

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКОГО СТОКА ИЗ БАСЕЙНА РЕКИ ОБЬ

Виктор Иванович Кузин

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, ул. Ак. Лаврентьева, 6, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией, тел. (383)3306450, e-mail: kuzin@sscc.ru

Наталья Александровна Лаптева

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, г. Новосибирск, ул. Ак. Лаврентьева, 6, младший научный сотрудник, тел. (383)3306450, e-mail: lapteva@vector.nsc.ru

В статье представлена климатическая модель речного стока с разрешением $1/3$ градуса. Модель является линейной резервуарной моделью, то есть ячейка модели представляет собой резервуар или каскад резервуаров, скорость стока из которых линейно зависит от притока и наклона ячеек и обратно пропорциональна расстоянию между ячейками. 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 восемь основных водосборных бассейнов, включающих Обь-Иртыш, Пур, Енисей, Лена, Анадырь, Индигирка, Колыма, 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 MODELLING OF THE RUNOFF FROM THE OB RIVER BASIN

Victor I. Kuzin

doctor, professor, Head of the Laboratory, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, Novosibirsk, 630090, Russia, tel. (383)3306450, e-mail: kuzin@sscc.ru

Natalya A. Lapteva

junior Researcher, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, prospect Akademika Lavrentjeva, 6, Novosibirsk, 630090, Russia, tel. (383)3306450, e-mail: lapteva@vector.nsc.ru

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 verse proportional to distance between the cells. The flow is separated to 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-Irtysh, Pur, Yenisei, Lena, Anadyr, Indigirka, Kolyma, Amur. Data of the NCEP/NCAR reanalysis was used for

the numerical modeling for the Ob-Irtysh watershed in the Western Siberia. The control data about the river discharge was taken from the results of the measurements on the hydrological station Ob-Salechard.

Key words: mathematical modelling, climatic river runoff, Ob river basin.

Введение.

В гидрологической составляющей климатической системы Арктика играет важную роль. Интерес к гидрологическим процессам в Арктике и в частности в Северном Ледовитом океане в последние десятилетия существенно увеличивается [1].

Важным источником притока пресной воды в Северный Ледовитый океан является речной сток. Первые оценки речного притока в Арктику были даны в работах [2, 3].

Современные оценки [4, 5] дают значение около 3.2 тыс. куб. км в год что дает около 56% по сравнению с притоком через Берингов пролив. Из этого объема крупные реки российского Севера дают около 2.24 тыс. куб. км в год, что составляет около 70% от всего речного стока [4]. Наибольшую величину стока дают такие реки как Енисей, Лена и Обь.

В настоящей работе рассматривается климатическая резервуарная модель речного стока, разрабатываемая для региональной климатической модели Сибирского региона и обсуждаются результаты расчетов, проведенные 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. Модель составлена из линейных резервуаров в ячейках сетки. Это означает, что скорость стока из ячейки линейно зависит от притока и пропорциональна наклону в ячейке и обратно пропорциональна расстоянию между центрами ячеек.

Скорость изменения стока из ячейки или каскада ячеек в простейшем варианте модели Калинина-Милюкова [6, 7] определяется на основе решения последовательности обыкновенных дифференциальных уравнений вида

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

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.

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

$$Q(t) = \int_0^{\infty} I(\tau) \cdot h(t - \tau) \cdot d\tau \quad (2)$$

Здесь $h(t)$ есть функция влияния линейной системы («кривая добегания» в российской гидрологической терминологии). В простейшем варианте одной ячейки она имеет вид

$$h(t) = \frac{1}{k} \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad (3)$$

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

$$h(t) = \frac{t^{n-1}}{k^n \cdot (n-1)!} \cdot e^{-\frac{t}{k}} \quad (4)$$

Здесь k коэффициент задержки для каждой ячейки.

В конкретной реализации модели мы будем использовать структуру, предложенную в институте Макса Планка в Гамбурге [7].

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 ячейкам, отнесенного к расстоянию между их центрами.

В каждой ячейке производится учет процентного содержания болот и озер.

Эффект болот параметризуется множителем задержки, который влияет на скорость поверхностного и речного стоков в зависимости от процентного содержания болот. Эффект содержания озер производится аналогичным образом.

Результаты моделирования.

При проведении численных экспериментов по климатической модели речного стока было выбрано разрешение, соответствующее разрешению в региональной климатической модели, разработанной в ИВМиМГ СО РАН, и составляющее 0.3×0.3 градуса 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 глобального распределения болот и озер [8, 9].

Исходя из задачи изучения климатических процессов Сибири, рассматриваемая область покрывает территорию $40^{\circ}\text{N} - 80^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ}\text{E} - 150^{\circ}\text{E}$ по пространству. 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. Эти данные были взяты из данных реанализа NCEP/NCAR. В качестве контрольных данных использовались климатические данные годовых расходов Сибирских рек Атласа Арктики и данные о среднемесячных стоках полученных 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 значения.

На рис. 1 представлены результаты сравнения результатов моделирования среднеклиматических годовых стоков на основе данных реанализа NCEP/NCAR с годовыми расходами, полученными на основе гидрологических съемок.



Рис. 1. Годовые расходы (куб.км)

На рисунке 2 представлены распределения гидрографов годового стока на створе Обь-Салехард. Сплошными линиями представлены среднеклиматические гидрографы по расчетам и гидрологическим измерениям. Различия в максимальных расходах составляют 12% с запаздыванием паводка по фазе на один месяц. Гистограмма представляет годовые гидрографы и осадки, осредненные по десятилетиям с 1948 по 2010 гг.

Годовой гидрограф Обь-Салехард, км³

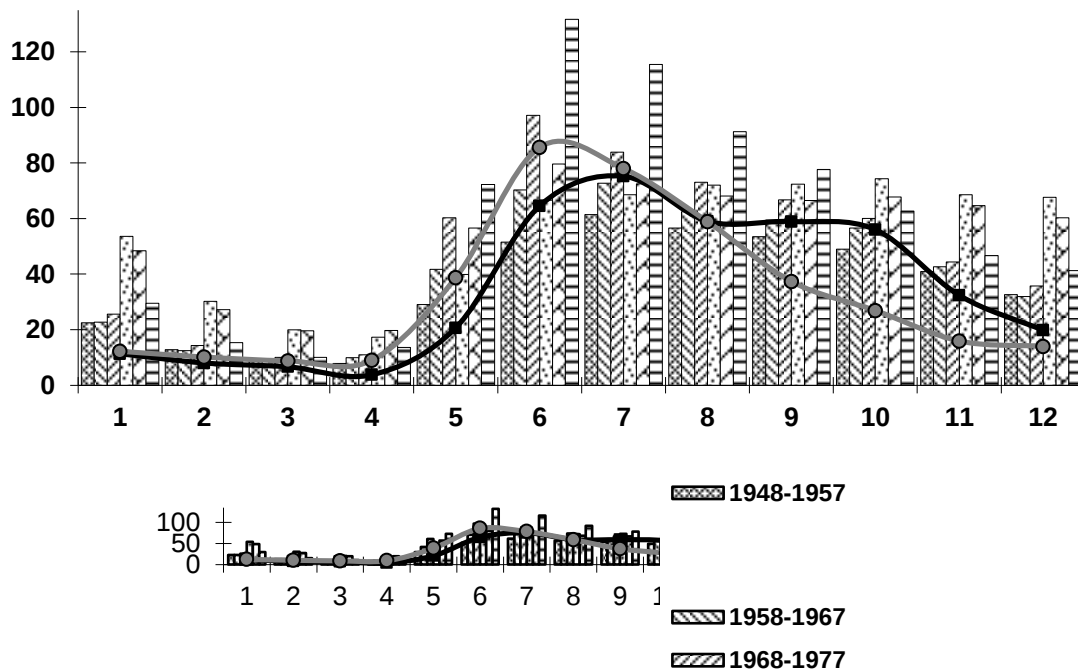


Рис. 2

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 гидрографа с данными измерений на гидрологическом посту Обь-Салехард дает хорошее совпадение. Расчеты межгодовой изменчивости дают большие отличия с 1975 года. Модельный сток в соответствии с осадками реанализа увеличивается, что может являться откликом на климатические изменения в Западной Сибири, приводящие к росту стока Сибирских рек, наблюдаемых в последние десятилетия [5].

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горшков С.Г.(ред.). Атлас Мирового океана // Pergamon, New York. -1983. - Т. 3. - 189 с.
2. Под ред. Трешникова А.Ф. Атлас Арктики // М: ААНИИ. - 1985. - 204 с.
3. Berezovskaya S, Yang D, Kane D. Compatibility analysis of presipitationand runoff trends over the large Siberian watersheds // Geoph. Res Lett. - 2004. - V. 31. - doi:10.1029/2004GL121277.
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. - P. 14485-14498.
5. 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.

6. Бураков Д.А. К оценке параметров линейных моделей стока // Метеорология и гидрология. - 1989. - № 10. - С. 89-95.
7. Hagemann S., Dumenil L. Hydrological discharge model // Technical report No 17, MPI, Hamburg. - 1998. - 42 p.
8. Matthews E. Methane emissions from natural wetlands: Global distribution, area, and environmental characteristics of sources // E.Matthews, I.Fung. Global Biogeochem. - Cycles 1. - 1987. - № 1.
9. Sausen R. A model of river runoff for use in coupled atmosphere-ocean models// R. Sausen, S. Schubert, L. D'umenil. J. Hydrol. - 1994. - №155. - P. 337–352.

© В.И. Кузин, Н.А. Лантева, 2012