

Модель маршрутизации речного стока в континентальном масштабе с переменной скоростью потока

А. И. Крылова^{1}, Н. А. Лаптева²*

¹ Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация

² Федеральное бюджетное учреждение науки Государственный научный центр вирусологии
и биотехнологии «Вектор» Роспотребнадзора, Новосибирская область, р. п. Кольцово,
Российская Федерация

*e-mail: alla@climate.sccc.ru

Аннотация. В последней версии климатической модели формирования речного стока перенос воды по речной сети к устью осуществлялся для каждого участка реки Лена и её притоков со своей постоянной скоростью. В данной работе представлены два подхода к маршрутизации поверхностного стока с переменной по времени скоростью потока. Использование этих подходов может позволить модели представлять не только средние многолетние расходы, но и возможность моделировать паводки, краткосрочные колебания речного стока. Проведены два численных эксперимента: моделирование речного стока с постоянной и переменной скоростями.

Ключевые слова: климатическая модель, речной сток, схема маршрутизации, скорость потока

Model of river flow routing on a continental scale with variable flow velocity

A. I. Krylova^{1}, N. A. Lapteva²*

¹ The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk,
Russian Federation

² Federal Budgetary Research Institution “State Research Center of Virology and Biotechnology
“Vector” Rospotrebnadzor, Novosibirsk region, Koltsovo, Russian Federation

* e-mail: alla@climate.sccc.ru

Abstract. In the latest version of the climatic model of river flow formation, water transport along the river network to the mouth was carried out for each section of the Lena River and its tributaries at its constant rate. This paper presents two approaches to routing surface runoff with time-varying flow rates. The use of these approaches may allow the model to represent not only average multi-year flow rates, but also the ability to simulate floods and short-term fluctuations in river flow. Two numerical experiments were conducted: simulations of river flow with constant and variable velocities.

Keywords: climate model, river flow, routing scheme, flow rate

Введение

Известно, что модель маршрутизации поверхностного и грунтового стоков обеспечивает основу для сравнения и проверки оценок речного стока с данными наблюдаемых расходов воды [1, 2]. Модельный речной сток может быть исполь-

зован для оценки воздействия изменений климата на гидрологию речного бассейна и его водные ресурсы [3].

В большинстве глобальных моделях маршрутизации предполагалась постоянная скорость потока, либо зависящая от времени скорость, параметризованная как функция топографического градиента [4, 5]. Как правило, скорость представляется среднегодовым значением, полученным из среднегодового расхода, проходящего через участок реки. Также использовались более физически обоснованные подходы, которые связывают скорость потока с уклоном, расходом и поперечным сечением реки с помощью уравнения Маннинга [6,7]. В реальности скорость потока зависит от времени и изменяется в зависимости от количества генерируемого стока и потока через речную систему.

В данной работе для определения зависящих от времени скоростей потока на каждом временном шаге модели используется уравнение Маннинга.

Метод переменной скорости для климатической модели формирования речного стока

Первый подход моделирования переменной по времени скорости потока заимствован из работы [8]. В основе алгоритма для расчёта скорости речного потока лежит формула Маннинга:

$$v = \frac{1}{n} R^{2/3} s^{1/2}, \quad (1)$$

где v – скорость потока (м/с), n – коэффициент шероховатости (с/м^{1/3}), R – гидравлический радиус (м), s – уклон русла реки (м/м). Гидравлический радиус R изменяется во времени в связи с динамикой уровня реки. Предполагая, что русло реки имеет форму прямоугольника, скорость потока можно рассчитать, как функцию глубины реки h и ширины D :

$$v = \frac{1}{n} \left(\frac{A}{P}\right)^{2/3} s^{1/2} = \frac{1}{n} \left(\frac{D \cdot h}{D+2h}\right)^{2/3} \cdot s^{1/2}, \quad (2)$$

где A – площадь поперечного сечения, P – смоченный периметр.

Основываясь на тесной связи между формой русла и расходом воды Q (м³/с) в работе [9] предложены уравнения, которые оценивают h и D как функции расхода:

$$D = a \cdot Q^b, \quad h = c \cdot Q^d. \quad (3)$$

Аллен с соавторами [10] провели регрессионный анализ данных по 674 поперечным сечениям рек в США и Канаде и получили количественную оценку коэффициентов a, b, c, d : $a=2,71$, $b=0,577$, $c=0,349$, $d=0,341$. Коэффициент детерминации R^2 составил 0,88 для ширины D и 0,75 для глубины h . Значение коэффициента шероховатости для естественных речных русел варьировалось от 0,015 до 0,07.

Этот подход был интегрирован в климатическую модель речного стока, где вместо постоянной скорости потока рассматривалась скорость согласно формуле Маннинга со значением коэффициента шероховатости равным 0,035. Имея данные о суточных расходах воды за период с 1980 года по 2009 год на г/п Кюсюр возможно было провести сравнение результатов расчёта суточных гидрографов для постоянной и переменной скоростей речного стока.

Второй подход моделирования переменной по времени скорости потока и интеграции его в климатическую модель более сложен. В модели схема маршрутизации включает линейные поверхностный и подземный резервуары (хранилища воды) в ячейке. Для каждой расчётной ячейки поверхности водосбора значения составляющих поверхностного и грунтового стоков представляют стокообразование в центре расчётной ячейки. Стеkanie этой воды трансформируется с учётом времени добегания по ячейке на основе двухпараметрической модели Калинина-Милюкова [11]. В соответствии со схематизированной в виде графа модельной речной сетью, связывающей ячейки, рассчитывается динамика запасов и расходов воды в каждой русловой ячейке на основе уравнения неразрывности.

Водный баланс в русловой ячейке для поверхностного запаса воды W (м^3) определяется следующим образом:

$$\frac{dW}{dt} = Q_{in} - Q_{out} , \quad (4)$$

где Q_{in} ($\text{м}^3/\text{с}$) – расход воды, представляющий сумму расходов воды, поступающей в ячейку от соседних ячеек, расположенных вверх по течению реки, от смежных поверхностных ячеек в виде бокового притока и расхода грунтовой воды; Q_{out} ($\text{м}^3/\text{с}$) – расход воды из ячейки в соседнюю русловую ячейку, расположенную вниз по течению. Аккумуляция запаса воды W в русловой ячейки рассматривается как линейная функция от расхода:

$$W = \tau Q_{out} . \quad (5)$$

где τ – время движения потока между соседними ячейками. С другой стороны,

$$W = \frac{d \cdot r_m}{v} A v = d \cdot r_m A , \quad (6)$$

где d – расстояние между ячейками сетки, A – площадь поперечного сечения русла реки, v – скорость, r_m – коэффициент меандрирования. Для оценки скорости поверхностного стока используется формула Маннинга (1).

Если принять во внимание уравнения (5), (6), то уравнение (4) примет вид

$$\frac{dW}{dt} = Q_{in} - \frac{v}{d \cdot r_m} W . \quad (7)$$

Для решения уравнения (7) предполагаем, что скорость v постоянна на каждом временном шаге. Таким образом, мы получаем решение для запаса воды

$$W(t_{i+1}) = e^{\frac{-\Delta t v(t_i)}{d \cdot r_m}} \cdot W(t_i) + \left(1 - e^{\frac{-\Delta t v(t_i)}{d \cdot r_m}}\right) \cdot \frac{d \cdot r_m}{v(t_i)} \cdot Q_{in} . \quad (8)$$

В случае первого подхода в (8) используем скорость, рассчитанную по формуле (2) с использованием аппроксимации (3).

Во втором подходе для нахождения скорости потока используется соотношение для расхода воды, полученное в работе [12] на основе объективного статистического анализа более 500 внутрибереговых потоков:

$$Q = 1,564 \cdot A^{1,173} \cdot R^{0,400} \cdot s^{-0,0543 \cdot \log s} . \quad (9)$$

Учитывая, что $Q=A \cdot v$ приходим к формуле нахождения скорости v на шаге t_i :

$$v(t_i) = 1,564 \frac{w(t_i)^{0,573}}{(d \cdot r_m)^{0,573} \cdot \left(\frac{2W(t_i)}{D \cdot d \cdot r_m} + D\right)^{0,400}} . \quad (10)$$

Во втором подходе для оценки ширины реки используется геоморфологическая зависимость ширины реки D от среднегодового стока, предложенная в работе [13]:

$$D = \max\left(25, \left(10^{-4} \cdot Q_{m,mouth} + 6,0\right) \cdot Q_m^{0,5}\right) , \quad (11)$$

где Q_m – среднегодовой расход, проходящий через данный участок реки, $Q_{m,mouth}$ – среднегодовой расход в устье реки.

Численные эксперименты

Для численных экспериментов по расчёту гидрографа на г/п Кюсюр на основе модели климатического речного стока были использованы данные реанализа MERRA за период с 1980 года по 2011 год [14]. Сравнение проводилось с данными наблюдений по речному стоку из архива R-ArcticNET [15]. Выполнены два численных эксперимента. Первый эксперимент проведён с постоянной скоростью потока, откалиброванной для каждого из четырёх основных подбассейнов бассейна р. Лены (р. Виллой, р. Витим, р. Олёкма, р. Алдан) с учётом верхнего, среднего и нижнего течений самой реки Лена. Разброс скорости по бассейну составлял $0,5 \div 5,5$ м/с.

Второй эксперимент проведён с переменной скоростью потока, используя моделирование скорости согласно первому подходу.

В обоих экспериментах накопление воды в реке и её притоках инициализируется нулевым значением. Процедура раскрутки модели занимает один год (1980) и завершается, когда разница в запасах воды составляет не более 5% для 95% всех ячеек сетки.

Уклон реки s , который требуется для второго эксперимента, рассчитывается на основе цифровой карты высот разрешением $(1/3 \times 1/3)^\circ$ и файла направлений дренажного потока, определённого и представленного в работе [16]. Была создана реалистичная карта направлений стока, которая показала отсутствие нерегулярных точек, расположенных вниз по течению и имеющих более высокую высоту.

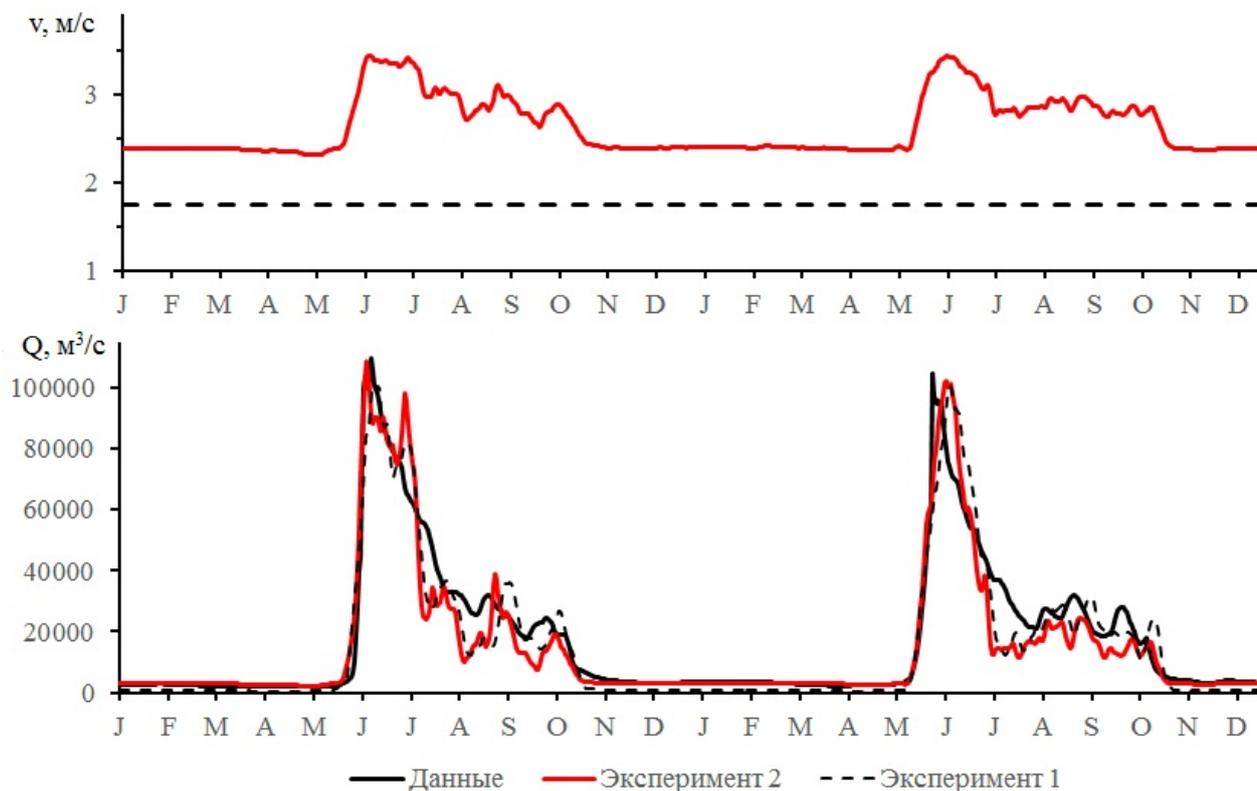


Рис. 1. Сравнение суточных данных и результатов экспериментов: 1 (с постоянной скоростью) и 2 (с переменной скоростью) на г/п Кюсюр за 1998-1999 гг. В верхней части рисунка представлены скорости: переменная (красная линия) и постоянная (пунктирная черная линия), в нижней части наблюдаемый и модельные гидрографы

В численных экспериментах используется коэффициент меандрирования, рассчитанный для каждого подбассейна в работе [16]. Временной шаг моделирования установлен равный 6 часам.

Для определения качества результатов экспериментов путём сравнения смоделированного и наблюдаемого речного стока используются ежедневные данные по расходу воды на г/п Кюсюр за период с 1980 по 2009 год. Согласно результатам эксперимента 2 на рис. 1 в сезон высокого стока скорость может достигать 3,5 м/с, в то время как в сезон низкого стока это значение составляет не более 2 м/с. Таким образом, климатическая модель способна уловить суточные колебания речного стока в реке Лена.

Если сравнивать результаты двух экспериментов, то корреляция с наблюдениями для всего периода расчета с 1980 года по 2009 год оказалась близкой, а для 1998-1999 гг. составила 0,95 для обоих экспериментов.

Обсуждение

Способность схемы маршрутизации стока воспроизводить величину и время наблюдаемого гидрографа зависит от качества схемы рельефа производить сток в нужное время и в нужном месте в бассейне реки. В качестве схемы используется гидрологически-корректная модель рельефа бассейна реки Лена, представленная в работе [16].

Согласно результатам экспериментов 1 и 2 смоделированный речной сток на г/п Кюсюр отличается от данных наблюдаемых гидрографов как по величине, так и по времени стока. Понять причины, по которым возникают различия, необходимо для дальнейшего изучения и развития климатической модели речного стока. Если говорить об ошибках, то они могут быть связаны со входными данными формирования стока, т.е. в основном с осадками, и с самой моделью маршрутизации реки.

Качество моделирования речного стока контролируется осадками. Точность и надёжность атмосферных осадков из реанализа MERRA за период 1980 – 2009 гг. остаётся открытой. В работе Репиной И.А. «Атмосферные реанализы» показано, что осадки из реанализа MERRA недооценены, что влечёт систематические ошибки в моделируемых речных стоках.

Ошибки, связанные с моделью, могут относиться, как к используемым параметризациям, так и к допущениям о постоянной скорости потока на каждом временном шаге и морфометрии реки. Поперечные сечения реки аппроксимируются прямоугольником, а ширина реки вдоль различных участков цифровой речной сети определяется по геоморфологической зависимости между шириной и среднегодовым расходом.

Чувствительность моделирования речного стока к этим факторам требует дальнейшего исследования.

Заключение

Целью данного исследования было интегрировать два подхода к моделированию переменной скорости течения в климатическую модель формирования речного стока. Предварительные численные эксперименты показали, что модель может уловить более короткие по времени колебания стока в континентальном масштабе. Проверка влияния переменной скорости потока на модельный речной сток ещё не завершена.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ИВМиМГ СО РАН (проект №0215-2021-003) и гранта РФФИ № 20-05-00241а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Oki T. and Sud Y. C. Design of Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) – A global river channel network. Earth Interactions 2, available at <http://EarthInteractions.org>, 1998.

2. Krylova A., Lapteva N. Modeling of the long-term annual and seasonal runoff in the Lena river basin //SPIE Conf. Series: Atmospheric Physics 119165P, 2021. <https://doi.org/10.1117/12.2603165>
3. Arora V. K. and Boer, G. J.: Effects of simulated climate change on the hydrology of major river basins. - J. Geophys. Res., 2001, 106(D4). - P. 3335–3348.
4. Miller J. R., Russell G. L. and Caliri G. Continental-scale river flow in climate models. - J.Clim., 1994, 7. - P. 914–928.
5. Hagemann S. and Dümenil L. A parameterization of lateral water flow for the global scale. - Clim. Dyn., 1998, 14. - P. 17–41.
6. Arora V. K., Chiew H.S. and Grayson R. B. A river flow routing scheme for general circulation models. - J. Geophys. Res., 1999, 104 (D24). - P. 30 965–30 979.
7. Hgo-Duk T., Oki T., Kanae S. A variable streamflow velocity method for global river routing model: Model description and preliminary results. - HESSD, 2007, 4(6). – P.4389-4414.
8. Schulze K., Hunger M. and Döll P. Simulating river flow velocity on global scale. - Adv.Geosci., 2005, 5. - P. 133–136. <http://www.adv-geosci.net/5/133/2005/>.
9. Leopold L. and Maddock T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. - Professional Paper 252, United States Geological Survey. - 1953.
10. Allen P. M., Arnold J. G. and Byars B. W. Downstream channel geometry for use in planning-level models. - Water Resources Bulletin, 1994, 30(4). - P. 663–671.
11. Калинин Г.П., Милуков П.И. Приближённый расчёт неустановившегося движения водных масс // Труды ЦИП. Вып. 66. Л.: Гидрометеиздат. 1958. - 72 с.
12. Dingman S. L. and Sharma K. P. Statistical development and validation of discharge equations for natural channels. - J. Hydrol., 1997, 1(199). - P. 13–35.
13. Arora V.K. and Boer G.J. A variable velocity flow routing algorithm for GCMs. -J. Geophys. Res., 1999, 104(D24). - P.30965-30979.
14. <https://gmao.dsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA>
15. <http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html>
16. Крылова А.И., Лаптева Н.А. Моделирование речного стока в бассейне реки Лена на основе гидрологически-корректной цифровой модели рельефа // Проблемы информатики, 2020, №4. - С. 71-88.

© А. И. Крылова, Н. А. Лаптева, 2022