

УДК 551.583.1 + 519.6

# Маршрутизация речного потока с переменной скоростью на примере бассейна р. Лены

А.И. Крылова<sup>✉1</sup>, Н.А. Лаптева<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН  
630090, г. Новосибирск, ул. Академика Лаврентьева, 6

<sup>2</sup>Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» Роспотребнадзора  
630559, Новосибирская обл., р.п. Кольцово

Поступила в редакцию 14.02.2023 г.;

после доработки 17.03.2023 г.;

принята к печати 19.04.2023 г.

Реализован метод переменной по времени скорости потока для концептуальной модели формирования речного стока с целью улучшения маршрутизации потока в бассейне р. Лены. В отличие от моделей, использующих постоянную скорость, в этом подходе скорость, изменяющаяся во времени, зависит от количества стока, генерируемого в ячейке сетки суши. Для оценки скорости потока в приближении прямоугольного поперечного сечения для речного русла используется уравнение Маннинга. Численные эксперименты с постоянной и переменной скоростями потока позволили сравнить модельный сток с наблюдаемыми суточными гидрографами на стоковых станциях Кюсюр, Табага и Верхоянский Перевоз. Приведена оценка теплового потока в бассейне р. Лены на гидропосту Кюсюр за период 2002–2011 гг.

**Ключевые слова:** концептуальная модель речного стока, схема маршрутизации, наблюдаемые гидрографы, постоянная и переменная скорости потока, тепловой поток; conceptual model of river flow, routing scheme, observed hydrograph, constant and variable flow rates, heat flow.

## Введение

Моделирование в глобальном масштабе распределенного притока пресной воды из рек в океаны является важной частью модели климатической системы, включающей обмена водой и энергией между сушей, атмосферой и океанами. Для маршрутизации потоков пресной воды через речные системы необходима информация о направлении потока и времени прохождения. Пространственная маршрутизация, представляющая собой карту направлений движения потоков [1], строится на основе цифровой модели рельефа поверхности речного водосбора. Концептуальная модель речного стока, используемая в данной работе, воспроизводит поверхностный сток и подповерхностный дренаж на территории бассейна и направление этих потоков к речным устьям и не учитывает процессы теплового обмена [1, 2].

Для моделирования средних многолетних расходов воды в наших ранних работах [1, 3] использовалась постоянная скорость речного потока. В реальности скорость потока зависит от времени и количества генерируемого стока в ячейке сетки суши и потока через речную систему, т.е. представляет собой реакцию на изменение климата. Результаты расчетов модельного речного стока могут быть применены для определения влияния изменения климата на водные ресурсы и гидрологию основных

речных бассейнов, а также для сравнения схем параметризации поверхности суши [3, 4].

Для определения изменяющейся во времени скорости потока как функции расхода, поперечного сечения реки и уклона русла в работах [5, 6] используется уравнение Маннинга. В настоящей работе этот подход применяется в концептуальной модели речного стока для улучшения маршрутизации потока в бассейне р. Лены и моделирования краткосрочных колебаний стока. Приводится сравнение с данными наблюдаемых суточных гидрографов.

Известно, что температура воды и ее расход являются основными факторами, контролирующими тепловой поток, который влияет на процессы замерзания/вскрытия реки, толщину речного ледяного покрова, термическую эрозию почв вдоль берегов реки, биологические процессы.

Цель работы – на основе данных о температуре воды и модельного расхода воды за 2002–2011 гг. в замыкающем створе гидропоста (г/п) Кюсюр дать количественную оценку речного теплового потока (поток с верховья р. Лены и ее бассейнов до замыкающего створа г/п Кюсюр), которая будет полезна для понимания гидрологического отклика на климатические изменения [7–9].

## Метод переменной скорости для концептуальной модели формирования речного стока

Согласно концептуальной линейной модели формирования речного стока водный баланс в пределах

\* Алла Ивановна Крылова (alla@climate.sccc.ru); Наталья Александровна Лаптева (lapteva@vector.nsc.ru).

ячейки сетки определяется на основе уравнения неразрывности [1]:

$$\frac{dW}{dt} = \Sigma(Q_{in} - Q_{out}), \quad (1)$$

где  $W$  — запас воды в пределах одной речной ячейки, км<sup>3</sup>;  $Q_{in}$  — расход воды, поступающий в ячейку, км<sup>3</sup> в ед. вр.;  $Q_{out}$  — расход воды на выходе из ячейки, км<sup>3</sup> в ед. вр. В модели принимается параметризация, определяемая соотношением

$$W = \tau Q_{out}, \quad (2)$$

где  $\tau$  — время задержки поверхностных вод между двумя соседними ячейками по течению, равное отношению расстояния между центрами ячеек к скорости потока. Скорость потока оценивается по формуле Маннинга

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

где  $v$  — скорость потока, м/с;  $n$  — коэффициент шероховатости русла, с/м<sup>1/3</sup>;  $R$  — гидравлический радиус, м;  $s$  — уклон ячейки, м/м;  $A$  — площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>;  $P$  — смоченный периметр, м. Предполагая, что русло реки имеет форму прямоугольника, можно записать

$$v = \frac{1}{n} \left( \frac{Dh}{D+2h} \right)^{2/3} s^{1/2}, \quad (4)$$

где  $D$  — ширина реки, м;  $h$  — глубина, м. Основываясь на тесной связи между формой русла и расходом воды, в работе [10] предложена аппроксимация для расхода воды в прямоугольном русле

$$Q = 4,618 A^{1,173} R^{0,400} s^{0,344}. \quad (5)$$

Учитывая, что  $Q = A \cdot v$  и  $W = A \cdot d \cdot r_m$ , где  $d$  — расстояние между центрами ячеек;  $r_m$  — коэффициент извилистости, или меандрирования, приходим к формуле для скорости течения реки, зависящей от времени прохождения водного потока:

$$v(t_i) = 4,618 \frac{W(t_i)^{0,573} s^{0,344}}{(d \cdot r_m)^{0,573} \left( \frac{2W(t_i)}{D \cdot d \cdot r_m} + D \right)^{0,400}} \quad (6)$$

( $t_i$  — номер временного шага). Для оценки ширины реки  $D$  используется геоморфологическая зависимость от среднегодового стока, предложенная в работе [4]:

$$D = \max(25(10^{-4} Q_{m, mouth} + 6,0) Q^{0,5}), \quad (7)$$

где  $Q_{m, mouth}$  — месячный расход воды в устье реки, км<sup>3</sup>. Тогда решение уравнения неразрывности (1) имеет вид

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

где коэффициент  $r_m$  для речной системы р. Лены определен в [1] как отношение реальной длины реки или ее притока к модельной длине.

## Численные эксперименты по расчету речного стока с двумя вариантами скорости потока

Ввиду отсутствия данных измерений скорости течения в бассейне р. Лены было решено провести тестирование и проверку алгоритма моделирования переменной скорости потока путем сравнения модельных суточных гидрографов на г/п Кюсюр, Табага, Верхоянский Перевоз с данными наблюдений суточного стока. Для расчетов суточных гидрографов на основе концептуальной линейной модели формирования речного стока использовались данные реанализа MERRA за 1980–2011 гг. (<https://gmao.dsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA>). Модельные суточные гидрографы сравнивались с данными наблюдений за 1980–2011 гг. из архива R-ArcticNet (<http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html>), а с 2008 по 2011 г. — с данными наблюдений суточного стока с сайта АИС ГМВО (Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов) (<https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=505>).

Численные эксперименты по расчету речного стока осуществляли на основе карты маршрутизации, которая была получена путем схематизации бассейна р. Лены на сетке с разрешением  $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$ . Схематизация бассейна и построение его дренажной сети (рис. 1) выполнены на основе цифровой модели рельефа SRTM ([http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2\\_1/](http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/)), дополненной данными о топографии ГТОРО30 и топографическими картами масштабов 1 : 200000, 1 : 1000000 [1].

На рис. 2 приведены годовые вариации суточных наблюдаемых и модельных гидрографов, вычисленных с постоянной и переменной скоростями потока. Моделируемая переменная скорость может достигать в сезон высокого стока (половодье) до 4,5 м/с, в то время как в сезон низкой воды ее значение не превышает 2,1 м/с. Эти величины сопоставимы с реальными значениями скорости. Результаты моделирования речного стока оказались близкими для двух вариантов скоростей. Это можно объяснить качеством калибровки постоянной скорости для каждого из 21 участков р. Лены и ее притоков [1].

Лена — типичная река высоких широт Северного полушария, где максимальный сток происходит за счет таяния снега весной. Возможность воспроизведения величины и времени речного стока зависит от накопленного зимой снега и его таяния весной. При рассматриваемых скоростях течения модель маршрутизации хорошо отражает соответствие фаз (половодье, летне-осенние паводки, зимняя межень) моделируемого речного стока с данными о гидрографе. Известно, что данные о количестве осадков в реанализе MERRA занижены, и это является одной из основных причин разницы между смоделированным и измеренным речным стоком в половодье. На рис. 3 приведены модельные и наблюдаемые гидрографы на трех стоковых станциях, представляющих различные ландшафтно-

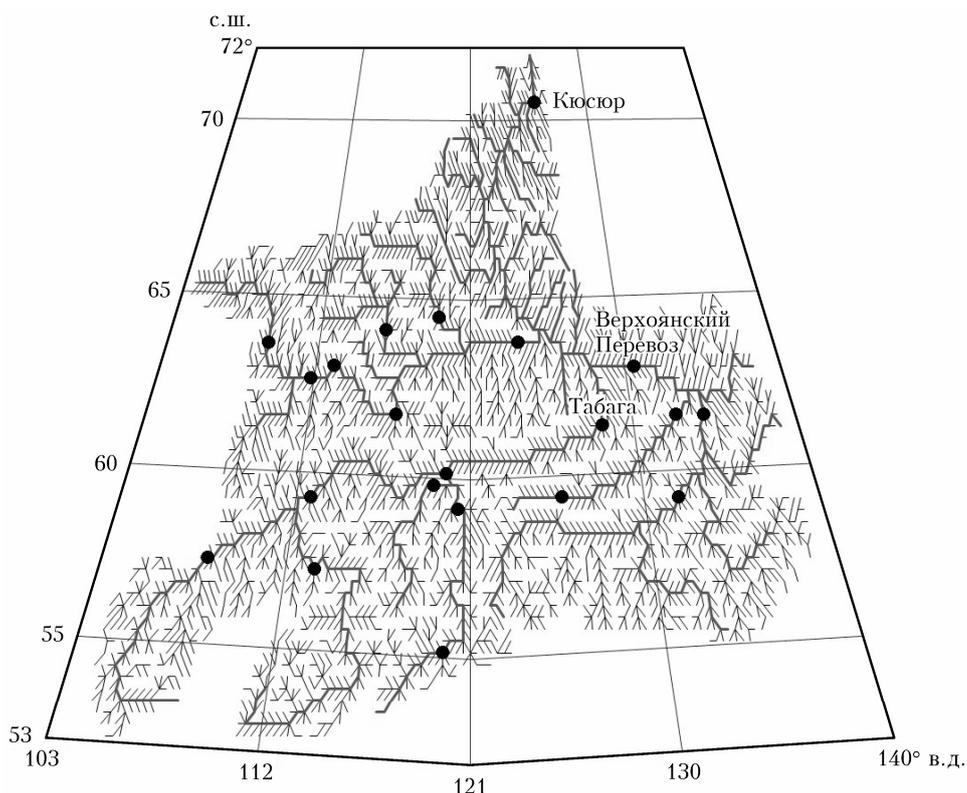


Рис. 1. Модельная гидрографическая сеть бассейна р. Лены с 21 стоковой станцией [1]

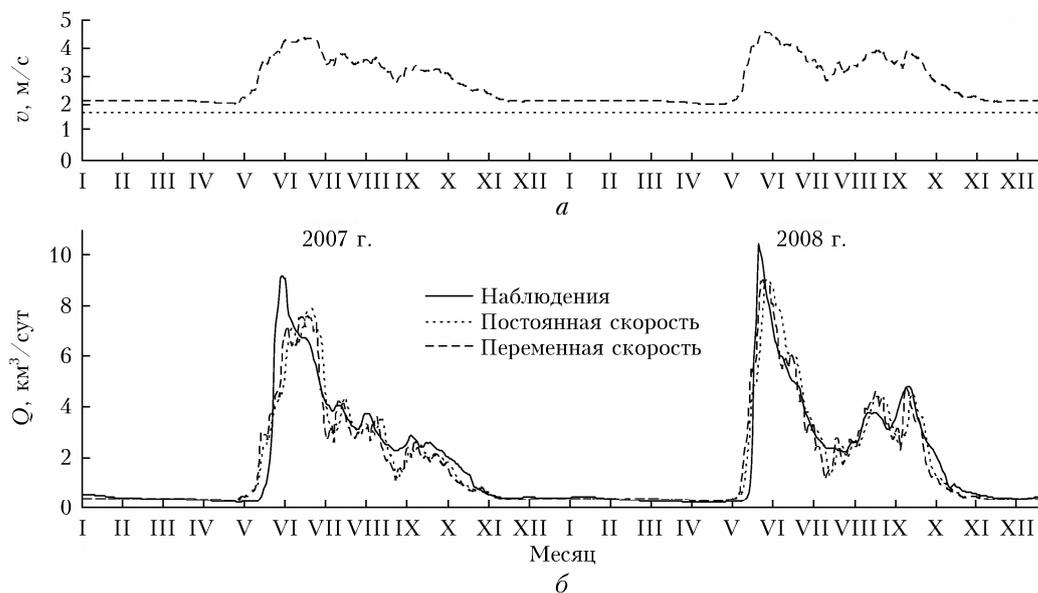


Рис. 2. Постоянная (пунктирная кривая) и переменная (штриховая кривая) скорости, используемые в модельных расчетах гидрографа (а); суточные наблюдаемый гидрограф (сплошная) и модельные гидрографы с постоянной и переменной скоростями на г/п Кюсюр в 2007 и 2008 гг. (б)

гидрологические районы бассейна р. Лены: г/п Табага — замыкает Верхнюю и Среднюю Лену, г/п Верхоянский Перевоз — бассейн р. Алдан, правый приток р. Лены, г/п Кюсюр — створ бассейна р. Лены.

Из-за отсутствия данных о скорости потока р. Лены нельзя сделать определенный вывод о соответствии смоделированной скорости потока изме-

ренной, но об этом можно судить по значениям коэффициентов корреляции:  $r = 0,92$  ( $v = \text{const}$ ),  $r = 0,94$  ( $v \neq \text{const}$ ) для 2007 г.;  $r = 0,94$  ( $v = \text{const}$ ) и  $r = 0,96$  ( $v \neq \text{const}$ ) для 2008 г.

Анализ полученных результатов, а также статистических характеристик, представленных в таблице, показывает, что модель сравнительно хорошо воспроизводит суточный речной сток в бассейне

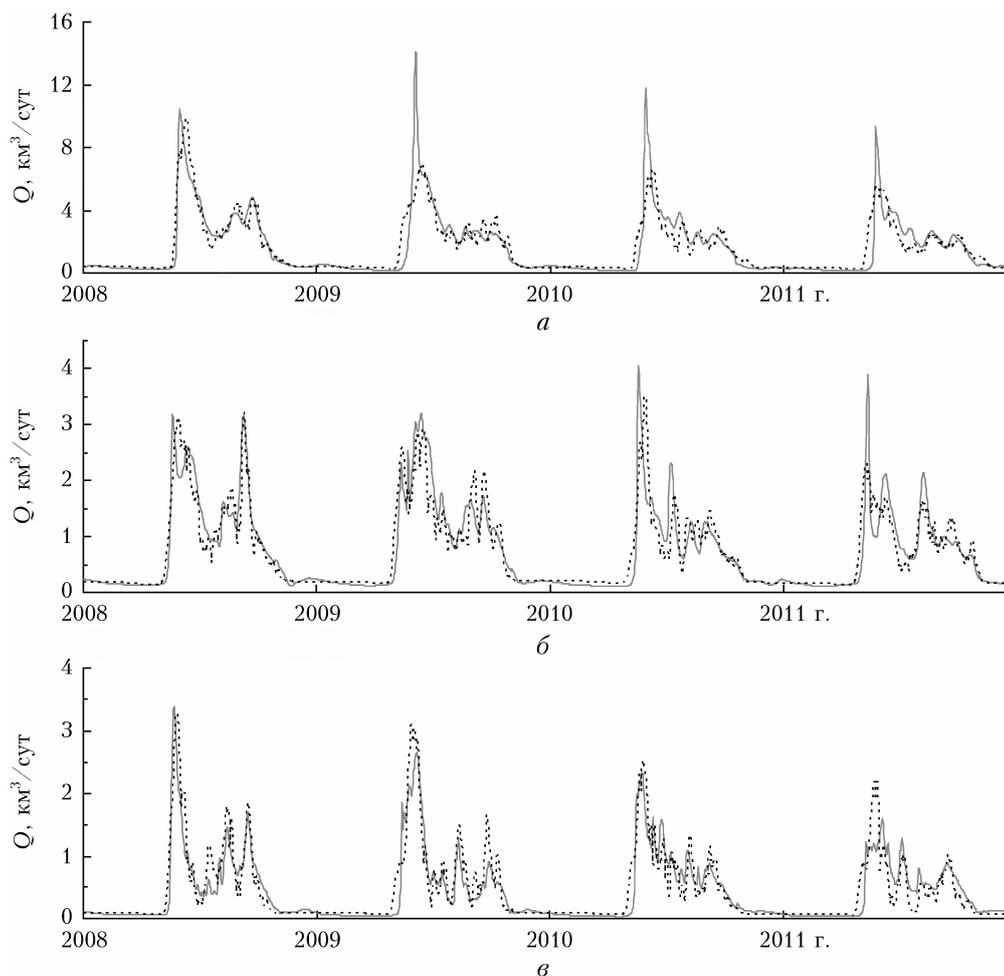


Рис. 3. Динамика наблюдаемых (сплошная серая кривая) и рассчитанных с переменной скоростью (штриховая кривая) суточных значений стока на г/п Кюсюр (а), Табага (б) и Верхоянский Перевоз (в)

**Статистические характеристики (критерий эффективности по Нэшу–Сатклифу  $Eff$  [11], коэффициент детерминации  $R^2$ , стандартное отклонение  $\sigma$ , систематическая ошибка  $Bias$ ) наблюдаемых суточных расходов воды и рассчитанных для двух вариантов скорости речного потока**

Гидропост	Расчетный период, гг.	Постоянная скорость				Переменная скорость			
		$Eff$	$R^2$	$\sigma$	$Bias, \%$	$Eff$	$R^2$	$\sigma$	$Bias, \%$
Кюсюр	1980–2011	0,73	0,74	1,93	4,7	0,81	0,81	1,80	2,8
Кюсюр	2008–2011	0,75	0,76	1,70	-5,8	0,80	0,80	1,70	-4,8
Табага	2008–2011	0,72	0,74	0,70	-9,4	0,83	0,83	0,70	-5,6
Верхоянский Перевоз	2008–2011	0,73	0,78	0,60	0,1	0,8	0,82	0,60	-1,8

р. Лены с двумя вариантами скоростей потока, но моделирование речного стока с переменной скоростью дает лучшие статистические показатели.

### Оценка воздействия изменения климата на тепловой сток

Известно, что увеличение расхода и температуры воды в бассейне р. Лены является климатически обусловленным [1, 7, 9]. На основе суточных данных о температуре [12] и расходе воды, а также модельного расхода воды на г/п Кюсюр с 2002 по 2011 г. выполнена оценка реакции всего бассейна

р. Лены на изменение климата. Данные о температуре воды объединяются с данными о речном стоке для получения оценки теплового потока на замыкающем створе г/п Кюсюр. Рассчитываются две оценки теплового стока на основе данных о расходе воды из архива R-ArcticNet и для модельных расходов по общепринятой формуле [9]:

$$W_T = c_p \rho t W,$$

где  $W_T$  – тепловой сток за декаду или месяц,  $\text{кДж} \cdot 10^{12} \text{ декада}^{-1}/\text{месяц}^{-1}$ ;  $c_p$  – удельная теплоемкость воды ( $4,174\text{--}4,212 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$  в зависимости от температуры воды,  $0^\circ\text{C} \leq t \leq 30^\circ\text{C}$ );  $\rho$  – плот-

ность воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $t$  – средняя за декаду или месяц температура воды,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $W$  – объем стока воды за декаду или месяц,  $\text{м}^3$ .

На рис. 4 представлены среднедекадные температура и модельный расход воды и тепловой поток за 2002–2011 гг. на г/п Кюсюр. Сезонный цикл декадной температуры потока показывает продолжительный период ледяного покрова с ноября по май и период открытой воды с июня по октябрь ( $0,1$ – $16^{\circ}\text{C}$ ) с более высокой температурой потока в июле и августе. Водосборный бассейн р. Лены с высоким покрытием (80–93%) многолетней мерзлоты имеет низкую емкость подповерхностного хранилища и, следовательно, низкий зимний базовый сток и максимум стока в июне, что можно видеть на рис. 4.

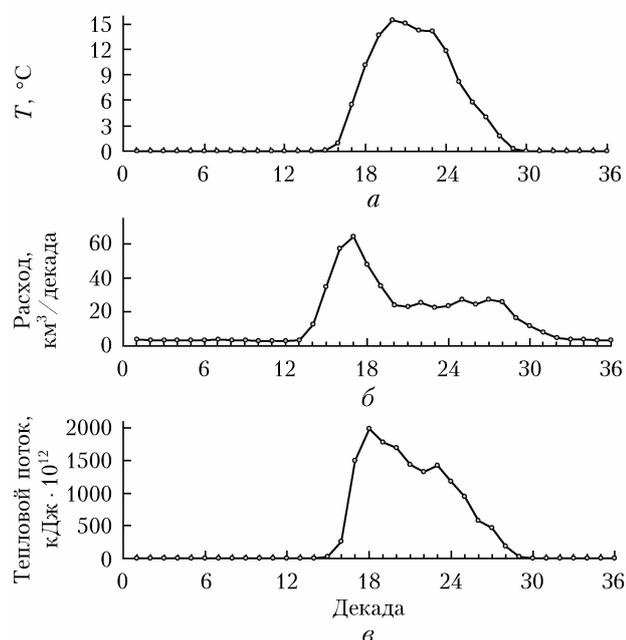


Рис. 4. Среднедекадные температура воды (а), модельный расход воды (б) и тепловой поток (в) за 2002–2011 г. на г/п Кюсюр

Согласно рис. 4, речной сток достигает своего максимального значения раньше других характеристик, а тепловой поток достигает своего максимума между максимумами расхода и температуры воды. Тепловой сток, вычисленный с использованием модельного расхода воды,  $W_T = 14900 \cdot 10^{12}$  кДж, а с использованием наблюдаемого расхода воды –  $17069 \cdot 10^{12}$  кДж. Эти данные согласуются с результатами работ [9, 13]. Период нулевого переноса тепла на г/п Кюсюр длится с ноября по май, когда Нижняя Лена покрыта льдом. Перенос тепла активен в сезон открытой воды: с июня по октябрь. Максимальный перенос тепла и по наблюдениям, и по расчету имеет место в июне и обусловлен в основном большим речным стоком в этом месяце. Тепловой коэффициент  $K_T$  как отношение годового стока теплоты к стоку воды равен  $26,1 \text{ МДж}/\text{м}^3$  для 2002–2011 гг. По величине коэффициента

корреляции между тепловым стоком и температурой ( $r = 0,32$ ), а также между тепловым и речным стоками ( $r = 0,81$ ) можно сказать о доминирующем влиянии водного стока на формирование стока теплоты.

## Заключение

На основе проведенного анализа получены следующие результаты.

1. Построена новая версия региональной модели маршрутизации для моделирования суточных колебаний речного стока, основанная на переменной по времени скорости течения.

2. Показано преимущество моделирования суточных колебаний речного стока с переменной скоростью течения перед моделированием с постоянной скоростью потока.

3. Различия между смоделированными и наблюдаемыми гидрографами стока можно объяснить несколькими источниками ошибок:

– заниженным количеством осадков в реанализе MERRA над территорией бассейна р. Лены за 1980–2011 гг.;

– используемыми аппроксимациями для поперечного сечения и ширины реки.

Результаты исследования могут быть использованы при моделировании динамики океана и формировании ледяного покрова в Северном Ледовитом океане.

**Финансирование.** Исследование было выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 20-05-00241) и в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (проект № 0215-2021-003).

## Список литературы

1. Крылова А.И., Лаптева Н.А. Моделирование речного стока в бассейне реки Лены на основе гидрологически корректной цифровой модели рельефа // Проблемы информатики. 2020. № 4 (49). С. 71–88.
2. Крылова А.И., Лаптева Н.А. Модель маршрутизации речного стока в континентальном масштабе с переменной скоростью потока // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2022. Т. 4. С. 102–108.
3. Кузин В.И., Лаптева Н.А. Математическое моделирование климатического речного стока из Обь-Иртышского бассейна // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 6. С. 539–543; Kuzin V.I., Lapteva N.A. Mathematical simulation of climatic river discharge from the Ob-Irtysh basin // Atmos. Ocean. Opt. 2012. V. 25, N 6. P. 440–445.
4. Arora V.K., Chiew H.S., Grayson R.B. A river flow routing scheme for general circulation models // J. Geophys. Res. 1999. V. 104, N D24. P. 30965–30979.
5. Schulze K., Hunger M., Döll P. Simulating river flow velocity on global scale // Adv. Geosci. 2005. N 5. P. 133–136.
6. Hgo-Duk T., Oki T., Kanae S. A variable streamflow velocity method for global river routing model: Model description and preliminary results // HESSD. 2007. V. 4, N 6. P. 4389–4414.
7. Yang D., Liu B., Ye B. Stream temperature changes over Lena River Basin in Siberia // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32. DOI: 10.1029/2004GL021568.

8. *Liu B., Yang D.* Siberian Lena River heat flow regime and change // Cold Region Hydrology in a Changing Climate. Proceedings of symposium HO<sub>2</sub> held during IUGG2011 in Melbourne, Australia, July 2011 (IAHS Publ. 2011). P. 71–76.
9. *Магрицкий Д.В.* Тепловой сток рек в моря российской Арктики и его изменения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2009. № 5. С. 69–77.
10. *Dingman S.L., Sharma K.P.* Statistical development and validation of discharge equations for natural channels // J. Hydrol. 1997. V. 1, N 199. P. 13–35.
11. *Nash J.E., Sutcliffe J.V.* River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles // J. Hydrology. 1970. V. 10, N 3. P. 282–290.
12. *Fofonova V., Sander L., Papenmeier S., Michaelis R., Wiltshire K.H., Zhilyaev I., Kraineva M., Iakshina D., Tananaev N., Volkova N.* Features of the water temperature long-term observations on the Lena River at basin outlet // Polarforschung. 2017. V. 87, N 2. P. 135–150.
13. *Lammers R.B., Pundsack J.W., Shiklomanov A.I.* Variability in river temperature, discharge, and energy flux from the Russian pan-Arctic landmass // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. P. G04S59.

*A.I. Krylova, N.A. Lapteva.* **Routing of river flow with variable velocity: the case of the Lena river basin.**

A time-varying flow velocity method for a conceptual model of river flow generation is implemented with the aim of improving flow routing in the Lena river basin. In contrast to constant velocity models, this approach uses a time-varying velocity which depends on the amount of flow generated in a land grid cell. The Manning equation is used to estimate flow velocity in the rectangular cross-sectional approximation for the river channel. Numerical experiments with constant and variable flow velocities made it possible to compare the model flow with the observed daily hydrographs at the runoff stations of Kyusyur, Tabaga, and Verkhoyanskiy Perevoz. The work provides an estimate of the heat flow from the Lena river basin to Kyusyur gauging station for 2002–2011.