

УДК 551.583+519.6

Математическое моделирование климатического речного стока из Обь-Иртышского бассейна

В.И. Кузин, Н.А. Лаптева*

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

Поступила в редакцию 27.01.2012 г.

Представлена климатическая модель речного стока с разрешением $1/3$ град. Модель является линейной резервуарной моделью, т.е. ячейка модели представляет собой резервуар или каскад резервуаров, скорость стока из которых линейно зависит от притока и наклона ячеек и обратно пропорциональна расстоянию между ячейкам. Поток воды разделяется на поверхностный сток, речной сток и грунтовый сток, задаваемый климатической моделью поверхности. В модели производится учет влияния болот и озер в зависимости от процентного содержания в ячейке. Сибирский регион в модели разбит на 8 основных водосборных бассейнов, включающих Обь-Иртыш, Пур, Енисей, Лену, Анадырь, Индигирку, Колыму, Амур. Для расчетов использовались данные реанализа NCEP/NCAR для Обь-Иртышского бассейна Западной Сибири. Контрольные данные о стоках рек взяты из результатов измерений на гидрологической станции Обь-Салехард.

Ключевые слова: математическое моделирование, климатический речной сток, бассейн реки Оби; mathematical modeling, climatic river runoff, Ob river basin.

Введение

В гидрологической составляющей климатической системы важную роль играет Арктика. Интерес к гидрологическим процессам в Арктике и, в частности, в Северном Ледовитом океане в последние десятилетия существенно увеличивается. Составляя 5% всей площади Мирового океана ($14,2$ млн км^2) [1] и 1% от всего объема, Северный Ледовитый океан вносит 11% всей пресной воды в Мировой океан [2], около 10 тыс. км^3 в год [3].

Важным источником притока пресной воды в Северный Ледовитый океан является речной сток. Первые оценки речного притока в Арктику были даны в работах [4, 5]. Современные оценки [6, 7] дают значение около 3,2 тыс. км^3 в год, что составляет примерно около 56% по сравнению с притоком через Берингов пролив. Из этого объема крупные реки российского Севера дают около 2,24 тыс. км^3 в год, что равно примерно 70% от всего речного стока [6]. Наибольшую величину стока дают такие реки, как Енисей, Лена и Обь, имеющие годовой сток 603, 530 и 520 км^3 , что соответствует 45% притока всей пресной воды в Северный Ледовитый океан [2].

Следует, однако, отметить, что оценки годового климатического речного стока имеют вариации в значениях, приводимых в литературе. Результаты работы [8] на основе данных по гидрологическим станциям дают статистические оценки со стандарт-

ными отклонениями, равные (577 ± 42) , (526 ± 63) и (397 ± 61) км^3 в устьях Енисея, Лены и Оби соответственно.

Указанные выше значения годового стока являются осредненными за период в несколько десятилетий. По данным Гидрометслужбы [9, 10], суммарный годовой расход Енисея, Лены и Оби за рассматриваемый период с 1936 по 1990 г. претерпевает существенные межгодовые вариации. Изменения составляют от 25 до 30%. На рис. 1 представлены годовые стоки р. Оби с 1936 по 1990 г.

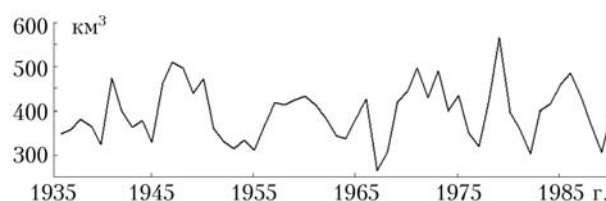


Рис. 1. Годовые расходы на створе Обь-Салехард, км^3

По-видимому, как следует из работ [11–13], важную роль при этом играет межгодовая климатическая изменчивость атмосферной циркуляции и характеристик поверхности. Однако прямая корреляция между этими процессами для летнего и осеннего сезонов, по нашим расчетам, не достигает более 0,6 со сдвигом 1–2 мес. Разница, возможно, связана с вариациями испарения, в результате которого сток по сравнению с осадками в среднем имеет коэффициент 0,4 [14, 15]. Для корректного расчета расходов весеннего половодья необходимо подключение дополнительных предикторов, таких как, например,

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

осенняя увлажненность почвы, влияющая существенным образом на распределение талых вод [16].

Кроме межгодовой изменчивости, в гидрологических характеристиках сибирских рек наблюдаются устойчивые тренды, вызывающие в последние годы повышенный интерес исследователей, так как это является отражением трендов в общей климатической системе и может продуцировать обратные связи. Так, в последние десятилетия в Арктике наблюдается рост речного стока [17–20]. Беспрецедентным явилось повышение речного стока в Арктику в 2007 г. [21].

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 модели речного стока [22, 23], поскольку метод математического моделирования в настоящее время является одним из наиболее эффективных инструментов исследования климатической системы Земли [24].

В настоящей статье рассматривается климатическая резервуарная модель речного стока, разрабатываемая для региональной климатической модели Сибирского региона, и обсуждаются результаты расчетов, проведенных на основе гидрологических данных реанализа NCEP/NCAR для Обь-Иртышского бассейна, обладающего наибольшим водосбором из всех рек Азии, составляющим $2,99 \cdot 10^6$ км².

Климатическая модель речного стока

Разрабатываемая модель является линейной резервуарной моделью. Она 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 каскада ячеек в простейшем варианте модели Калинина–Милокова [16, 25] определяется на основе решения последовательности обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$k \frac{dQ(t)}{dt} = I(t) - Q(t), \quad (1)$$

где k – коэффициент времени задержки для ячейки; $I(t)$ – приток в ячейку; $Q(t)$ – сток из ячейки. Для каскада из n ячеек решается система из n уравнений, связывающих притоки и стоки из последовательных ячеек:

$$k \frac{dQ_i(t)}{dt} = I_i(t) - Q_i(t), \quad i = 1, \dots, n; \quad (2)$$

$$Q_i = I_{i+1}; \quad I_1 = I(t); \quad Q_n = Q(t).$$

Решение линейных дифференциальных уравнений вида (1), (2) относительно расхода $Q(t)$ может осуществляться различным образом: в виде интеграла свертки, методом конечных разностей [26] либо интегрированием при условии $I(t) = \text{const}$ в течение расчетного интервала.

Общим решением линейных уравнений типа (1) при нулевых начальных условиях является интеграл свертки (Дюамеля):

$$Q(t) = \int_0^t I(\tau) h(t - \tau) d\tau. \quad (3)$$

Здесь $h(t)$ – функция влияния линейной системы («кривая добегаания» в российской гидрологической терминологии). Эта функция может трактоваться как плотность распределения времени добегаания элементарных объемов по русловой сети бассейнов. В простейшем варианте одной ячейки она имеет вид

$$h(t) = \frac{1}{k} \exp(-t/k). \quad (4)$$

Для каскада из n резервуаров кривая добегаания имеет вид, аналогичный дискретному представлению гамма-распределения:

$$h(t) = \frac{t^{n-1}}{k^n (n-1)!} \exp(-t/k), \quad (5)$$

где k – коэффициент задержки для каждой ячейки.

В конкретной реализации модели будем использовать структуру, предложенную в Институте Макса Планка в Гамбурге [25].

В этом подходе поток воды на суше разделяется на три составляющие: поверхностный сток, грунтовый сток, речной сток. Значения коэффициентов задержки для поверхностного и речного стоков определяются по формулам, зависящим от наклона ячейки или от перепада высот между ячейками, и отнесенного к расстоянию между их центрами. Коэффициент задержки грунтового стока для ячейки принимается постоянным.

Каждая элементарная ячейка модели имеет 8 возможных направлений стока в соседние ячейки – четыре покоординатных географических направления: С, В, Ю, З и четыре диагональных направления: СВ, ЮВ, ЮЗ, СЗ, определяемых наклоном рельефа однозначным образом.

В каждой ячейке производится учет процентного содержания болот и озер.

Эффект болот параметризуется множителем задержки f_W , который влияет на скорость поверхностного и речного стоков в зависимости от процентного содержания болот p_W :

$$f_{W,i} = 1 - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{v_{W,i}}{v_{0,i}} \right) \left(\tanh[4\pi(p_W - p_c)] + 1 \right),$$

где i – число каскадов в ячейке; $v_{W,i}$ соответствует скорости стока из ячейки при 100% покрытии ячейки болотами; p_c – пороговое значения процентного содержания болот в ячейке, равное 50%.

Время задержки в ячейке определяется по формуле

$$k_i = \frac{\Delta x}{f_{W,i} v_{0,i}}; \quad v_{0,i} = \frac{\Delta x}{n_i k_i}, \quad n_i = 1.$$

Этот коэффициент имеет малое влияние на коэффициент задержки при достаточно малом про-

центном содержании болот в ячейке и существенно увеличивает коэффициент задержки при 100% заполнении ячейки болотами. Параметризация процентного содержания озер производится аналогичными формулами с введением коэффициента задержки f_L .

Результаты моделирования

При проведении численных экспериментов по климатической модели речного стока было выбрано разрешение, соответствующее разрешению в региональной климатической модели ECSib, разработанной в ИВМиМГ СО РАН, и составляющее $1/3$ град по широте и долготе соответственно. Орография, полученная из данных реанализа (NCEP/NCAR Reanalysis Project at the NOAA-CIRES Climate Diagnostics) путем интерполяции и субъективной коррекции, позволяет моделировать сток пресных вод основных сибирских рек в бассейн Северного Ледовитого океана. Данные о рельефе поверхности были откорректированы с учетом однозначности направления стока из каждой ячейки сетки. Учет болот и озер осуществлялся на основе обработки массива их глобального распределения [27, 28].

Исходя из задачи изучения климатических процессов Сибири, рассматриваемая область охва-

тывает территорию $40\text{--}80^\circ$ с.ш., $50\text{--}150^\circ$ в.д. по пространству (рис. 2).

Эта зона простирается по долготе от Урала до Дальнего Востока и по широте от Северного Казахстана до Северного Ледовитого океана. В модели учитывались бассейны рек: Обь–Иртыш, Пур, Ангара–Енисей, Лена, Индигирка, Колыма, Анадырь, Амур. Ячейки поверхностного и грунтового стока представлялись в модели как отдельные резервуары, а ячейки речного стока задавались как каскад резервуаров.

Для выбранного варианта модели стока необходимо задание следующих входных параметров: осадки; испарение, переходы из жидкой в твердую фазы и обратно, инфильтрация в почву. Они были взяты из данных реанализа NCEP/NCAR. В качестве контрольных значений использовались среднемесячные стоки, полученные постами Гидрометслужбы на створах Обь–Салехард. Длина рядов составляла период 1936–1990 гг. Данные для каждого месяца были осреднены за указанный период, и полученные значения для каждого месяца были приняты за климатические.

На рис. 3 слева представлены результаты сравнения моделирования среднеклиматических годовых стоков на основе данных реанализа NCEP/NCAR с годовыми расходами, полученными на основе гидрологических съемок.

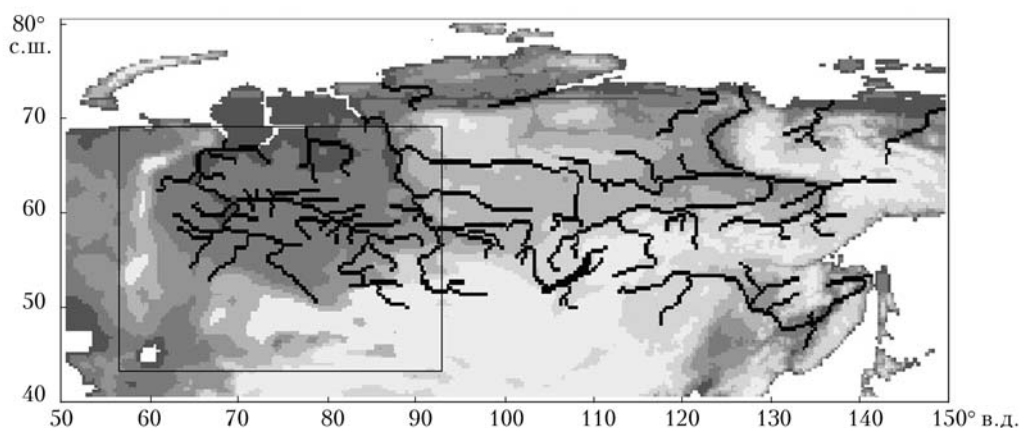


Рис. 2. Область моделирования

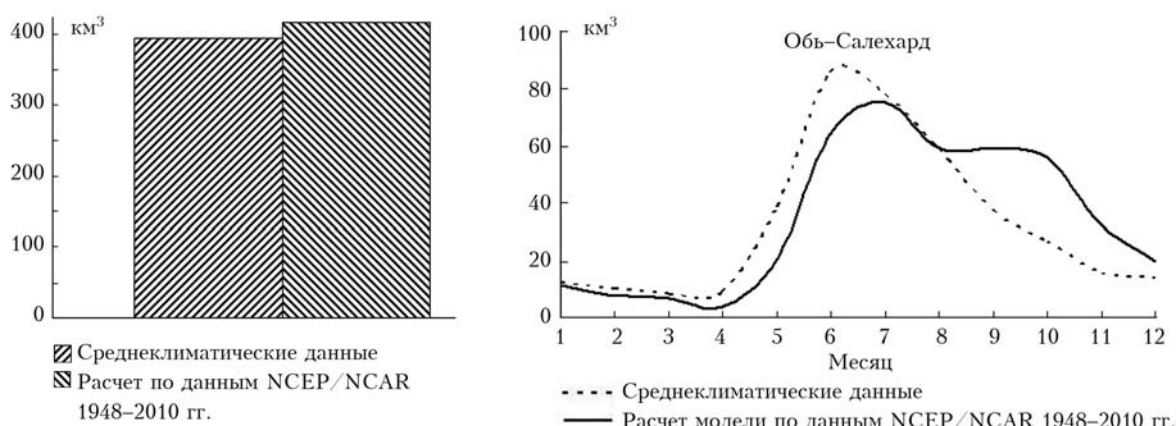


Рис. 3. Годовые расходы и годовой гидрограф, км^3

Отличия составляют 5%. Справа представлен годовой ход гидрографа для бассейна р. Оби. Полученные результаты показывают, что амплитуда гидрографа для Оби на створе Салехарда меньше климатических данных на 12%, а наступление весеннего половодья запаздывает по фазе на 1 мес.

Отклонения в годовом ходе гидрографа для Обь-Иртышского бассейна соотносятся с отклонениями, полученными по данным реанализа на основе модели Института Макса Планка [29]. Эти различия требуют дальнейшего анализа. Одной из возможных причин отклонений в фазах весенних паводков является недостаточно адекватное описание структуры и скорости таяния снежного покрова.

На рис. 4 представлены распределения гидрографов годового стока на створе Обь–Салехард

и суммарных осадков для Обь-Иртышского бассейна. Сплошными линиями представлены среднеклиматические гидрографы по расчетам и гидрологическим измерениям (рис. 4, а) и среднеклиматические суммарные осадки (рис. 4, б). Различия в максимальных расходах составляют 12% с запаздыванием паводка по фазе на 1 мес. Гистограмма представляет годовые гидрографы и осадки, осредненные по десятилетиям с 1948 по 2010 г.

Заключение

На основе разработанной модели климатического речного стока проведены эксперименты по моделированию речного стока на основе данных реанализа NCEP/NCAR. Результаты сравнения рассчитанного среднеклиматического годового стока и годового

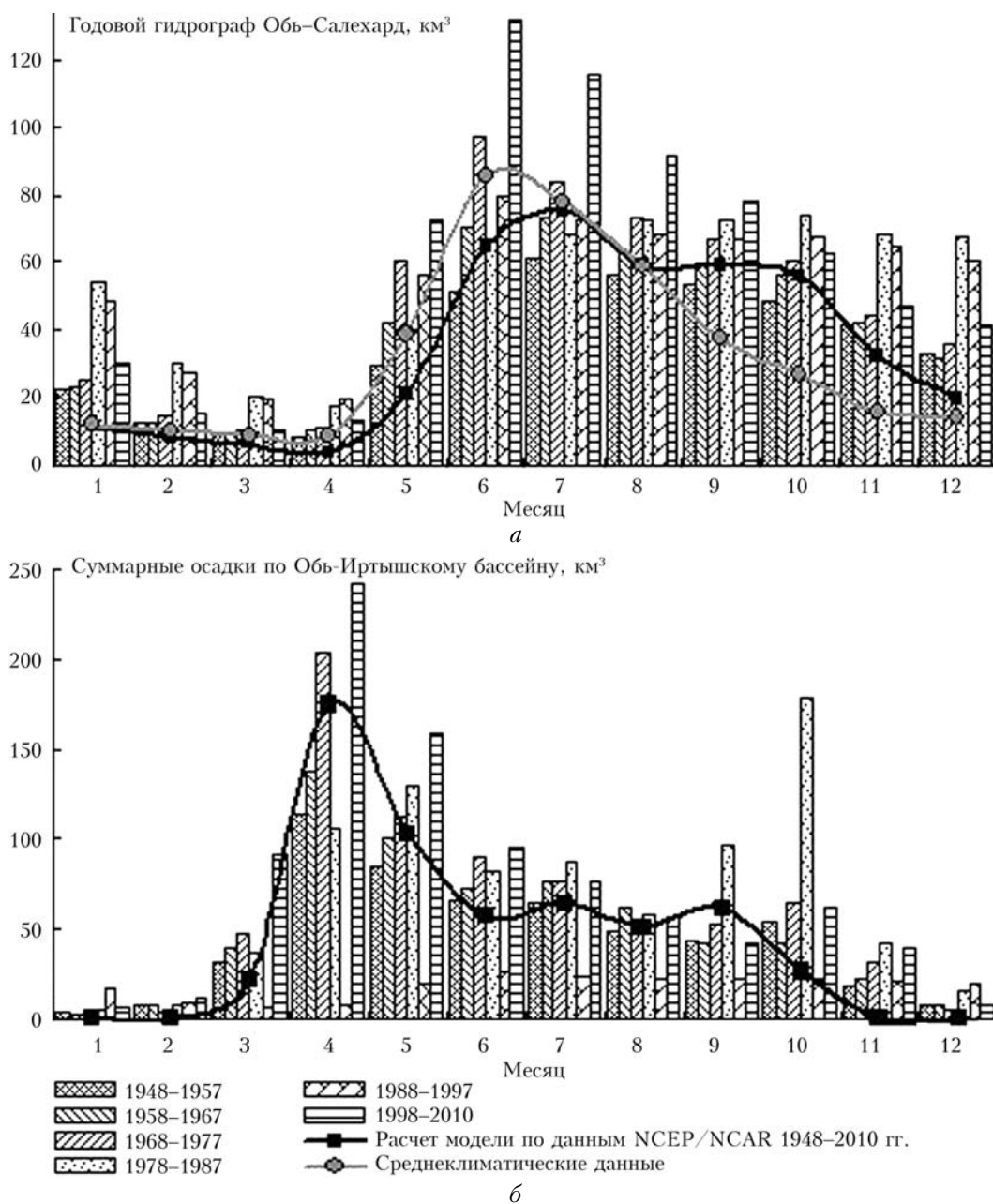


Рис. 4

гидрографа с данными измерений на гидрологическом посту Обь-Салехард дают хорошее совпадение.

Расчеты межгодовой изменчивости демонстрируют более существенные отличия с 1975 г. Модельный сток в соответствии с осадками реанализа увеличивается, что может являться откликом на климатические изменения в Западной Сибири, приводящие к росту стока сибирских рек, наблюдаемому в последние десятилетия [7, 19, 21].

Авторы статьи благодарны А.А. Фоменко за конструктивные обсуждения.

1. Иванов В.В. Водный баланс и водные ресурсы Арктического региона // Труды ААНИИ. 1976. Т. 323. С. 4–24.
2. 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. NATO. 2000. P. 281–296.
3. Атлас Мирового океана / Под ред. С.Г. Горшкова. New York: Pergamon, 1983. Т. 3. 189 с.
4. Атлас Арктики / Под ред. А.Ф. Трешникова. М.: ААНИИ, 1985. 204 с.
5. 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.
6. Aagaard K., Carmack E.C. The role of sea ice and other fresh water in the arctic circulation // J. Geophys. Res. C. 1989. V. 94, N 10. P. 14485–14498.
7. Serreze M.C., Barrett A.P., Slater A.G., Woodgate R.A., Aagaard K., Lamers 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. doi:10/1029/2005JC003424.
8. Dai A., Trenberth K. Estimates of freshwater discharge from continents: Latitudinal and seasonal variations // J. Hydrometeorol. 2002. V. 3. P. 660–687.
9. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши // Л.: Гидрометеоиздат, 1985. Т. 1, вып. 10, 12, 16.
10. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши 1981–1990. Часть 1. Т. 1. Новосибирск, вып. 10; Красноярск, вып. 12; Якутск, вып. 16.
11. Walsh J.E. Global atmospheric circulation patterns and relationships to Arctic freshwater fluxes, in The Freshwater Budget of the Arctic Ocean / Ed. by E.L. Lewis et al. Kluwer, Norwell, Mass. 2000. P. 21–41.
12. Thompson D.W.J., Wallace J.M. Annular modes in extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability // J. Climate. 2000. V. 13. P. 1000–1016.
13. 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.
14. 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.
15. Кузин В.И., Лаптева Н.А. Моделирование климатического речного стока для Сибирского региона // География и природные ресурсы. Спец. выпуск. Томск, 2004. С. 199–203.
16. Бураков Д.А. К оценке параметров линейных моделей стока // Метеорол. и гидрол. № 10. С. 89–95.
17. 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.
18. 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.
19. 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. 2004. V. 109. D18102. doi:10.1029/2004JD004583.
20. 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.
21. 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.
22. 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. New York: Cambridge University Press, 2001. 881 p.
23. 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. атмосф. и океана. 2010. Т. 46, № 6. С. 831–845.
24. Дьячников В.П., Лысков В.Н., Володин Е.М. Проблемы моделирования климата и его изменений // Изв. АН. Физ. атмосф. и океана. 2006. Т. 42, № 5. С. 618–636.
25. Hagemann S., Dumenil L. Hydrological discharge model. Technical report N 17. MPI. Hamburg, 1998. 42 p.
26. Куценко Л.С. Математическое моделирование речного стока. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 190 с.
27. Matthews E., Fung I. Methane emissions from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources. Global Biogeochem. Cycles 1. 1987. N 1.
28. Sausen R., Schubert S., Dumenil L. A model of river runoff for use in coupled atmosphere–ocean models // J. Hydrol. 1994. N 155. P. 337–352.
29. Hagemann S., Dumenil L. Validation of the hydrological cycle of ECMWF and NCEP reanalyses using the MPI hydrological discharge model // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. P. 1503–1510.

V.I. Kuzin, N.A. Lapteva. Mathematical modeling of the climatic river runoff from the Ob–Irtysch watershed.

Climatic model of the river runoff with 1/3 degree resolution is presented in the paper. The model is the linear reservoir model i.e., each cell in the model is the reservoir or the cascade of the reservoirs. The speed of the output from the cell is depended linearly of the input to the cell and the slope of the cell and inversely proportional to distance between the cells. The flow is separated into the surface flow, river runoff, and ground flow, which is determined in accordance with the ground surface model. Siberian region in the model is divided to eight watersheds, which include Ob–Irtysch, Pur, Yenisei, Lena, Anadyr, Indigirka, Kolyma, Amur. Data of the NCEP/NCAR reanalysis was used for the numerical modeling for the Ob–Irtysch watershed in the Western Siberia. The control data about the river discharge was taken from results of measurements on the hydrological station Ob-Salechard.