

А. И. Крылова^{1}, Н. А. Лантева²*

Оценка теплового потока с бассейна реки Лена

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

²Федеральное 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 статье представляется оценка теплового потока с бассейна реки Лена, полученная на основе модельного расхода и данных о температуре и расходе воды на г/п Кюсюр за период с 2002-2011 гг. Моделирование расхода выполняется на основе концептуальной модели гидрологического стока. В качестве данных о температуре воды используются средние декадные данные за рассматриваемый период. Проводится анализ и дается сравнение полученных оценок теплового потока с существующими многолетними оценками за период 1935 – 2012 гг. и современными оценками теплового потока. Установлено, что в течении большей части периода открытой воды доминирующим фактором в оценке теплового потока является речной сток, а в июне месяце тепловой поток полностью контролируется температурой воды.

Ключевые слова: концептуальная модель, речной сток, температура воды, тепловой поток

A. I. Krylova^{1}, N. A. Lapteva²*

Estimation of heat flow from the Lena River basin

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. The paper presents an estimate of the heat flow from the Lena River basin, obtained on the basis of a model runoff and data on the temperature and water flow at the gauging station of Kyusyur for the period from 2002 to 2011. Discharge modeling is based on a conceptual hydrological flow model. Ten-day averages for the period under consideration are used as water temperature data. The obtained estimates of heat flow are analyzed and compared with the existing multi-year estimates for the period 1935 - 2012 and the modern estimates of heat flow. It was found that during most of the open water period, river flow is the dominant factor in estimating heat flow, and in June the heat flow is completely controlled by water temperature.

Keywords: conceptual model, river flow, water temperature, heat flow

Введение

Речной сток и температура воды являются двумя основными показателями, характеризующими реакцию водосбора на изменение климата. Исследования показали, что сток реки Лена за последние десятилетия претерпел значительные изменения, т.е. увеличение в зимний, весенний и летний сезоны и уменьшение в осенний

сезон, в связи с изменением климата [1-3]. А за период с 1950-1992 гг. в бассейне реки Лена наблюдалось повышение температуры воды в начале теплого сезона [4, 5]. Это может свидетельствовать о возросшем тепловом воздействии реки Лена на экологию в дельте и на динамику морского льда в море Лаптевых.

Необходимо сказать о существующих оценках теплового потока реки Лена и проблемах с ними связанных.

В работе [6] приводятся долгосрочные оценки теплового потока от 14,0 до 15,7 EJ/год, основанные на данных о температуре воды и расходу на г/п Кюсюр за период 1935-2012 гг. Точность этих оценок зависит от доступности данных из сети долгосрочных наблюдений и качества этих данных. Суточные данные по рекам России в основном недоступны и оценки были основаны на средних значениях за 10 дней, что может приводить к погрешности осреднения. В работе [7] на основе результатов моделирования была поставлена под сомнение репрезентативность данных о температуре потока на г/п Кюсюр за период 2002-2011 гг. И после проведения полевых наблюдений в 2018 году было подтверждено происхождение струи холодной воды вдоль правого берега р. Лена в районе г/п Кюсюр от многочисленных мелких правобережных притоков. Это приводило к занижению температуры воды на $\sim 0,8$ °C по сравнению с температурой воды среднего течения или средней по сечению. В 2019 году в работе [8] были приведены доказательства этого и пересмотрена оценка современного теплового потока р. Лена за период с 2002-2011 гг., которая составила $17,6 \pm 2,8$ EJ/год, что подтверждает тенденции к росту, как температуры потока, так и его расхода.

Река Лена приносит 563 км^3 в год пресной воды в море Лаптевых (среднегодовой объем за период с 1980 – 2014 гг.) или около 20% от общего объема пресной воды в Северный Ледовитый океан.

Методы и материалы

Оценки теплового потока рассчитываются на основе общепринятой формулы Елшина Ю.А. [9]

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

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 ($4,174 - 4,212 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ в зависимости от температуры воды, $0^\circ\text{C} \leq t \leq 30^\circ\text{C}$), ρ – плотность воды ($\text{кг}/\text{м}^3$), t – средняя за декаду или месяц температура воды ($^\circ\text{C}$), W – объем стока воды (м^3) за декаду или месяц.

В статье даются две оценки теплового стока, которые получены на основе модельного расхода, вычисленного по концептуальной модели гидрологического расхода [10], и данных о расходе из архива R-ArcticNet [11].

Оценки теплового стока с бассейна р. Лена на г/п Кюсюр составляют с использованием модельного расхода воды 15 EJ/год, с использованием данных о расходе воды из архива R-ArcticNet 17 EJ/год, из работы Магрицкого Д.В. [6] (2017 г.) 15,6 EJ/год и из работы Тананаева Н.И. [8] (2019 г.) $17,6 \pm 2,8$ EJ/год.

Полученная оценка теплового стока с использованием модельного расхода близка к приведенным оценкам.

Результаты

На рис. 1 представлены среднедекадные температура воды, модельный и наблюдаемый расход и тепловой поток за период 2002-2011 на г/п Кюсюр, которые позволяют определить сезонность и межгодовую изменчивость теплового потока.

Среднедекадные значения температуры указывают на наличие периода открытой воды с начала июня и до середины октября. Максимальные значения поднимаются до ~ 16 °С к середине июля, а затем постепенно снижаются до $0,2$ °С к середине октября. Поскольку нет данных о температуре воды в период ледостава, мы приняли температуру воды равной 0.

Бассейн реки Лена почти на 90% покрыт многолетней мерзлотой, а значит, имеет незначительную емкость для подповерхностного хранилища влаги. Сезонный цикл речного стока на среднем рисунке показывает период низкого стока с ноября по апрель и сезон высокого стока с мая по октябрь. Максимальный сток имеет место в июне, вызванный паводками от таяния снега. Речной сток по данным R-ArcticNet больше, чем модельный расход в половодье.

Согласно данным о температуре потока период нулевого переноса тепла определяется с ноября по май, когда нижняя Лена покрыта льдом. Перенос тепла активен в сезон открытой воды, примерно с июня по октябрь. Максимальный перенос тепла в июне обусловлен большим водным потоком.

Тепловой поток, вычисленный по наблюдаемому речному стоку выше, чем тепловой поток соответствующий модельному расходу в июле месяце.

Дальнейший анализ данных показывает, что период открытой воды для теплового потока подразделяется на период, контролируемый температурой и период, контролируемый речным стоком. Это стало понятным, когда был рассчитан коэффициент корреляции внутри периода открытой воды между тепловым потоком и температурой и, тепловым потоком и речным стоком. Из табл. 1 видно, что тепловой поток в июне контролируется температурой, а в большей части периода открытой воды речным стоком.

Межгодовая изменчивость месячной температуры на г/п Кюсюр достаточно велика и показывает увеличение температуры за период 2002 – 2011 год (рис. 2а).

Тренд межгодовой изменчивости показывает, что модельный речной сток не увеличился за выбранный период, в то время как наблюдаемый речной сток имеет тенденцию к росту (рис. 2б).

Межгодовая изменчивость теплового потока значительно варьирует по годам. Годовой суммарный тепловой поток за период с 2002 – 2011 гг. на г/п Кюсюр увеличился (рис. 2в).

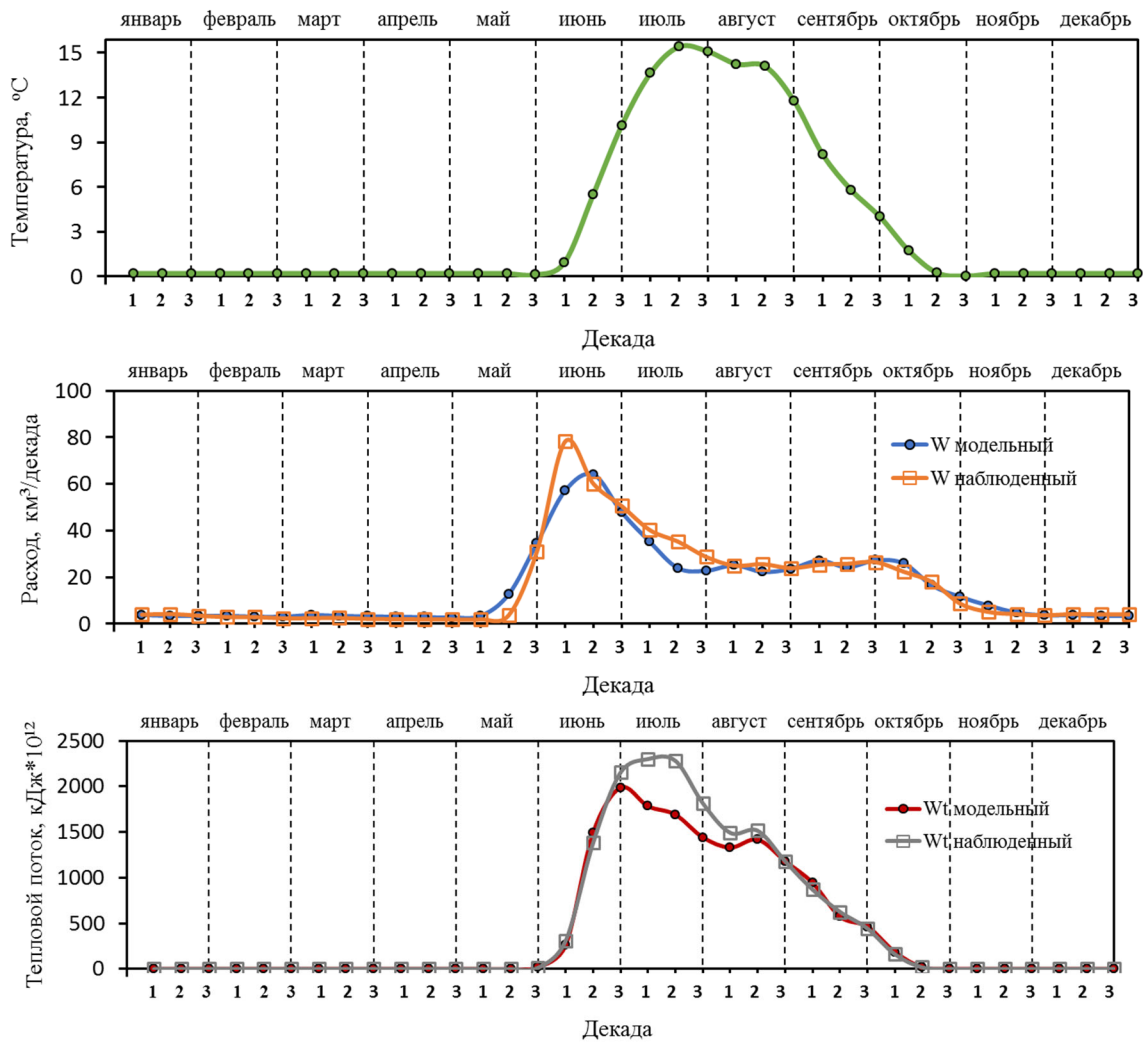


Рис. 1. Среднедекадные температура воды, модельный и наблюдаемый расход и тепловой поток за период 2002 – 2011 год на г/п Кюсюр.

Таблица 1

Периоды теплового потока для открытой воды, контролируемые расходом или температурой

Месяц	Декада	Коэффициент корреляции между	
		расходом и тепловым потоком	температурой и тепловым потоком
Июнь	1	0,85	0,98
	2	0,52	0,90
	3	0,22	0,74
Июль	1	0,65	0,13
	2	0,87	-0,34
	3	0,95	0,23
Август	1	0,88	-0,28
	2	0,88	0,11
	3	0,95	0,57
Сентябрь	1	0,90	0,46
	2	0,84	0,19
	3	0,89	0,73
Октябрь	1	0,82	0,96
	2	0,59	0,97

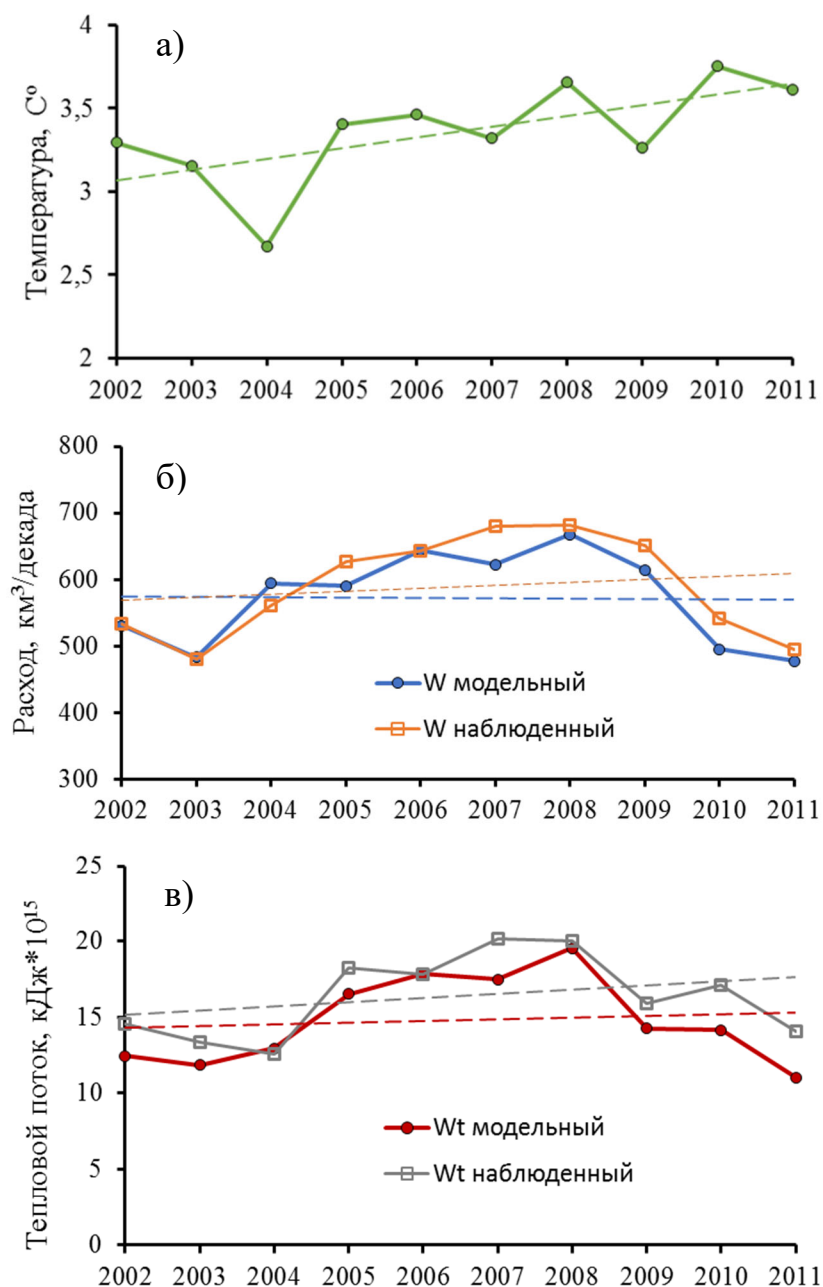


Рис. 2. Межгодовая изменчивость температуры, модельного расхода и теплового потока

Обсуждение

В работе приведены оценки теплового стока с бассейна р. Лена на г/п Кюсюр за период 2002-2011 гг. Одна из оценок получена по модельному расходу, рассчитанному по концептуальной модели гидрологического расхода и деkadным данным по температуре воды. Другая оценка получена по данным о расходе воды из архива R-ArcticNet и тех же данных о температуре воды. Сравнение оценок показывает, что тепловой сток по данным о расходе воды больше теплового стока, полученного по модельному расходу. Это объясняется заниженными значениями модельного расхода, обусловленными недооцененными осадками над бассейном р. Лена из реанализа MERRA [12].

Заключение

В статье оценивается режим теплового потока с бассейна реки Лена. Результаты показывают, что за период 2002-2011 гг. тепловой поток на г/п Кюсюр увеличился. Самое большое увеличение теплового потока произошло в июле, и объясняется ростом температуры потока в этом месяце. В течении большей части периода открытой воды речной сток контролирует величину теплового потока, но в июне тепловой поток полностью контролируется температурой воды.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ИВМиМГ СО РАН (проект №0215-2021-003).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. 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.
3. Overeem I., Syvitski J. P. M Shifting discharge peaks in Arctic rivers, 1977–2007 // *Geogr. Ann. Ser. Phys. Geogr.* – 2010. – V. 92(2). – P. 285–296. DOI: 10.1111/j.1468-0459.2010.00395.x
4. 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.* – 2002. – V. 107(D23). – 4694. DOI: 10.1029/2002JD002542.
5. Yang D., Liu B., Ye B. Stream temperature changes over Lena River Basin in Siberia // *Geophys. Res. Lett.* – 2005. – V. 32. – L05401. DOI: 10.1029/2004GL021568.
6. Magritsky D. V., Mikhailov V. N., Aybulatov D. N., Fofonova V. V., Bolshiyarov D. Y Geographical profile of the Lena Delta area and a history of hydrologic investigation of the Lena River lower reach and delta // *Polarforschung.* – 2017. – V. 87. – № 2. – P. 81–88.
7. 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. – № 2. – P. 135–150.
8. Tananaev N. I., Georgiadi A. G., Fofonova V. V. Revising Contemporary Heat Flux Estimates for the Lena River, Northern Eurasia // *Hydrology Research.* – V. 50. – № 5. – P. 1440–1452. <https://doi.org/10.2166/nh.2019.062>.
9. Ёлшин Ю. А. Тепловой сток в моря Северного Ледовитого океана // *Водные ресурсы.* – 1988. – Т. 5, – С. 63–68.
10. Крылова А. И., Лаптева Н. А. Моделирование речного стока в бассейне реки Лены на основе гидрологически-корректной цифровой модели рельефа // *Проблемы информатики.* – 2020. – №4. – С. 71–88.
11. [Электрон. Рес.]: <http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html>.
12. [Электрон. Рес.]: <https://gmao.dsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA>.

© А. И. Крылова, Н. А. Лаптева, 2023