

А. И. Крылова^{1✉}, Н. А. Лаптева²

Схематизация Обь-Иртышского бассейна. Предварительные результаты моделирования

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

²Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии "Вектор" Роспотребнадзора,
Новосибирская область, р.п. Кольцово, Российская Федерация
e-mail: alla@climate.sccc.ru

Аннотация. В работе представлено построение схематизированной гидрографической сети Обь-Иртышского бассейна как основы концептуальной гидрологической модели. Согласно модельной сети водосбора составлена карта маршрутизации, которая определяет для каждой пространственной ячейки сетки в какую соседнюю ячейку передается речной сток. Построенная карта-схема модельной гидрографической сети реки Обь и ее подбассейнов позволила провести первые численные эксперименты по расчету речного стока на основе новой версии концептуальной гидрологической модели в нижнем бьефе Бухтарминской ГЭС и нижнем течении р. Обь от гидропоста Белогорье до замыкающего створа водосбора гидропоста Салехард.

Ключевые слова: Обь-Иртышский бассейн, схематизация гидрографической сети, концептуальная гидрологическая модель, речной сток

A. I. Krylova^{1✉}, N. A. Lapteva²

Schematics of the Ob-Irtysh basin. Preliminary simulation results

¹Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²State Research Center of Virology and Biotechnology "Vector" of Rospotrebnadzor,
Novosibirsk Region, Koltsovo, Russian Federation
e-mail: alla@climate.sccc.ru

Abstract. The paper presents the construction of a schematized hydrographic network of the Ob-Irtysh basin as the basis for a conceptual hydrological model. According to the model catchment network, a routing map has been created that determines which neighboring grid cell receives river flow each spatial grid cell. The constructed map-scheme of the model hydrographic network of the Ob River and its sub-basins allowed the first numerical experiments to calculate river flow based on a new version of the conceptual hydrological model in the lower reaches of the Bukhtarminskaya HPP and the lower reaches of the Ob River from Belogorye to the Ob River outlet.

Keywords: Ob-Irtysh basin, schematization of hydrographic network, conceptual hydrological model, river flow

Введение

В связи с климатическими изменениями в последние десятилетия в Арктическом регионе, в частности, в Северном Ледовитом океане (СЛО) наблюдается увеличение приземной температуры воздуха и осадков, что повлияло на режим

стока арктических рек, в том числе самых крупных сибирских рек: Оби, Енисея, Лены [1 - 4].

Река Обь является одной из крупнейших арктических рек, приносящая почти 15% пресной воды в СЛО [5]. Сложный гидрологический режим реки обусловлен в основном снеготаянием весной, осадками и испарением летом и осенью. Его изменение может повлиять на климат за счет увеличения притока пресной воды в СЛО [6, 7].

Для изучения влияния изменения баланса пресной воды в СЛО на климатическую систему необходимо включить модель речного стока, чтобы замкнуть гидрологический цикл. Для этой цели были разработаны концептуальная гидрологическая модель и ее новая версия, которая успешно была применена к бассейну р. Лена [8, 9]. Оценка влияния изменения климата на гидрологию Обь-Иртышского бассейна на основе концептуальной модели требует построения модельной гидрографической сети в качестве первого этапа моделирования годовых и сезонных потоков в масштабе бассейна. Водосборный бассейн р. Обь, как типично равнинной реки, имеет природные особенности: малые уклоны, сложные поймы рек, широкие заболоченные долины, которые представляют основные трудности для моделирования речного стока. Встает вопрос в рамках исследования: возможно ли продолжить моделирование крупномасштабной гидрологии бассейна р. Обь с целью определения его реакции на глобальное потепление на основе концептуальной гидрологической модели, как это имело место для бассейна р. Лена. Прежде чем пытаться ответить на вопрос как гидрология бассейна взаимодействует с поверхностным водотоком через речную сеть, необходимо ее схематизировать.

Модельная схематизация бассейна

Основой концептуальной гидрологической модели является карта маршрутизации или карта направлений движения потоков пресной речной воды с речного водосбора в океан. Ее построение осуществляется на основе цифровой модели рельефа поверхности водосбора. Качество расчетов гидрографов стока в замыкающем створе речного бассейна в большой степени зависит от согласованности площади модельного водосбора с его реальной площадью. В противном случае могут возникнуть ошибки в представлении объема воды и времени движения потока.

Схематизация Обь-Иртышского бассейна и построение его дренажной сети выполнены на основе цифровой модели рельефа, полученной по глобальным данным радарной интерферометрической съемки SRTM30 [10]. Фрагмент данных, включающий бассейн, был преобразован с помощью метода геостатического моделирования кригинг в массив топографических данных на регулярной сетке разрешением $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$. Построение такой гидрологически-корректной цифровой модели, в которой форма и направление смоделированных потоков были бы близки к реальным, выполнялось с помощью программ вычисления файлов направлений и кумулятивного стока для каждой ячейки сетки. Направления стока формируются с помощью метода D8 (Deterministic Eight-Neighbor), а

определение кумулятивного стока – это вычисление числа всех ячеек, чей сток попадает в ячейку, лежащую вниз по склону. Ячейки с самым большим числом кумулятивного стока образуют линии, выделяющиеся на фоне всех остальных ячеек. Эти линии - главные для создания сети водотоков. После преобразования данных по методу кригинг необходима была ручная доработка.

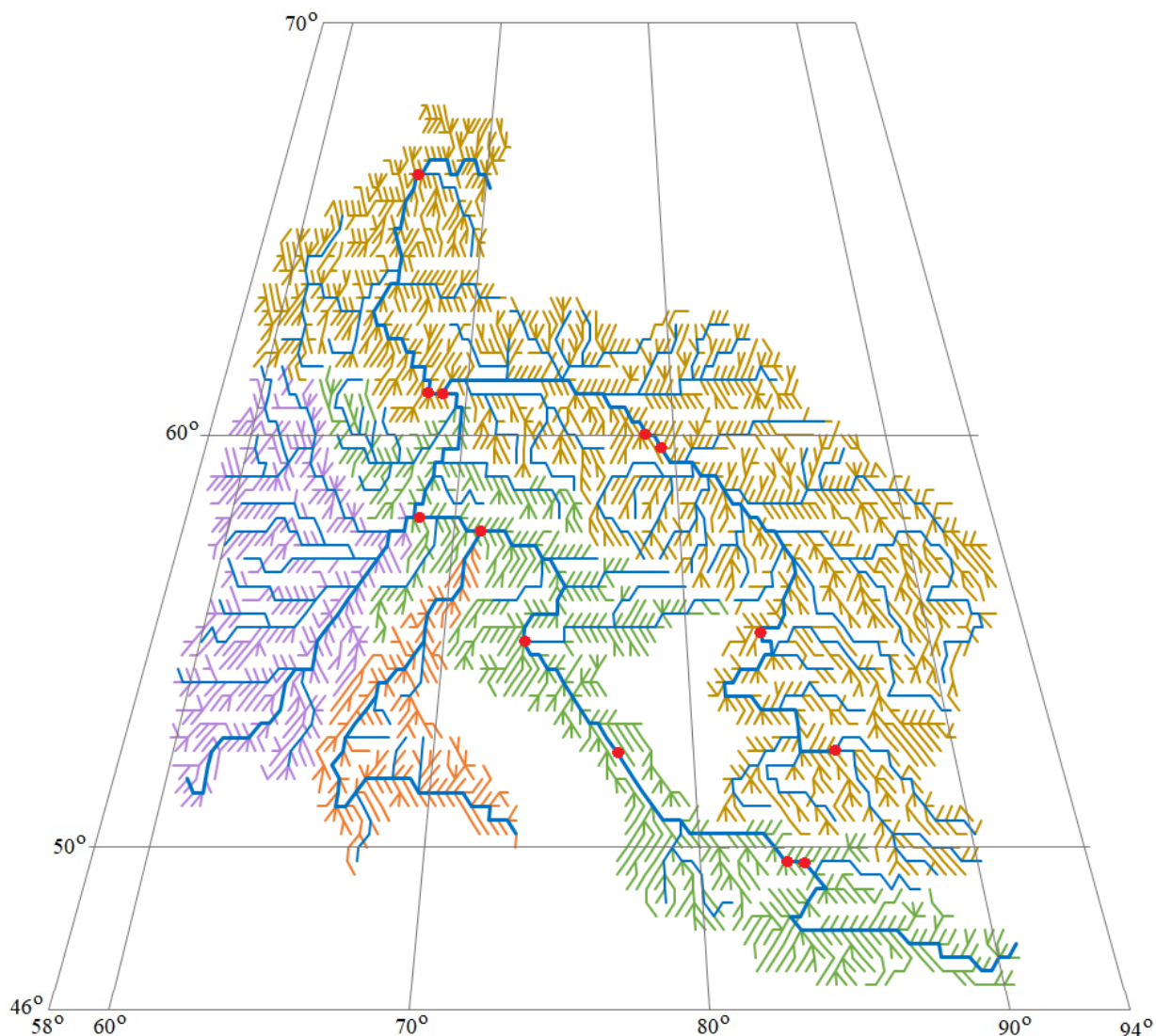


Рис. 1. Схематизация Обь-Иртышского бассейна на сетке $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$

Для этой цели использовались топографические карты масштабов 1:50000, 1:1000000 для определения и уточнения высот рельефа речных ячеек, представляющих основной путь, и поверхностных ячеек, окружающих речные ячейки.

На рис. 1 представлена построенная карта-схема модельной гидрографической сети реки Обь и ее подбассейнов. Для Обь-Иртышского бассейна общее число расчетных ячеек разрешением $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$ составило 3980 ячеек, из них 1122 ячейки приходятся на речные. Модельное речное дерево бассейна включает

80 притоков, основными из которых являются Бия, Катунь, Томь, Чулым, Иртыш, Ишим, Тобол.

Одна из проблем, которая проявилась после схематизации, состоит в том, что высокая степень меандрирования рек Оби и Иртыша слабо отражается сеткой $(1/3)^\circ \times (1/3)^\circ$ (таблица), хотя площадь модельного водосбора достаточно близка к площади реального. В таблице коэффициент извилистости – это отношение длины модельного участка к реальной длине и напрашивается вывод что сетка груба для определенных участков рек.

Таблица. Расстояние между гидропостами по Иртышу и Оби

Маршрут между гидропостами	Расстояние, км		Коэффициент извилистости
	реальное	модельное	
Бухтарминская ГЭС – Усть-Каменогорская ГЭС	150	68	0,46
Усть-Каменогорская ГЭС – Павлодар	550	545	0,99
Павлодар – Омск	570	411	0,72
Омск – Екатеринбург	300	265	0,88
Омск – Тобольск	1219	771	0,63
Тобольск – Ханты-Мансийск	630	419	0,66
Ханты-Мансийск – Белогорье	30	36	1,21
Ханты-Мансийск – Салехард	1000	848	0,85
Прохоркино – Александровское	195	120	0,62
Белогорье – Салехард	970	812	0,84

Предварительные численные эксперименты

В данной работе представлены первые результаты по моделированию речного стока в нижнем бьефе Бухтарминской ГЭС, расположенной на территории Казахстана, и в нижнем течении р. Обь от гидропоста Белогорье до замыкающего створа бассейна гидропоста Салехард на основе новой версии концептуальной гидрологической модели.

Расчеты расхода в нижнем бьефе ГЭС показывают, что модельная волна опережает наблюдаемую почти на месяц. Кроме этого, ее амплитуда значительно больше наблюдаемой (рис. 2). Одно из решений этой проблемы - учет ежегодных специальных длительных попусков из водохранилища во время половодья для затопления пойм и лиманное орошение с целью создания устойчивых урожаев кормов и нереста рыбы. Для этого необходимо иметь информацию о попусках, которой мы пока не располагаем.

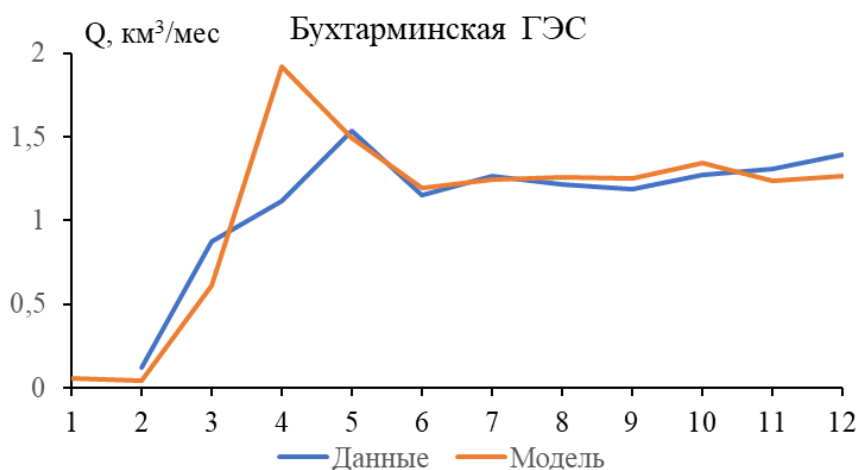


Рис. 2. Сравнение модельного и наблюдаемого расходов, осредненных за период с 1980 по 1985 гг., на нижнем бьефе Бухтарминской ГЭС.

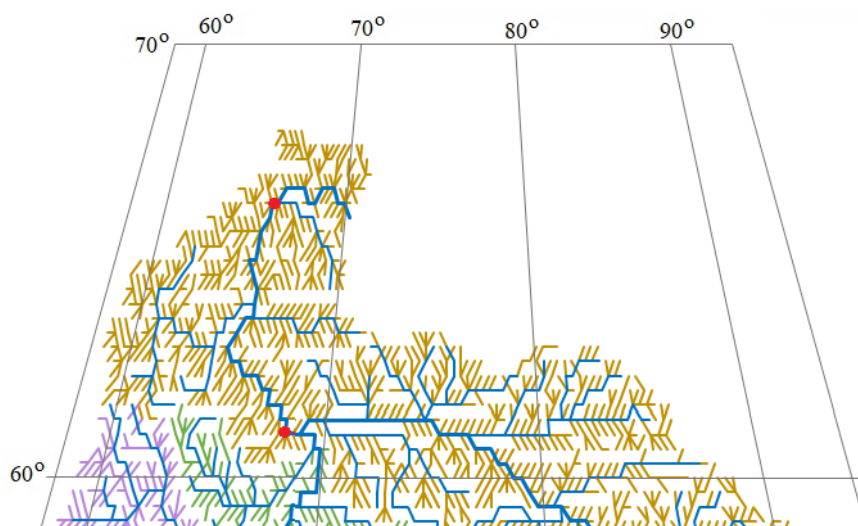


Рис. 3. Участок низовья реки Обь «Белогорье – Салехард»

Моделирование речного стока в нижнем течении р. Обь рассматривалось как решение начально-краевой задачи с начальными данными в Белогорье. Поступление речного стока в область исследования из верхнего течения реки определяется суточным расходом, измеренным на гидропосту Белогорье [11]. Для сравнения модельного расхода с наблюдаемым использовались данные о расходе, измеренные в Салехарде. На рис. 3 представлено расположение гидропостов на карте-схеме, расстояние между которыми по реке около 950 км. Боковой приток к реке в исследуемой области рассчитывался по однопараметрической линейной резервуарной модели [8]. Атмосферные данные, используемые в качестве входных (осадки, испарение, приземная температура воздуха) получены из архива реанализа MERRA [12]. Построенная карта-схема маршрутизации позволяет всем ячейкам бассейна вносить свой вклад в боковой приток.

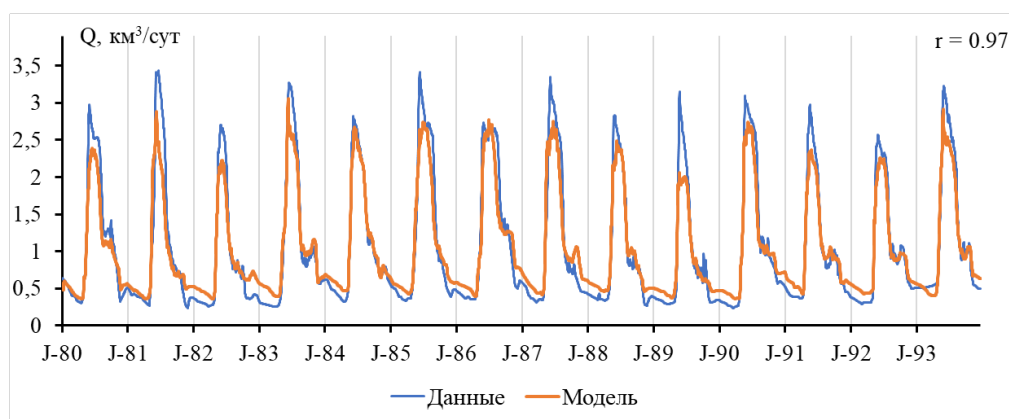


Рис. 4. Сравнение модельного и измеренного годового хода расхода на г/п Салехард для периода 1980 – 1993 гг.

Для всех смоделированных расходов воды, как и для измеренных, за 14-летний период с 1980 г. по 1993 г. четко проявлен характер годового цикла водного режима бассейна (период зимней межени: январь-март, ноябрь-декабрь; весеннее половодье: апрель-июль; летне-осенние паводки: август-октябрь) (рис. 4). Речной сток моделируется достаточно хорошо (коэффициент корреляции r равен 0.97), хотя модель недооценивает максимальный расход в половодье.

Заключение

Данное исследование показывает, что можно смоделировать речной сток сложного Обь-Иртышского бассейна на основе концептуальной гидрологической модели, используя натурные измерения расхода воды из архива R-ArcticNet для стока вверх по течению от гидропоста Белогорье. Необходимо в дальнейшем провести тесты на чувствительность к данным об осадках из архива MERRA, которые являются ключевым фактором в модели. Необходимо исследовать возможность учета в модели взаимодействия поверхностного стока со сложными поймами и болотными массивами, расположенными в междуречье. Совместно с результатами исследования [13], в котором изучалось гидродинамическое моделирование речного стока нижней Оби, моделирование на основе концептуальной гидрологической модели может внести свой вклад в понимание гидрологического режима Обь-Иртышского бассейна.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания ИВМиМГ СО РАН (проект FWNM - 2025 - 0003).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Doscher R., Vihma T., Maksimovich E. Recent advances in understanding the Arctic climate system state and change from a sea ice perspective: A review // Atmos. Chem. Phys. - 2014. - V. 14 - №7. - P. 10929-10999. DOI: 10.5194/acpd-14-10929-2014.

2. Peterson B. J., Holmes R. M., McClelland J. W., Vorosmarty C. J., Shiklomanov I. A., Shiklomanov A. I., Lammers R. B., Rahmstorf S. Increasing river discharge to the Arctic Ocean // *Science*. - 2002. - V. 298. - P. 2171–2173. DOI: 10.1126/science.1077445.
3. 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.
4. 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
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 // *J. Geophys. Res.* - 2006. - V. 111. - C11010. DOI: 10/1029/2005JC003424.
6. Shiklomanov A. I., Lammers 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.
7. Broecker W.S. The great ocean conveyor // *Oceanography*. - 1991. - V.4/2. - P. 79-89. DOI: 10.5670/OCEANOLOG.1991.07
8. Кузин В. И., Лаптева Н. А. Математическое моделирование климатического речного стока из Обь-Иртышского бассейна // *Оптика атмосферы и океана*. - 2012. - Т. 25. - № 6. - С. 539-543.
9. Krylova A. I., Lapteva N. A. Modeling Long-Term Dynamics of River Flow in the Lena River Basin Based on a Distributed Conceptual Runoff Model // *Water Resources*. - 2024. - V. 51. - No. 4. - P. 393–404. DOI:10.1134/S0097807824700854.
10. [Электрон. Рес.]: <https://gmvo.skniivh.ru/index.php?id=505>
11. [Электрон. Рес.]: <http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/index.html>
12. [Электрон. Рес.]: <https://gmao.dsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA>
13. Biancamaria S., Bates P.D., Boone A., Mognard N. M. Large-scale coupled hydrologic and hydraulic modelling of the Ob River in Siberia // *Journal of Hydrology*. - 2009. - V. 379. - P. 136–150.

© А. И. Крылова, Н. А. Лаптева, 2026