

УДК 551.583+519.6

Математическое моделирование стока основных рек Сибири

В.И. Кузин, Н.А. Лаптева*

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

Поступила в редакцию 28.01.2014 г.

Представлены расчеты по климатической модели речного стока для бассейнов крупнейших рек Сибири: Оби, Енисея и Лены. Разработанная модель является линейной резервуарной моделью, т.е. каждая ячейка модели представлена резервуаром или каскадом резервуаров. Поток воды разделяется на поверхностный, речной и грунтовый стоки, задаваемые климатической моделью поверхности. В качестве исходных данных для численного моделирования речного стока для рр. Обь–Иртыш, Енисей, Лена использовались данные реанализов ERA40 и MERRA. Для сравнения с данными наблюдений были использованы данные измерений на гидрологических станциях Обь – Салехард, Енисей – Игарка и Лена – Кюсюр. Дан анализ результатов проведенных расчетов.

Ключевые слова: математическое моделирование, климатический речной сток, бассейны рр. Обь, Енисей и Лена; mathematical simulation, climatic river runoff, the basins of Ob, Yenisei, and Lena.

Введение

В последние десятилетия очевидным фактом стали существенные климатические изменения в Арктическом регионе. Важно не только то, что это – проявление глобальных изменений, но также то, что эти процессы могут привести к изменениям в климатической системе на основе механизмов обратных связей. В большей степени это относится к гидрологической составляющей климата Сибири и Арктики. В качестве примера обратных связей такого рода можно привести возникновение в Северном Ледовитом океане в 1968–1982 гг. так называемой Большой соленостной аномалии [1] вследствие изменения баланса пресной воды в бассейне.

Распространяясь в северные моря Атлантики, аномалия оказала влияние на интенсивность глубокой конвекции в Лабрадорском и Гренландском морях. Тем самым это привело к изменению режима глобального «конвейерного пояса» [2, 3], т.е. меридиональной циркуляции всего Мирового океана. Именно поэтому в последние десятилетия существенно растет интерес к гидрологическим процессам в Арктике, и в частности, в Северном Ледовитом океане. Составляя 5% всей площади Мирового океана (14,2 млн. км²) [4] и 1% от всего объема, Северный Ледовитый океан вносит 11% всей пресной воды в Мировой океан [5], или около 10 тыс. км³ в год [6].

Существенным источником притока пресной воды в Северный Ледовитый океан является речной

сток. Современные оценки [7] дают значение в среднем 3,3 тыс. км³ в год, что формирует около 54% от всего притока пресной воды, поступающей в бассейн. Из этого объема крупные реки Российского Севера дают около 2,24 тыс. км³ в год, что составляет примерно 68% от всего речного стока [7, 8]. Наибольшую величину стока дают такие реки, как Обь, Енисей и Лена, обладающие площадью водосборов 2990, 2580 и 2490 тыс. км². Эти реки приносят около 45% от притока всей речной воды в Северный Ледовитый океан [9]. На основании многолетних данных наблюдений в работе [10] даются статистические оценки со стандартными отклонениями, равные (577 ± 42), (526 ± 63) и (397 ± 61) км³ в устьях Енисея, Лены и Оби соответственно.

Как видно из приведенных оценок и данных Гидрометслужбы [11, 12], суммарный годовой расход Оби, Енисея и Лены за рассматриваемый период с 1936 по 1990 г. претерпевает существенные межгодовые вариации. Изменения для отдельных рек составляют от 25 до 40%. На рис. 1 представлены суммарные годовые расходы рр. Оби, Енисея и Лены с 1936 по 1990 г.

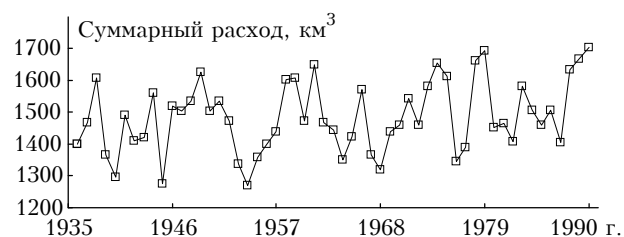


Рис. 1. Суммарные годовые расходы по рр. Обь, Енисей и Лена

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

Из работ [13, 14] следует, что важную роль при этом играет межгодовая климатическая изменчивость атмосферной циркуляции и характеристик поверхности. Однако прямая корреляция между ними для летнего и осеннего сезонов, по нашим расчетам, не достигает величины больше 0,6 со сдвигом в 1–2 мес. Разница, возможно, связана с вариациями испарения и типами поверхности, в результате чего сток по сравнению с осадками имеет коэффициент 0,24–0,26 для бассейна р. Обь. Для Западной Сибири это связано с особенностями климатических условий: наличием обширных болотных массивов, типами растительности и достаточно малым присутствием многолетней мерзлоты. Для рек Восточной Сибири вследствие увеличения площади, покрытой многолетней мерзлотой, это отношение увеличивается до 0,42–0,48, 0,46–0,55 по бассейнам рр. Енисей и Лена соответственно [15, 16].

Кроме межгодовой изменчивости, в гидрологических характеристиках сибирских рек наблюдаются устойчивые тренды. Так, в последние десятилетия в Арктике отмечается рост речного стока [16–19]. Беспрецедентным и необъясненным до сих пор является повышение речного стока в Арктику в 2007 г. [20].

Все эти факты свидетельствуют о том, что влияние изменчивости баланса пресной воды в Арктике на климатическую систему может быть существенным и требует изучения на основе климатических моделей, включающих гидрологическую составляющую с моделированием речного стока [21–23].

Климатическая модель речного стока

Разработанная модель составлена из линейных резервуаров в ячейках сетки. Это означает, что скорость стока из ячейки линейно зависит от притока, пропорциональна наклону в ячейке и обратно пропорциональна расстоянию между центрами ячеек. Скорость изменения стока из ячейки или из каскада ячеек в простейшем варианте модели Калинина–Милюкова [24, 25] определяется на основе последовательного решения обыкновенных диффе-

ренциальных уравнений, сведенных к интегралам свертки (интеграл Дюамеля). В конкретной реализации модели поток воды на суше разделяется на три составляющие: поверхностный, грунтовый и речной стоки. Поверхностный и грунтовый стоки представляют собой единичные ячейки, а речной сток имеет вид каскадов ячеек. Количество каскадов для каждой ячейки в руслах рек определяется на основе полинома регрессии второго порядка по величине коэффициента задержки, который для ячейки принимается постоянным. Каждая элементарная ячейка модели имеет 8 возможных направлений стока в соседние ячейки – четыре по координатных географических направления: С, В, Ю, З и четыре диагональных направления: СВ, ЮВ, ЮЗ, СЗ, определяемых наклоном рельефа однозначным образом. Для каждой ячейки производится учет процентного содержания болот и озер [26–28].

Результаты моделирования

При проведении численных экспериментов по климатической модели речного стока было выбрано разрешение, соответствующее разрешению в региональной климатической модели ИВМиМГ СО РАН и составляющее 1/3 град по широте и долготе соответственно. Модель речного стока покрывает Сибирский регион по долготе от Урала до Дальнего Востока (50–150° в.д.) и по широте от Северного Казахстана до Северного Ледовитого океана (40–80° с.ш.). В модели учитывались бассейны рр. Обь–Иртыш, Пур, Ангара–Енисей, Лена, Индигирка, Колыма, Анадырь, Амур.

В настоящей статье представлены результаты расчетов по модели климатического речного стока в бассейнах рр. Обь–Иртыш, Енисей, Лена. Направление речного, поверхностного и грунтового стоков формировалось с использованием данных по рельефу и на основе анализа графов стоков по поверхности и в речном русле. На рис. 2 приведен пример построенного графа стоков Обь–Иртышского бассейна.

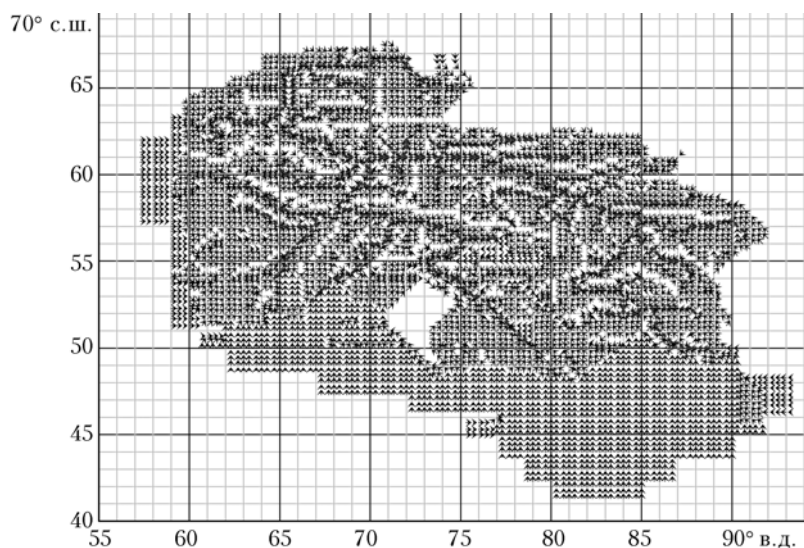


Рис. 2. Трассы стоков Обь–Иртышского бассейна. Светлое поле – бессточный бассейн озера Чаны

По оценкам гидрологов, водные запасы р. Обь пополняются в основном дождевыми, тальными снеговыми, а также грунтовыми и болотными водами, из которых результирующий речной сток составляет около 24% от всего количества воды, попадающей в бассейн. В отличие от этого водные запасы рр. Енисей и Лены пополняются в основном дождевыми и тальными снеговыми водами, которые в среднем составляют 44 и 46% от всего поступающего количества воды соответственно. Этот факт был учтен при формировании влагозапаса в почве и грунтового стока.

Были проведены анализ данных по изменению климатических и гидрологических характеристик бассейнов рек во второй половине XX в. и численные расчеты по моделированию межгодовой изменчивости стока рр. Обь, Енисей, Лена на основе данных реанализов ECMWF/ERA40 для периода 1958–2001 гг. и GMAO/MERRA для периода 1980–2011 гг. Результаты расчетов сравнивались с данными наблюдений на гидрологических постах Обь–Салехард, Енисей–Игарка, Лена–Кюсюр для периода 1936–1990 гг.

Результат расчетов в сравнении с гидрологическими данными на створах для среднеклиматического годового стока (рис. 3) дает отличие в амплитуде для данных реанализов, представленных в таблице.

Река	Полный сток, %		Максимальная амплитуда, %		Корреляция годовых стоков	
	ERA-40	MERRA	ERA-40	MERRA	Данные ERA-40	Данные MERRA
Обь	-0,03	-0,5	0,09	4,2	0,57	0,49
Енисей	2,37	11,2	-6,1	-3,7	0,21	-0,31
Лена	5,8	10,4	6,7	6,4	0,39	0,51

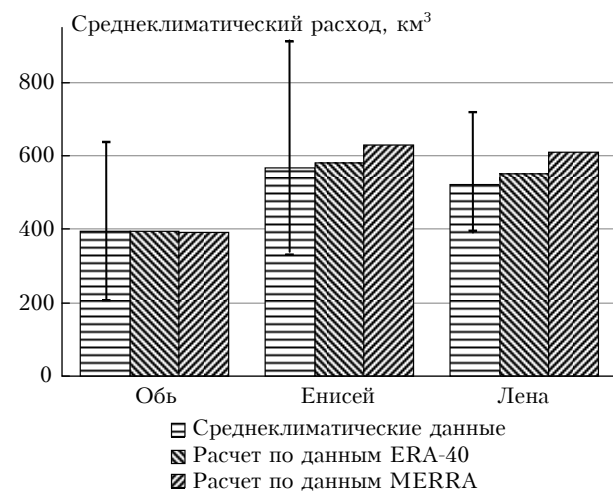


Рис. 3. Среднеклиматические годовые расходы. Вертикальные линии – амплитуда межгодовой изменчивости в данных наблюдений

Рассчитанные климатические годовые гидрографы, представленные на рис. 4, имеют достаточное совпадение в амплитуде и фазе максимальных значений стока (см. таблицу).

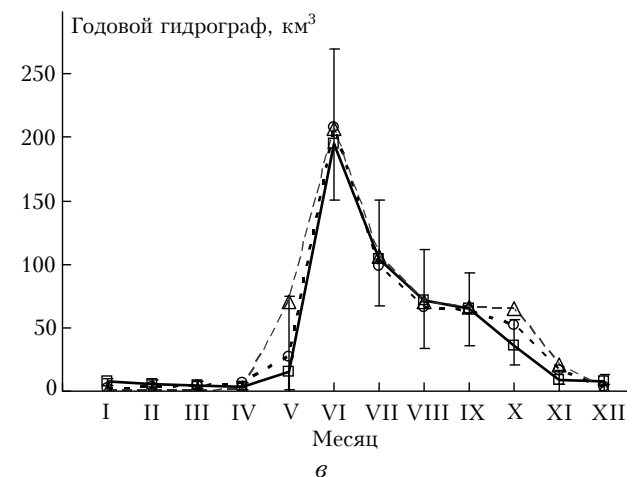
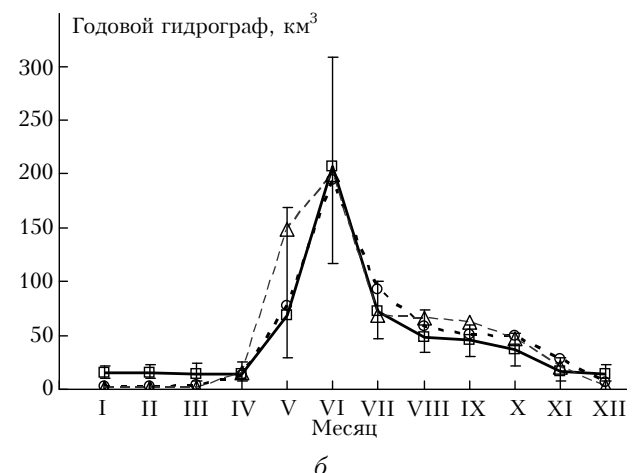
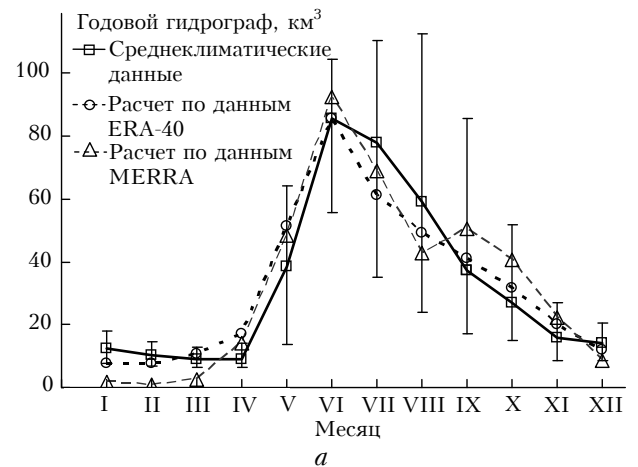


Рис. 4. Годовые гидрографы: р. Обь (а), р. Енисей (б), р. Лена (в). Вертикальные линии – амплитуды межгодовой изменчивости месячных стоков

На рис. 5 представлен пример годовых стоков в исследуемых периодах для р. Обь. Можно отметить достаточно хорошее совпадение по амплитуде межгодовых вариаций. В то же время фазы колебаний имеют отличия. Для оценки величины этих отклонений рассчитаны корреляции для годового стока между гидрологическими данными на створах и данными реанализов для соответствующих периодов (см. таблицу).

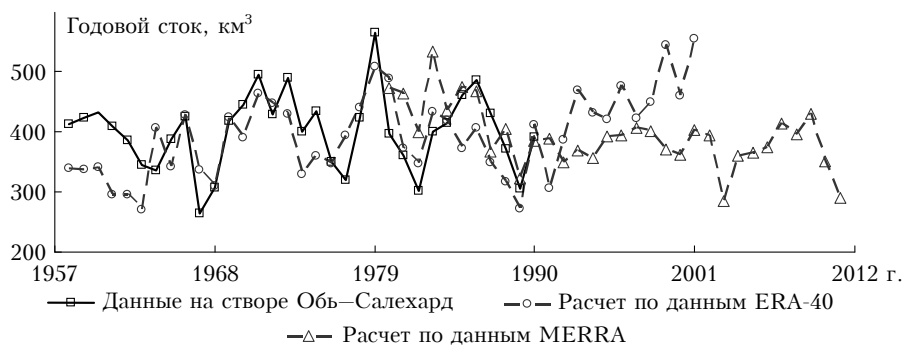


Рис. 5. Годовые стоки по данным наблюдений на створе Обь–Салехард и результаты расчетов по данным ERA-40 и MERRA

Следует отметить очень низкую корреляцию для р. Енисей, что может быть связано с зарегулированностью бассейна, не учитываемой в модели.

Заключение

Роль стока сибирских рек в глобальном гидрологическом цикле весьма значима вследствие существенного притока пресной воды из Арктического бассейна, которая контролирует меридиональную термохалинную циркуляцию в Мировом океане. Для моделирования речного стока сибирских рек разработана линейная резервуарная модель климатического речного стока. Результаты моделирования стока для рр. Обь, Енисей, Лена, проведенного на основе данных реанализов ERA-40, MERRA, дают достаточно хорошее соответствие годовых климатических стоков с наблюдениями. Среднеклиматические годовые гидрографы имеют достаточное совпадение в амплитуде и фазе для максимальных значений стока, в особенности для реанализа ERA-40. Распределение годовых стоков для выбранного периода характеризуется различиями для дисперсий и взаимных корреляций, в особенности для р. Енисей.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-05-00730, ИП СО РАН 69, 109.

- 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.
- Lanno C.C. К вопросу о причинах адвекции тепла на север через экватор в Атлантическом океане // Исследование процессов взаимодействия океана и атмосферы. М.: Гидрометеоиздат, 1984. С. 125–129.
- Broecker W.S. The great ocean conveyor // *Oceanography*. 1991. V. 4/2. P. 79–89.
- Иванов В.В. Водный баланс и водные ресурсы Арктического региона // Труды АНИИ. 1976. Т. 323. С. 4–24.
- Калинин Г.П., Шикломанов И.А. Использование водных ресурсов Земли // Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли. Л.: Гидрометиздат, 1974. С. 575–606.
- Атлас Мирового океана / Под ред. С.Г. Горшкова. 1983. Т. 3. N.Y.: Pergamon. 189 с.
- Aagaard K., Carmack E.C. The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation // *Geophys. Res. C.* 1989. V. 94, N 10. P. 14485–14498.
- 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.
- Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.I., Lamers R.B., Peterson B.J., Vorosmarty C.J. The dynamics of river water inflow to the Arctic Ocean // Proc. NATO Advanced Research Workshop on the Freshwater Budget of the Arctic Ocean. Tallin, Estonia, 2000. P. 281–296.
- Dai A., Trenberth K. Estimates of freshwater discharge from continents: Latitudinal and seasonal variations // *J. Hydrometeorol.* 2002. V. 3. P. 660–687.
- Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Л.: Гидрометеоиздат, 1985. Т. 1, вып. 10, 12 и 16.
- Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши 1981–1990. Часть 1. Т. 1. Новосибирск, вып. 10; Красноярск, вып. 12; Якутск, вып. 16.
- Thompson D.W.J., Wallace J.M. Annular modes in extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability // *J. Climate*. 2000. V. 15. P. 1000–1016.
- Thompson D.W.J., Wallace J.M., Hegerl G.C. Annular modes in extratropical circulation. Part II: Trends // *J. Climate*. 2000. V. 13. P. 1018–1036.
- 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.
- Berezovskaya S., Yang D., Kane D. Compatibility analysis of precipitation and runoff trends over the large Siberian watersheds // *Geophys. Res. Lett.* 2004. V. 31. DOI: 10.1029/2004GL121277.
- Peterson B.J., Holmes R.M., McClelland J.W., Vorosmarty C.J., Shiklomanov I.A., Shiklomanov A.I., Lamers R.B., Rahmstorf S. Increasing river discharge to the Arctic Ocean // *Science*. 2002. V. 298. P. 2171–2173.
- Yang D., Kane D.L., Hinzman L.D., Zhang X., Zhang T., Ye H. Siberian Lena River hydrologic regime and recent change // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107, N 23. 4694. DOI: 10.1029/202JD002542.
- McClelland J.W., Holmes R.M., Peterson B.J., Stieglitz M. Increasing river discharge in the Eurasian Arctic: Consideration of dams, permafrost thaw, and fires as potential agents of change // *J. Geophys. Res. D.* 2004. V. 109, N 18102. DOI: 10.1029/2004JD004583.
- Shiklomanov A.I., Lamers R.B. Record Russian river discharge in 2007 and the limits of analysis // *Environ. Res. Lett.* 2009. V. 4. DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045015.
- 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 // Ed. by J.C. Houghton et al. N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2001. 881 p.

22. 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 // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2010. Т. 46, № 6. С. 831–845.
23. Дымников В.П., Лыкосов В.Н., Володин Е.М. Проблемы моделирования климата и его изменений // Изв. РАН. Физ. атмосфер. и океана. 2006. Т. 42, № 5. С. 618–636.
24. Кучмент Л.С. Математическое моделирование речного стока. Л.: Гидрометеоздат, 1972. 190 с.
25. Бураков Д.А. К оценке параметров линейных моделей стока // Метеорол. и гидрол. 1989. № 10. С. 89–95.
26. Hagemann S., Dumenil L. Hydrological discharge model // Techn. Report N 17. MPI. Hamburg, 1998. 42 p.
27. Кузин В.И., Лаптева Н.А. Моделирование климатического речного стока для Сибирского региона // Труды IV Междунар. конгресса «ГЕО-Сибирь-2008». Новосибирск: СГГА, 2008. С. 65–70.
28. Кузин В.И., Лаптева Н.А. Математическое моделирование климатического речного стока из Обь-Иртышского бассейна // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 539–543.

V.I. Kuzin, N.A. Lapteva. Mathematical simulation of runoff of main Siberian rivers.

The paper presents a climatic discharge model for the greatest Siberian Rivers: Ob, Yenisei, and Lena. The model in use is a linear reservoir model, i.e., each cell of the model is a reservoir or cascade of reservoirs. The flow of water is divided into surface runoff, river flow, and groundwater flow, defined by the climatic model of the surface. As the initial data for the numerical simulation of river runoff for the Ob–Irtysh, Yenisei, and Lena, the ERA40 and MERRA reanalysis data were used. For the comparison with observational data, the measurements at the hydrological stations Ob–Salekhard, Yenisey–Igarka, and Lena–Kysusyur were used. The analysis of the numerical simulations results is presented in the paper.