирской части Арктики на баланс пресной воды в Северном Ледовитом океане (см., например, [11]) требует дополнительных исследований на основе климатических моделей с расчетом речного стока [12].

Наряду с анализом изменений гидрологической составляющей климатической системы Сибири в XX веке, полученных на основе данных реанализов ERA40 и MERRA, проведенных в работах [13, 14], представляет интерес рас-

смотреть проекцию развития гидрологических характеристик Сибири и, в частности, речного стока в XXI веке.

Настоящая статья посвящена рассмотрению отдельных аспектов проблемы климатических изменений гидрологии Сибири в XXI веке на основе данных расчетов по моделям проекта CMIP5. В ней представлены результаты расчетов, проведенных по климатической модели речного стока ИВМиМГ СО РАН на основе данных результатов моделей INM (Россия), CNRM (Франция) и GFDL (США) для XXI века по сценарию RCP-8.5.

Используемая для расчетов модель речного стока является линейной, резервуарной моделью типа Калинина-Милюкова [15, 16]. Поверхностный, грунтовый и речной сток определяется на основе последовательного решения обыкновенных дифференциальных уравнений, сведенных к интегралам свертки (Дюамеля). Конкретная реализация модели представлена в работах [13, 14, 17]. В модели производится учет процентного содержания болот и озер.

Результаты моделирования.

При проведении численных экспериментов по климатической модели речного стока было выбрано разрешение составляющее $1/3$ градуса по широте и долготе соответственно. Модель речного стока покрывает Сибирский регион по долготе от 50° до 170° в.д. и по широте от 40° до 80° с.ш.. В модели учитывались бассейны рек: Обь - Иртыш, Енисей - Ангара, Лена, Пур, Таз, Хатанга, Анабар, Оленек, Яна, Индигирка, Колыма.

Для указанных бассейнов были сделаны численные расчеты по моделированию стока рек для периода 2006 - 2100 гг. на основе данных атмосферных характеристик по результатам расчетов моделей: INM (ИВМ РАН), CNRM (Meteo-France), GFDL (Princeton, USA), участвующим в проекте CMIP5 сценария RCP-8.5, представленных в базах данных IPCC (cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5). Предварительно был проведен анализ данных по изменению климатических и гидрологических характеристик бассейнов рек Западной и Восточной Сибири в XXI веке. Результаты расчетов речного стока, проведенных по этим данным показывают устойчивые положительные тренды для всех сибирских рек. На рис. 1 представлены графики суммарного годового стока в Северный Ледовитый океан, осредненные по десяти годам, рассчитанные по входным данным трех моделей. Графики показывают наибольшее увеличение стока для данных по модели GFDL. Наименьшее увеличение стока дает модель INM. Результаты расчетов по данным CNRM дает более низкие значения, чем по данным GFDL, с близким по наклону трендом. На рис. 2 представлены среднеклиматические годовые гидрографы суммарного притока пресной воды в Северный Ледовитый океан от сибирских рек. Результаты расчетов сравнивались с климатическими данными наблюдений для XX века. И графиков видно, что увеличение речного стока происходит за счет более раннего наступления половодья, а также вследствие увеличения осадков в летний и осенний сезоны. При этом амплитуда и фаза пика половодья практически не меняется. На рис. 3 представлена межгодовая изменчивость стоков за указанный период. Наибольшая дисперсия стока наблюдается в результатах по модели GFDL, наименьшая - в INM. Взаимная

корреляция между межгодовыми расходами для INM, CNRM и GFDL составляет величину порядка 0.65.

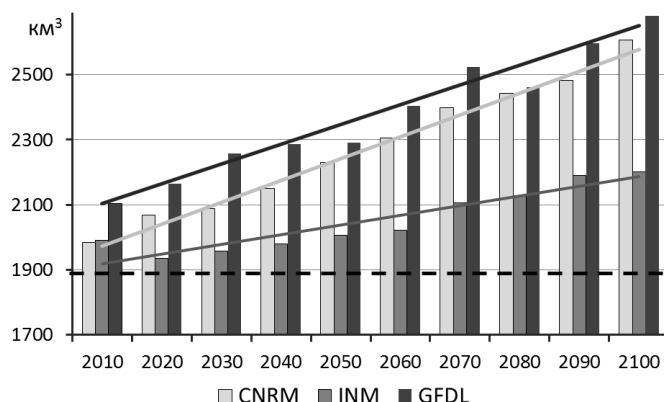


Рис. 1. Суммарный годовой сток в СЛО, осредненный по 10 годам

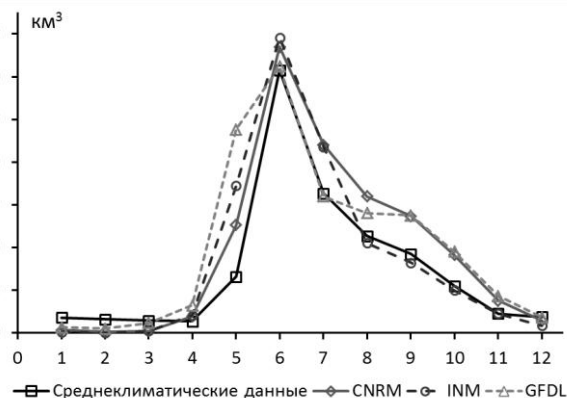


Рис. 2. Среднеклиматические гидрографы притока пресной воды в СЛО

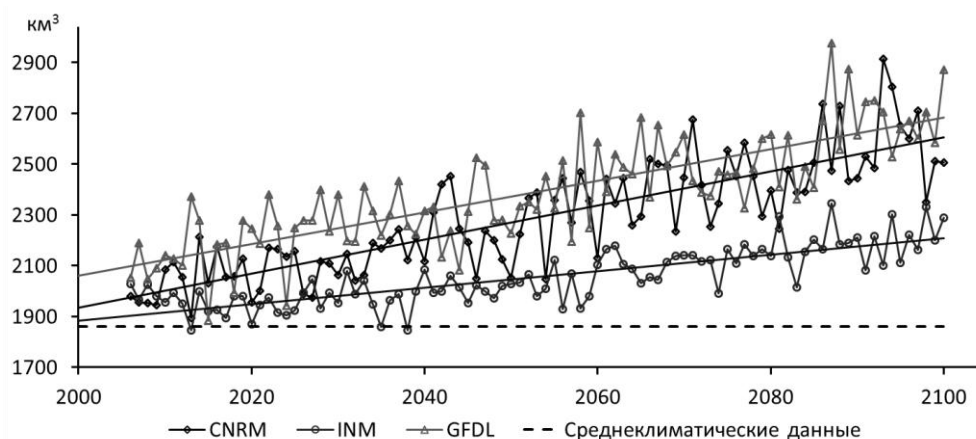


Рис. 3. Межгодовая изменчивость общего стока сибирских рек в СЛО в XXI веке. Сплошной линией представлен линейный тренд стока, пунктирной линией - климатическое значение

Заключение.

В статье представлены результаты по расчету стока Сибирских рек в Северный Ледовитый океан в XXI веке. Предварительная верификация модели, проведенная для второй половины XX века на основе данных реанализов ERA40, MERRA и данных измерений, свидетельствовала о достаточной адекватности модели в описании гидрологических процессов Сибирского региона. Следующим этапом было проведение расчетов на основе проекции климатических изменений по сценарию RCP 8.5 проекта CMIP5 IPCC. В качестве входных данных были выбраны результаты расчетов по моделям INM, CNRM и GFDL. Результаты расчетов показывают устойчивый положительный тренд для всех трех моделей. Наибольший рост притока дает модель GFDL, наименьший - INM. Сток по модели CNRM имеет средние значения при совпадении наклона тренда с трендом GFDL.

Работа выполнена при поддержке программы ОМН РАН 1.3.3-6., Президиума РАН 23.3-1. и гранта РФФИ 14-05-00730.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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 // *Journal of Geophysical Research*. - 2006. - V. 111: C11010. - doi:10.1029/2005JC003424. - P. 1-19.
2. Dickson R.R., Meincke J., Malmberg S.-A., Lee A.J. The "Great Salinity Anomaly" in the Northern North Atlantic 1968-1982 // *Progr. in Oceanogr.* - 1988. - V. 20. - P. 103-151.
3. Лаппо С.С. К вопросу о причинах адвекции тепла на север через экватор в Атлантическом океане // *Исследование процессов взаимодействия океана и атмосферы*. - М.: Московское отделение Гидрометеоздата. - 1984. С. 125-129.
4. Broecker W.S. The great ocean conveyor // *Oceanography*. - 1991. - V.4. - № 2. - P. 79-89.
5. Aagaard K., Carmack E.C. The role of sea ice and other fresh water in the arctic circulation // *J. Geophys. Res.* - 1989. - V. 94. - Issue C10. - P. 14485-14498.
6. Berezovskaya S., Yang D, Kane D.L. Compatibility analysis of precipitation and runoff trends over the large Siberian watersheds // *Geophysical Research Letters*. - 2004. - V. 31. - L21502. doi:10.1029/2004GL121277. - P. 1-4.
7. Shiklomanov I. A., Shiklomanov A.I., Lammers R.B., Peterson B.J., Vorosmarty C.J. The dynamics of river water inflow to the Arctic Ocean // in *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean, Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Tallin, Estonia*. - 2000. - P. 281 – 296.
8. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши - Л.: Гидрометеоздат. - 1985. - Т. 1. - Вып.10. Бассейн Оби. - 616 с. - Вып.12. Бассейн Енисея. - 413 с. - Вып.16. Бассейн Лены. - 455 с.
9. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши 1981-1990 - часть 1. - Т. 1. - Новосибирск, вып.10. - Красноярск, вып.12. - Якутск, вып.16.
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 Ледовитом океане и в Северной Атлантике // *Известия РАН. ФАО*. - 2010. - Т. 46. - № 6. - С. 831–845.
12. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2001: The Scientific Basis; Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC* // Edited by Houghton J.C. et al. Cambridge Univ. Press. New York. - 2001. - 881 p.
13. Кузин В.И., Лаптева Н.А. Математическое моделирование климатического речного стока из Обь-Иртышского бассейна // *Оптика атмосферы и океана*. - 2012. - Т. 25. - № 06. - С. 539–543.
14. Кузин В.И., Лаптева Н.А. Математическое моделирование стока основных рек Сибири // *Оптика атмосферы и океана*. - Т. 27. - № 06. - 2014. - С. 525–529.
15. Кучмент Л.С. Математическое моделирование речного стока. - Л.: Гидрометеоздат, 1972. - 190 с.
16. Бураков Д.А. К оценке параметров линейных моделей стока // *Метеорология и гидрология*. - 1989. - № 10. - С. 89-95.
17. Hagemann S., Dumenil L. Hydrological discharge model // *Technical report No 17, MPI, Hamburg*. - 1998. - 42 p.

© В. И. Кузин, Н. А. Лаптева, 2015