

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА ВОДОХРАНИЛИЩЕМ КАСКАДА ВИЛЮЙСКИХ ГЭС – I, II НА ВОДНЫЙ РЕЖИМ Р. ВИЛЮЙ

Алла Ивановна Крылова

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, тел. (383) 330-64-50, e-mail: alla@climate.sccc.ru

Наталья Александровна Лаптева

Федеральное бюджетное учреждение науки Государственный научный центр вирусологии и биотехнологии «Вектор» Роспотребнадзора, 630559, Россия, Новосибирская область, Новосибирский район, р. п. Кольцово, АБК, старший научный сотрудник, тел. (383)363-47-00, e-mail: lapteva@vector.nsc.ru

На основе использования совместной линейной модели формирования поверхностного и речного стоков и гидрологически–корректной цифровой модели рельефа бассейна р. Вилюй рассмотрено влияние Вилюйского водохранилища на речной сток реки. Приводятся результаты многолетнего моделирования естественного и зарегулированного стока, основанные на данных глобальной базы реанализа MERRA за период 1985-2005 гг. Модельные результаты сравниваются с данными наблюдений за расходом воды из архива R-Arcticnet. Согласно статистическим критериям эффективности расчёта по Нэшу-Сатклиффу *Eff* и систематической ошибки *Bias* совместная линейная модель, базирующаяся на корректной модельной гидрографической сети, позволяет воспроизводить гидрографы суточного и месячного стоков с хорошим качеством. При этом требуется калибровка двух корректирующих множителей к температуре приземного воздуха и к перераспределению влагонаполнения между поверхностным и подземным стоком.

Ключевые слова: гидрограф стока, линейная модель, цифровая модель рельефа, водохранилище, река Вилюй.

STUDY OF THE INFLUENCE OF DRAIN REGULATION BY THE RESERVOIR OF THE CASCADE OF THE VILUIAN HYDROPOWER STATIONS – I, II ON THE WATER REGIME OF RIVER VILYUY

Alla I. Krylova

The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 6, Ac. Lavrentieva ave., Novosibirsk, 630090, Russia, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, tel. (383) 330-64-50, e-mail: alla@climate.sccc.ru

Natalya A. Lapteva

Federal Budgetary Research Institution “State Research Center of Virology and Biotechnology “Vector” Rospotrebnadzor, 630559, Russia, Novosibirsk region, Koltsovo, Senior staff scientist of department of Biophysics and Ecological, tel. (383)363-47-00; e-mail: lapteva@vector.nsc.ru

Based on the use of a joint linear model for the formation of surface and river flows and a hydrologically correct digital relief model for the river basin. Vilyui, the influence of the Vilyui reservoir on the river flow of the river is considered. The results of long-term modeling of natural and

regulated runoff based on data from the global MERRA reanalysis database for the period 1985-2005 are presented. Model results are compared with observations of water flow from the R-Arcticnet archive. According to the statistical criteria for the efficiency of the Nash-Sutcliffe calculation Eff and the Bias systematic error, the joint linear model based on the correct model hydrographic network allows reproducing hydrographs of daily and monthly flows with good quality. This requires the calibration of two correction factors to the temperature of the surface air and to the redistribution of moisture content between the surface and underground runoff.

Key words: runoff hydrograph, linear model, digital elevation model, reservoir, Vilyui river.

Введение

Цель настоящей работы – исследовать влияние регулирования речного стока водохранилищем каскада Вилюйских ГЭС – I, II на водный режим р. Вилюй на основе совместной линейной модели формирования поверхностного и речного стоков.

При исследовании изменения режима стока в нижних бьефах водохранилищ, как неустановившегося течения в открытых руслах, как правило, ограничиваются одномерной постановкой задачи, основанной на использовании основных уравнений Сен-Венана. Для численного решения уравнений Сен-Венана требуются морфометрические характеристики русла и поймы на значительном удалении от плотины гидроузла. При отсутствии данной информации для расчётов зарегулированных расходов на протяжении нижнего бьефа водохранилищ в приближении квазиустановившегося течения успешно используется линейный метод Калинина – Милюкова [1, с. 20-25]. Этот метод лежит в основе линейной модели формирования поверхностного стока с территории бассейна, рассматриваемой в данной работе.

Использование совместной линейной модели формирования поверхностного и речного стоков, представленной в [2, с.52-53], и гидрологически-корректной цифровой модели рельефа бассейна р. Вилюй позволило провести расчёты гидрографов стока за период 1985-2005 гг. и провести сравнение с данными наблюдений на четырёх гидропостах, расположенных на р. Вилюй, - Усть-Амбардаах, Сюльдюкар, Сунтар, Хатырык-Хомо и створе ГЭС – п. Чернышевский.

В таблице 1 приведены основные параметры крупнейшего в стране Вилюйского водохранилища [3, с.19].

На реке построены каскад Вилюйских ГЭС – I, II и Светлинская ГЭС (Вилюйская ГЭС – III), которые являются основным источником электроэнергии для добывающей промышленности и нужд населения.

Бассейн Вилюя (рис. 1) находится в умеренном климатическом поясе, в зоне лиственничной тайги. Климат резко континентальный. В год выпадает в среднем 300-400 мм осадков (преимущественно летом). Толщина снежного покрова не превышает 0,9 м. Питание реки смешанное с преобладанием снегового.

Основные параметры Вилюйского гидроузла

Контролируемый расход воды, м ³ /с	632
Параметры водохранилища:	
- площадь водного зеркала, км ²	2360
- полный объем, млн.м ³	40410
- полезный объем, млн.м ³	22360
Вид регулирования стока	многолетнее
Максимальный напор, м	70
Энергетические показатели:	
- установленная мощность, МВт	648
- среднегодовое производство энергии, млн. кВт•ч	2500



Рис. 1. Карта-схема бассейна р. Вилюй

Методы исследования и информационное обеспечение моделей

Для воспроизведения стока с бассейна р. Вилюй в работе используются два типа линейных моделей стока: линейная модель трансформации поверхностного и подземного стоков с учётом времени добега до участков речной сети [4] и линейная модель формирования водного баланса в русловой сети [5,6,7,8]. Описание этих моделей приведено в работах [2,9]. В соответствии с построенной гидрологически-корректной цифровой моделью рельефа разрешением $(1/3)^0 \cdot (1/3)^0$, описание которой будет дано ниже, определена модельная поверхностная гидрографическая сеть бассейна р. Лены, в том числе бассейна р. Вилюй, как её подбассейна. На основе линейных моделей стока и модельной гидрографической

сети, схематизированной в виде графа связанных ячеек, рассчитывается динамика запасов и расхода воды в каждой расчётной ячейке [10].

В качестве информационного обеспечения модели использовалась глобальная база данных реанализа MERRA по метеорологическим параметрам за 1980 – 2011 гг. [11]. Для инициализации линейных моделей требуются входные распределённые поля поверхностного и подземного стоков в каждой ячейке гидрографической сети, которые обычно недоступны для измерений. Эти переменные получены из данных об осадках, испарении и приземной температуре воздуха глобальной базы данных MERRA.

Схематизация бассейна реки Вилюй

Для того, чтобы количественно воспроизвести основные закономерности трансформации поступившей на водосбор воды (осадков) на основе линейных моделей стока необходимо провести схематизацию бассейна и её гидрографической сети. В пределах исследуемого бассейна схематизация позволяет выделить элементарные, входящие в бассейн, водосборы с учётом границ водоразделов [2].

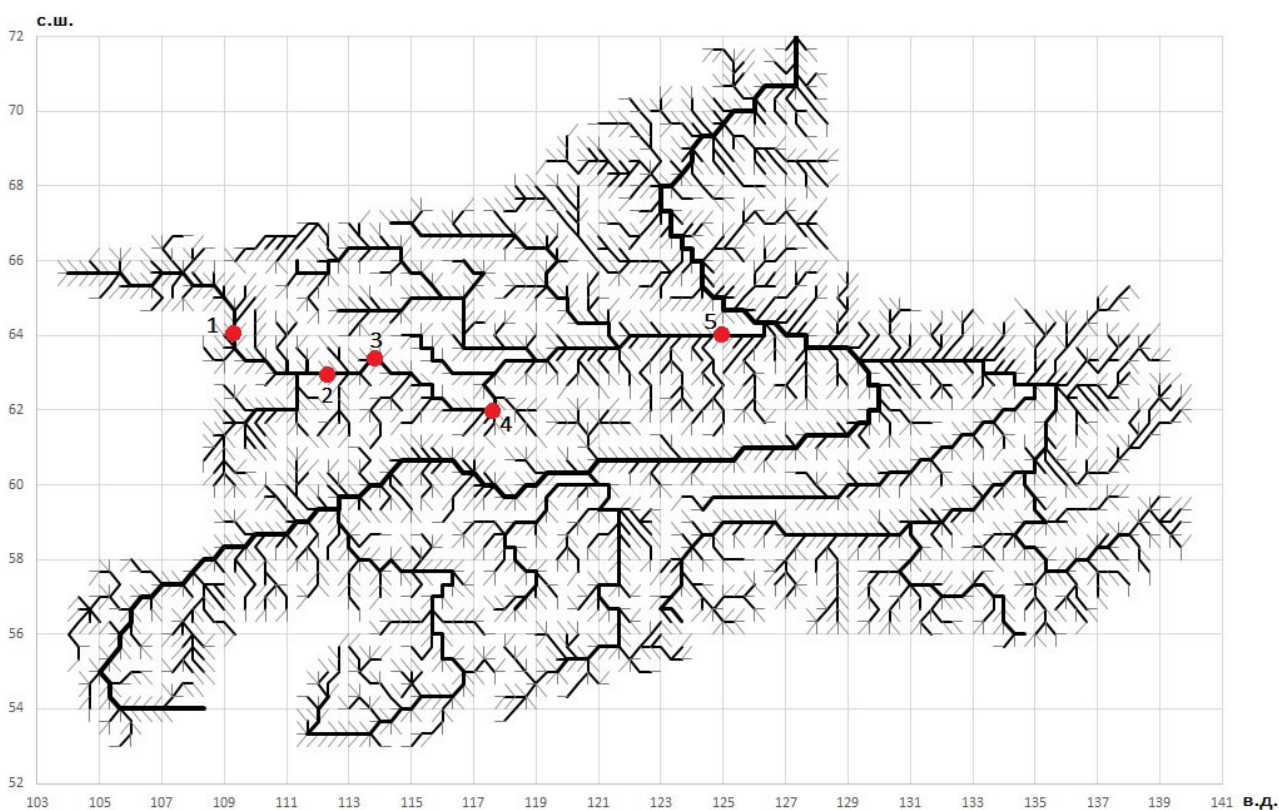


Рис. 2. Схематизация бассейна реки Лены. Гидростыи на реке Вилюй: 1 – Усть-Амбардаах, 2 – Чернышевский, 3 – Сюльдюкар, 4 – Сунтар, 5 – Хатырык-Хомо

Результаты моделирования и их анализ

Для оценки характеристики изменений многолетних колебаний годового стока и для представления о периодах различной водности естественного и зарегулированного стока за период 1985-2005 гг. построены разностно-интегральные кривые для створов Усть-Амбардаах, Чернышевский, Сунтар, Хатырык – Хомо. На рис. 3 совмещённых разностно-интегральных кривых период 1985-2005 гг. включает полный цикл колебаний водности р. Вилюй. Исходя из анализа построенных кривых, период пониженной водности наблюдался во всех створах, начиная с 1985 года. Однако на участке реки с естественным стоком (Усть-Амбардаах) данный период заканчивался в 1986 году, а на зарегулированных участках (Чернышевский, Сунтар, Хатырык – Хомо) на 1-2 года позднее.

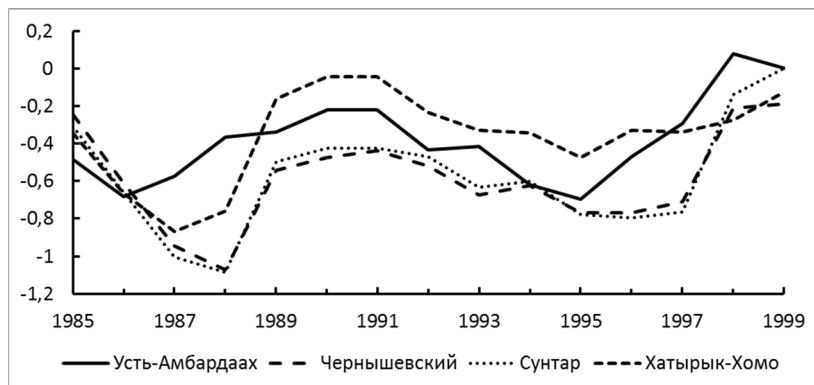


Рис. 3. Разностно-интегральные кривые для створов реки Вилюй

С 1987 – 1993 гг. на г.п. Усть-Амбардаах, который расположен перед Вилюйским водохранилищем, наблюдается период повышенной водности, а в створах ниже плотины данный период начинается с 1989 года и заканчивается 1994 годом. Сравнение разностно-интегральных кривых показывает, что изменение периода водности на р. Вилюй происходит почти синхронно несмотря на существующий сдвиг в 1-2 года.

На рис. 4 представлены рассчитанные по совместной линейной модели естественный и зарегулированный стоки в сравнении с данными наблюдений из архива R-Arcticnet [12]. Проведена оценка результатов моделирования по двум статистическим критериям соответствия измеренных и рассчитанных месячных значений стока: эффективности расчёта Eff по Нэшу-Сатклиффу [13]

$$Eff = 1 - \frac{\sum_N (Q_{cal} - Q_{obs})^2}{\sum_N (Q_{cal} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

и систематической ошибки расчётов

$$Bias = \overline{\sum_N (Q_{cal} - Q_{obs})}.$$

При оценке гидрологических прогнозов принято считать, что при $Eff > 0.5$ модель достаточно хорошо воспроизводит изменения по времени рассчитанной величины, если $Eff < 0$, то временная динамика воспроизводится плохо. Что касается систематической ошибки, то для хорошего воспроизведения абсолютное значение систематической ошибки не должно превышать 5%. В работе [14] принята несколько иная шкала оценки точности: хорошая точность при $Eff > 0.75$, удовлетворительная при $0.36 < Eff < 0.75$.

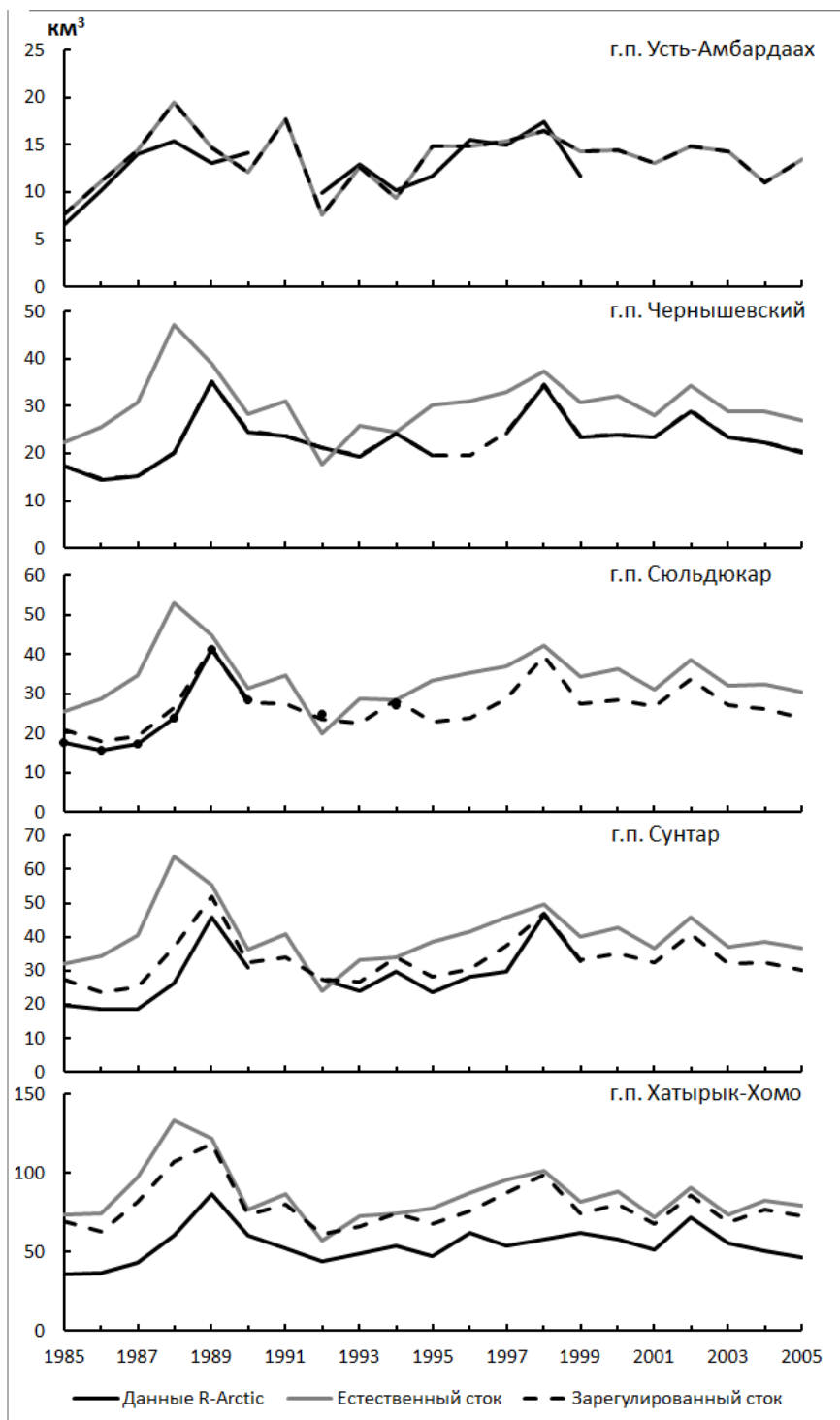


Рис. 4. Многолетний годовой сток на створах реки Вилюй

Проведено исследование влияния Вилюйского водохранилища на водный режим р. Вилюй в отношении полноводной волны с 01.06. по 30.06 за период с 1985 по 2005 год. Максимальные расходы воды в створе гидроузла и створах Сюльдюкар, Сунтар и Хатырык-Хомо в естественных и зарегулированных условиях представлены на диаграмме (рис. 5).

Таблица 2

Статистические характеристики сравнения рассчитанных и наблюдаемых расходов для створов реки Вилюй

Створ р. Вилюй	Расчетный период, годы	Eff	$Bias, \%$
Усть-Амбардаах	1985-2005	0,72	7
Чернышевский	1985-2005	0,99	0,6
Сюльдюкар	1985-1994	0,92	9
Сунтар	1985-1999	0,61	36
Хатырык-Хомо	1985-2005	0,49	7

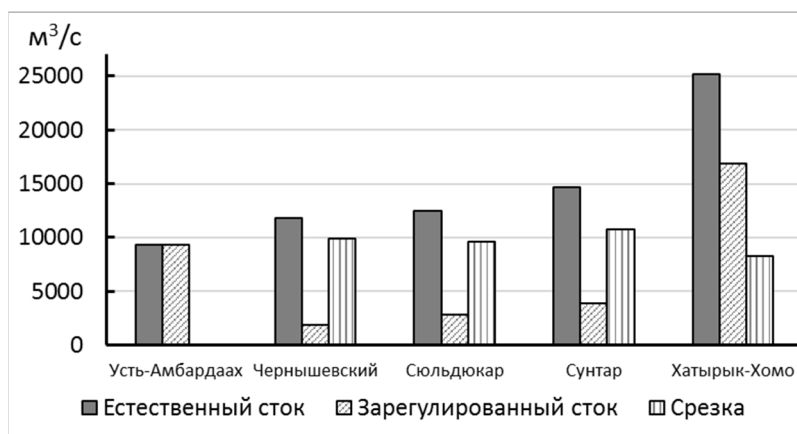


Рис. 5. Максимальные расходы в естественных и зарегулированных створах реки Вилюй

Заключение

Результаты моделирования показывают, что влияние водохранилища на водный режим реки Вилюй проявляется на всем протяжении зарегулированного русла вплоть до устья реки, и отражают вклад антропогенного воздействия в многолетнюю изменчивость расхода воды на различных участках русла р. Вилюй.

В дальнейшем предполагается в совместную линейную модель включить влияние болот и озёр бассейна р. Вилюй и показать влияние климатического фактора (потепления климата в бассейне реки) на сток в бассейне.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-05-00241а.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Калинин Г.П., Милюков П.И. Приближенный расчет неустановившегося движения водных масс // Труды центрального института прогнозов. Выпуск 66. Ленинград. - 1958. - 72 с.
2. Krylova A., Lapteva N. Reproduction of runoff hydrograph in the Lena River basin with a hydrologically correct digital elevation model // The Bulletin of NCC. Numerical Modeling in Atmosphere, Ocean, and Environment Studies. - 2019. - №17. - P. 51-58.
3. Арсеньев Г.С. Основы управления водными ресурсами водохранилищ. Учебное пособие. – СПб.: Изд. РГГМУ. – 2003. 78 с.
4. Hagemann S, Dümenil L A parameterization of the lateral waterflow for the global scale. *Clim Dyn* 14: 17–31. - 1998.
5. Kanae S., K. Nishio, T. Oki, and K. Musiakie, Hydrograph estimations by flow routing modelling from AGCM output in major basins of the world, *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE*, 39, 97-102, 1995.
6. Oki T., Validating the runoff from LSP-SVAT models using a global river routing network by one degree mesh, *Proc. 13th Conf. on Hydrology*, American Meteorological Society, 319-322, 1997.
7. Miller, J.R., G.L. Russell, and G. Caliri, 1994: Continental-scale river flow in climate models. *J. Climate*, 7, 914-928, doi:10.1175/1520-0442.
8. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. М.: Наука, 2010.-327 с.
9. Кузин В. И., Лаптева Н. А. Математическое моделирование стока из бассейна реки Лена // // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. – Т. 2. – Новосибирск. – 2013. – С. 3–7.
10. Oki T., Nishimura, T., and Dirmeyer, P., Assessment of Annual Runoff from Land Surface Models Using Total Runoff Integrating Pathways (TRIP) // *J. Meteorol. Soc. of Japan* – 1999. - V. 77. - № 1B. - pp. 235–255.
11. <https://disk.sci.gsfc.nasa.gov/daac-bin/FTPSubset.pl>
12. <http://www.r-arcticnet.sr.unh.edu/v4.0/Tiles/arctic7.html>
13. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models: 1 a discussion of principles // *J. Hydrol.* - V. 10. - №3. - 1970. - P. 282-290.
14. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. - Л.: Гидрометеоздат. 1974. - 366 с.

© А. И. Крылова, Н. А. Лаптева, 2020