

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-2-124-141>

УДК 556.5.01:556.16 (282.256.33)

Особенности длительных фаз повышенного/пониженного стока Енисея (до впадения Ангары)

***А.Г. Георгиади, И.П. Милюкова,
Е.А. Барабанова, Ю.Ю. Алентьев***

*Институт географии Российской академии наук, г. Москва, Россия
georgiadi@igras.ru*

Приведены результаты исследования долговременных фаз пониженного и повышенного условно-естественного годового и сезонного стока р. Енисей в створах г. Кызыл, пос. Никитино и пос. Базаиха. Восстановление многолетних рядов стока (исключение антропогенных изменений) в створах пос. Никитино и Базаиха основано на трансформации годового гидрографа средних суточных расходов воды с использованием метода Калинина–Милюкова. Долговременные фазы годового и сезонного стока выявлены на основе разностно-интегральных кривых. Для всего периода наблюдений 1936–2021 гг. для зимнего стока наблюдались две продолжительные контрастные фазы, типичные для многих рек России. Тогда как многолетние изменения стока объединенного сезона снегового половодья и летне-осенних дождевых паводков, так же как и годового стока характеризовались четырех-пятикратной сменой контрастных фаз. Длительность контрастных фаз превышала 50 лет, и при этом фазы пониженного стока суммарно продолжались существенно дольше фаз повышенного стока. Разница в стоке контрастных фаз р. Енисей наиболее значительна для зимнего стока, составляя в среднем 20–40 %, а годового стока и стока сезона снегового половодья и летне-осенних дождевых паводков 8–11 %.

Ключевые слова: годовой и сезонный речной сток, многолетние изменения, продолжительные фазы водности, метод трансформации гидрографа, разностно-интегральная кривая

Features of the Yenisei River long phases of increased/decreased water flow (downstream from the confluence of the Angara River)

***A.G. Georgiadi, I.P. Milyukova,
E.A. Barabanova, Yu.Yu. Alentyev***

*Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
georgiadi@igras.ru*

The article presents the results of studying long phases of decreased and increased conditionally natural annual and seasonal water flow of the Yenisei River at Kyzyl City, Nikitino and Bazaikha settlements. The retrieval of long-term water flow time series (with excluded anthropogenic changes) at Nikitino and Bazaikha settlements is based on the transformation of the annual hydrograph of daily water discharges using the Kalinin–Milyukov method. Long phases of annual and seasonal water flow were revealed on the basis of cumulative deviations curves. For the entire observation period of 1936–2021, two

long contrasting phases were revealed for winter flow, which are typical for many studied rivers in Russia. At the same time, long-term changes in runoff of the combined season of snowmelt flood and summer-autumn rain floods, as well as annual water flow, were characterized by a four- to five-fold change in contrasting phases. The duration of contrasting phases reached more than 50 years, and the phases of decreased water flow were significantly longer than the phases of increased flow. The difference in the water flow of contrasting phases of the Yenisei River is most significant for winter flow and is on average equal to 20–40 %, and the one for annual flow and flow in the season of snowmelt floods and summer-autumn rain floods is 9–12 %.

Keywords: annual and seasonal water flow, long-term changes, long phases, hydrograph transformation method, cumulative deviation curve

Введение

Происходившие в XIX–XXI вв. многолетние изменения речного стока, обусловленные природно-климатическими факторами, характеризуются чередованием периодов пониженной/повышенной водности разной продолжительности. Среди них особый интерес представляют периоды с достаточно большой продолжительностью, охватывающие 10–15 лет и более, составляя, зачастую, несколько десятилетий. Их можно соотнести с внутривековыми и вековыми циклами гидроклиматических изменений, которым уделялось большое внимание в 1950–1970-х гг. [1, 8]. Тогда же в научную гидрологическую терминологию было введено понятие «фаза» (цикла) многолетних изменений (колебаний) речного стока [1, 8]. Под фазой водности понимается группа смежных лет (группировок лет) разной продолжительности с повышенной, пониженной или близкой к средней за весь период наблюдений водности. При этом в фазы повышенной водности могут встречаться годы с пониженной водностью и наоборот [1]. Именно с долговременными фазами гидрологических изменений тесно связана проблема оценки норм гидрологических характеристик [6] или проблема репрезентативности периодов наблюдений.

В последние 15–20 лет, особенно в связи с современным глобальным потеплением, значительный интерес вызывает проблема исследования долговременных фаз повышенных/пониженных значений характеристик речного стока, а также других составляющих геостока, и оценка статистической значимости разницы в стоке контрастных фаз [2, 4, 9, 12, 13, 16–18, 20, 22, 24].

На природно-обусловленные изменения гидрологических характеристик накладываются антропогенные воздействия, которые характеризуются значительной временной и пространственной изменчивостью [4]. В результате гидрологические изменения оказываются зачастую обусловленными тесным переплетением воздействия природно-климатических и антропогенных факторов. Это существенно затрудняет разделение их вклада в общие изменения стока, что крайне важно для надежных оценок произошедших и возможных в будущем изменений. В связи с этим существует проблема восстановления естественных характеристик речного стока.

Один из подходов к восстановлению основан на трансформации гидрографа средних суточных расходов воды рек, в котором используются методы единичного гидрографа, изохрон, Калинина – Милюкова, Маскингам и другие [5, 7, 11].

Основное внимание в статье уделено восстановлению многолетних рядов условно-естественных среднесуточных расходов воды р. Енисей в створах, расположенных ниже Саяно-Шушенской и Красноярской ГЭС, на основе метода трансформации их годовых гидрографов и исследованию на этой основе долговременных фаз повышенного и пониженного годового и сезонного стока в условиях, близких к естественному водному режиму.

1. Географические и гидрологические особенности бассейна р. Енисей до слияния с р. Ангара

В качестве объекта исследований был выбран водосбор р. Енисей до пос. Базаиха (в 250 км от впадения в него р. Ангара), который относится преимущественно к лесостепной и степной зонам, а также к зоне тайги (рис. 1). В регионе широко распространена вечная мерзлота, в основном прерывистая и островная, а также районы, в которых она отсутствует.



Рис. 1. Картохема бассейна р. Енисей. Цифрами обозначены гидропосты: 1 – р. Енисей – г. Кызыл; 2 – р. Енисей – пос. Никитино; 3 – р. Енисей – пос. Базаиха; 4 – р. Абакан – г. Абаза; 5 – р. Ус – д. Усть-Золотая; 6 – р. Туба – с. Бугуртак.

Fig. 1. Map chart of the Yenisei River basin. The numbers indicate the gage stations: 1 –Yenisei River – Kyzyl City; 2 – Yenisei River – Nikitino settlement; 3 – Yenisei River – Bazaiha settlement; 4 –Abakan River – Abaza City; 5 –Us River – Ust-Zolotaya village; 6 – Tuba River – Bugurtak settlement.

Практически весь сток р. Енисей (около 93 %) формируется в период снегового половодья и дождевых паводков с апреля по ноябрь, когда наблюдается относительно низкое снеговое половодье и обильные дождевые паводки. В зимний период, который продолжается с декабря по март, сток составляет всего около 7 % от его годовых значений. Средний многолетний годовой сток воды р. Енисей у пос. Базаиха составляет 87 км³.

Среди антропогенных факторов основное влияние на сток р. Енисей оказывают Саяно-Шушенское (его полный объем составляет 31,34 км³, а полезный – 15,3 км³) и Красноярское (полный объем 73,29 км³, полезный – 30,42 км³) водохранилища, заполненные, соответственно, в 1967–1970 и 1978–1983 гг. [3]. Они существенно изменяют его внутригодовое распределение стока. Воздействие на сток других отраслей хозяйства относительно небольшое.

2. Многолетние ряды характеристик речного стока

Основу исследований составили многолетние ряды наблюдаемых средних суточных и средних месячных расходов воды в створах г. Кызыл и пос. Никитино и Базаиха (табл. 1).

Таблица 1. Периоды с исходными данными о средних месячных и средних суточных расходах воды

Table 1. Periods with baseline time series on monthly and daily water discharges

Река	Пункт	Площадь бассейна, км ²	Период, годы	
			Средние месячные расходы воды	Средние суточные расходы воды
Енисей	г. Кызыл	115	1927–2021	1936–2021
Енисей	пос. Никитино	182	1936–2021	1952–2021
Енисей	пос. Базаиха	300	1936–2021	1936–2021
Уса	д. Усть-Золотая	6,11	-	1951–2021
Туба	с. Бугуртак (с. Курагино)	31,8	-	1936–2021
Абакан	г. Абаза	14,4	-	1950–2021

Указанные данные использовались для восстановления (для исключения антропогенных изменений) многолетних рядов средних суточных, средних месячных, средних сезонных и средних годовых расходов воды р. Енисей в створах пос. Никитино и пос. Базаиха в период после начала заполнения Саяно-Шушенского и Красноярского водохранилищ. На основе полученных рядов восстановленных средних годовых и средних сезонных расходов воды и данных наблюдений, относящихся к периодам до создания указанных водохранилищ, формировались ряды условно-естественного стока, охватывающие весь период наблюдений. Они послужили

основой для исследования долговременных фаз повышенного/пониженного годового и сезонного стока р. Енисей и изменений их характеристик, обусловленных климатическими изменениями.

3. Методы

3.1. Метод восстановления годового гидрографа средних суточных расходов воды

Для восстановления гидрографа стока, близкого к условиям естественного водного режима, применяется метод Калинина – Милюкова [7], в основе которого используется линейная модель, описывающая связь между расходами воды на входе и выходе расчетного участка реки. Согласно этому методу, расход в замыкающем створе рассчитывается по интегралу

$$Q(t) = \int_0^t q(t)P(t-\tau)d\tau, \quad (1)$$

где $Q(t)$ – расход в замыкающем створе в момент времени t ; $q(t)$ – расход на входе расчетного участка; $P(t)$ – функция влияния (кривая добега-ния)

$$P(t) = \frac{1}{\tau(n-1)!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^{n-1} e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)}, \quad (2)$$

где n – количество характерных участков с одинаковым временем добега-ния, равным τ .

Для определения параметров функции влияния и верификации расчетов использовались данные о среднесуточных расходах воды тех периодов, для которых имелись данные параллельных наблюдений в указанных выше створах р. Енисей, а также его притоков р. Уса – д. Усть-Золотая (на участке между г. Кызыл и пос. Никитино), р. Туба – с. Бугуртак (с. Курагино) и р. Абакан – г. Абаза (на участке пос. Никитино и пос. Базаиха), когда не было заметного влияния антропогенного воздействия на сток рек. На участках г. Кызыл – пос. Никитино и пос. Никитино – пос. Базаиха для определения расчетных параметров и эмпирических коэффициентов использованы данные за 1952–1954, 1960–1962 гг. (6 лет), а для проверочных расчетов 1955–1959, 1963–1977 гг. (20 лет) и 1955–1959, 1963–1966 гг. (9 лет) соответственно.

Определение параметров n и τ проводилась с помощью оптимизационной процедуры [10], которая широко используется в гидрологии и представляет собой метод покоординатного спуска с попеременной заменой осей.

Гидрограф суточных расходов воды р. Енисей у пос. Никитино рассчитывался как сумма двух гидрографов (далее двух входов), сформированных в створах г. Кызыл и д. Усть-Золотая на р. Уса. Для каждого входа определялись свои параметры функции влияния n и τ .

Но поскольку сток р. Уса – это лишь часть общего бокового притока на этом участке, для сохранения водного баланса необходимо учесть тот объем стока, данные о котором либо полностью отсутствуют, либо имеются существенные пропуски за годы, по которым проводились расчеты. Для этого расходы воды р. Енисей у г. Кызыл и р. Уса в створе д. Усть-Золотая умножались на постоянные эмпирические коэффициенты, подобранные для каждого из этих створов и отдельно для периодов с января до начала половодья, с начала половодья до максимума половодья, от максимума половодья до конца периода дождевых летне-осенних паводков (поскольку отделить период спада половодья от периода летне-осенних паводков весьма затруднительно, так как нередко паводки проходят уже на спаде половодья), и завершающий период – с конца периода дождевых паводков и до конца года.

Все эти коэффициенты определялись методом подбора параллельно с оптимизацией параметров функций влияния для сохранения объемов стока на входе (г. Кызыл, д. Усть-Золотая) и на выходе (пос. Никитино). Установленные параметры принимались постоянными для всех гидрографов, которые использовались для оптимизации, проверочных расчетов и восстановления стока. Однако даты начала каждого из рассмотренных выше внутригодовых периодов (начало половодья, пик, конец летне-осенних паводков) задавались по фактическим данным для каждого расчетного года. Начало половодья, как правило, наблюдалось в апреле-мае, а конец дождевых паводков в августе-октябре.

Аналогичным образом проводились расчеты на участке пос. Никитино – пос. Базаиха, где рассчитывалась трансформация с тремя входами: р. Енисей – пос. Никитино, р. Туба – с. Бугуртак (с. Курагино) и р. Абакан – г. Абаза.

3.2. Методы выявления границ смены фаз повышенного и пониженного годового и сезонного стока

Определение лет смены фаз в данном исследовании было основано на результатах, полученных методом разностно-интегральных кривых. Отметим, что в исследованиях, проведенных авторами ранее [4, 16, 18], границы между длительными фазами пониженных и повышенных значений годового и сезонного стока воды определялись с использованием разностно-интегральных кривых в сочетании с оценкой статистической однородности рядов по средним значениям. Для этого применялись параметрические и непараметрические критерии однородности рядов. В качестве параметрического критерия применялся критерий Стьюдента [14, 15], расчет которого выполнен на основе пакета TREND [14], а непараметрического критерия – Манна – Уитни – Пети (MWP) [22] из пакета AnClim [25]. Они использовались для оценки статистической значимости разницы в средних значениях длительных контрастных фаз гидрологических характеристик и для определения лет, в которые происходила их смена.

Опыт использования такого набора методов для выявления лет смены контрастных фаз показывает, что выявленные на основе каждого из них переходные годы, как правило, совпадают [16–18].

Разностно-интегральные кривые представляют собой нарастающую сумму отклонений определенной характеристики от ее среднего значения, рассчитанного за весь период наблюдения. Часто отклонения нормируются на коэффициент вариации, чтобы можно было сравнить временную изменчивость разнородных характеристик. Значения нормализованных разностно-интегральных кривых рассчитываются следующим образом:

$$\begin{aligned} RIK_i &= \frac{1}{C_v} \sum_{i=1}^N (K_i - 1), \\ K_i &= E_i / E_m, \\ C_v &= \frac{\sigma}{E_m}, \\ \sigma &= \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (E_i - E_m)^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где RIK_i – значение разностно-интегральной кривой в i -й год; E_i – значение i -го члена ряда ($i=1, \dots, N$); N – количество членов во временном ряду; E_m – среднее многолетнее значение; K_i – модульный коэффициент i -го члена временного ряда; C_v – коэффициент вариации временного ряда и σ – стандартное отклонение временного ряда.

4. Результаты

4.1. Результаты восстановления годовых гидрографов средних суточных расходов воды

Полученные параметры и коэффициенты были использованы для восстановления ежедневных расходов воды в створах пос. Никитино и пос. Базаиха для периода 1952–2021 гг.

Оценка качества проверочных расчетов на основе критерия качества Нэша – Сатклифа [21], который для годовых гидрографов средних суточных расходов воды в створах пос. Никитино и пос. Базаиха равен, соответственно, 0,97 и 0,96, за зимний сезон – 0,97 и 0,97, а в сезон половодья и дождевых паводков – 0,96 и 0,95, показала, что результаты восстановления их характеристик для условий естественного водного режима вполне надежны.

Достаточная степень надежности полученных результатов подтверждается также сопоставлением гидрографов восстановленных и наблюдаемых среднесуточных расходов воды в этих створах для лет, для которых проводились проверочные расчеты (рис. 2).

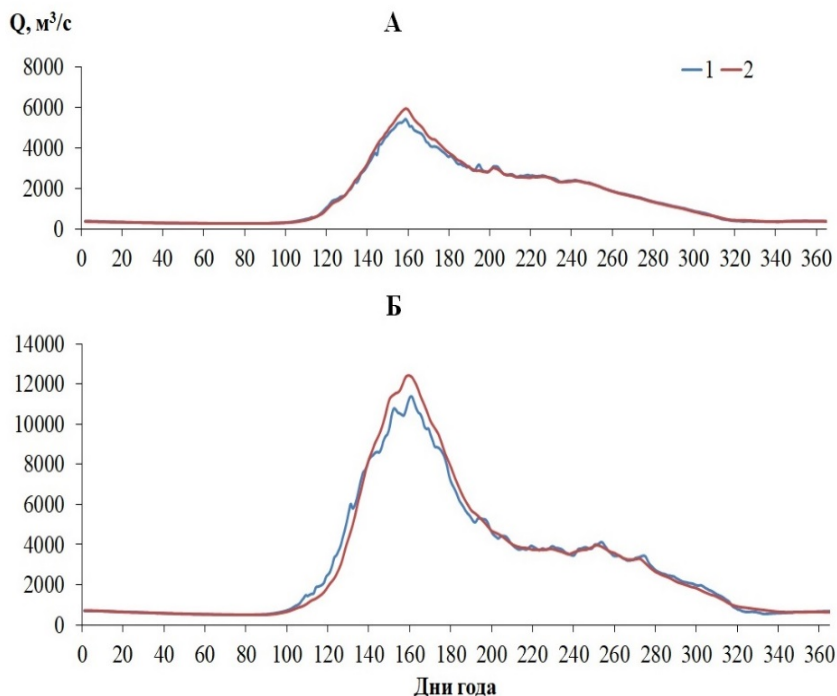


Рис. 2. Наблюдаемые (1) и рассчитанные (2) годовые гидрографы средних суточных расходов воды: р. Енисей – пос. Никитино (осредненные за 1955–1959, 1963–1977 гг.) (а); р. Енисей – пос. Базаиха (осредненные за 1955–1959, 1963–1966 гг.) (б).

Fig. 2. Observed (1) and calculated (2) annual hydrographs of daily water discharges: Yenisei River – Nikitino settlement (averaged for 1955–1959, 1963–1977) (a); Yenisei River – Bazaiha settlement (averaged for 1955–1959, 1963–1966) (b).

Важным критерием достоверности полученных результатов восстановления можно считать близкие значения годовых сумм восстановленных и наблюдаемых расходов воды. Разница между ними составляет 1,25 % (для пос. Никитино) и 6 % (для пос. Базаиха). При этом следует иметь в виду, что Саяно-Шушенское и Красноярское водохранилища являются водохранилищами многолетнего регулирования, ежегодные суммы наблюдаемых и восстановленных расходов могут не совпадать.

С учетом полученных данных для р. Енисей в створах пос. Никитино и пос. Базаиха были подготовлены многолетние ряды условно-естественных средних месячных расходов воды, охватывающие период 1936–2021 гг. Обобщенно они представлены в виде годовых гидрографов средних месячных расходов воды (рис. 3) и средних годовых и средних сезонных расходов воды, осредненных за весь период наблюдений (табл. 2).

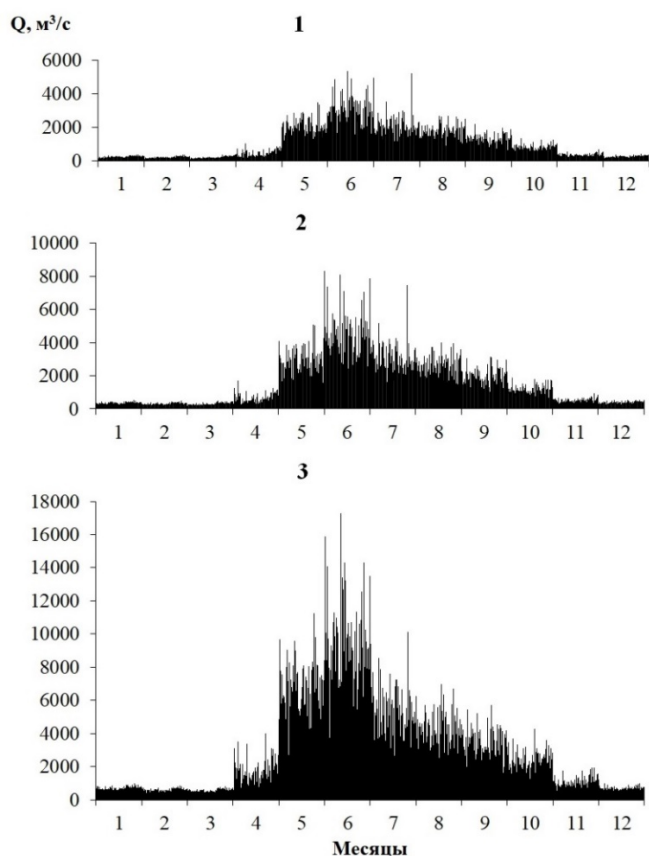


Рис. 3. Гидрографы средних месячных расходов воды: г. Кызыл (1); пос. Никитино (2); пос. Базаиха (3). В каждом месяце приведены расходы воды за весь период наблюдений.

Fig. 3. Hydrographs of monthly water discharges. Kyzyl City (1); Nikitino settlement (2); Bazaikha settlement (3). Each month shows water discharges for the entire observation period.

Таблица 2. Средние многолетние, средние годовые и средние сезонные расходы воды

Table 2. Long-term averaged annual and seasonal water discharges

Река	Пункт	Средние многолетние расходы воды, м³/с		
		Сезон снегового половодья и летне-осенних дождевых паводков	Зима	Год
Енисей	г. Кызыл	1425	231	1028
Енисей	пос. Никитино	2121	348	1530
Енисей	пос. Базаиха	4155	643	2984

4.2. Многолетняя динамика долговременных фаз годового и сезонного стока

Для зимнего стока р. Енисей в рассматриваемых створах характерны две продолжительные контрастные фазы (рис. 4), как и для многих других исследованных авторами рек Русской равнины, арктических и других рек [4, 16–18].

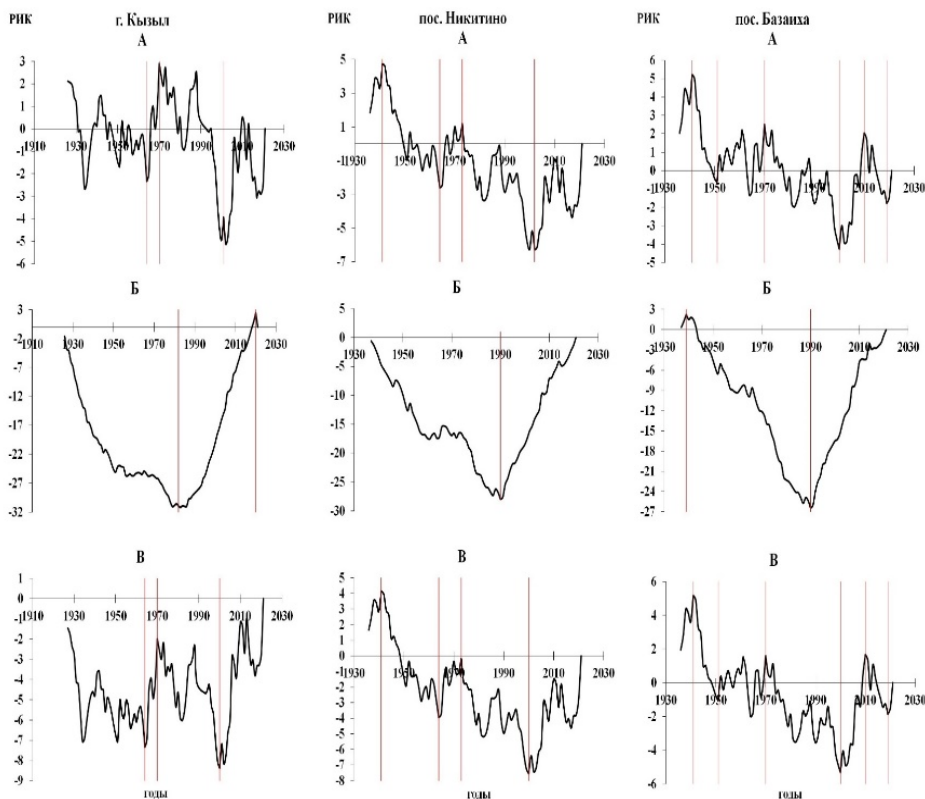


Рис. 4. Многолетние изменения стока р. Енисей за (А) объединенный сезон снегового половодья и летне-осенних дождевых паводков, (Б) зимний сезон и (В) год у г. Кызыл, пос. Никитино и пос. Базайха в виде разностно-интегральных кривых (РИК). Вертикальные красные линии показывают годы смены контрастных фаз стока.

Fig. 4. The Yenisei River long-term changes in the water flow for (A) the combined season of snowmelt flood and summer-autumn rain floods, (Б) the winter season and (B) the year at Kyzyl City, Nikitino and Bazaikha settlements in the form of cumulative deviations curves (CDC). The vertical red lines show the shift years of water flow long contrasting phases.

Сначала наблюдалась длительная фаза пониженного стока, которая в 1980–1990-е годы (табл. 3) сменилась противоположной фазой.

Многолетние изменения стока объединенного сезона снегового половодья и дождевых паводков, так же как и годового стока характеризовались неоднократной (от четырех до пяти раз) сменой контрастных фаз.

Таблица 3. Годы и направленность смены контрастных фаз годового и сезонного стока р. Енисей в створах г. Кызыл, пос. Никитино, пос. Базаиха, определенные на основе разностно-интегральных кривых

Table 3. The years and the direction of the contrasting long lasting phases change for the naturalized annual and seasonal water flow on the Yenisei gage stations of Kyzyl City, Nikitino and Bazaikha settlements defined by cumulative deviations curves

г. Кызыл	пос. Никитино	пос. Базаиха
Годовой сток		
1965, 2001 пониженный→повышенный	1965, 2001 пониженный→повышенный	1952, 2001, 2020* пониженный→повышенный
1971 повышенный→пониженный	1942*, 1974 повышенный→пониженный	1942*, 1971, 2011 повышенный→пониженный
Сток сезона снегового половодья и летне-осенних дождевых паводков		
1965, 2003 пониженный→повышенный	1965, 2003 пониженный→повышенный	1951, 2001, 2020* пониженный→повышенный
1971 повышенный→пониженный	1942*, 1974 повышенный→пониженный	1942*, 1971, 2011 повышенный→пониженный
Зимний сток		
1983 пониженный→повышенный	1991 пониженный→повышенный	1991 пониженный→повышенный
2021* повышенный→пониженный		1940* повышенный→пониженный

Примечание. *Годы возможной смены фаз в начале и в конце периода наблюдений.

Отметим, что годы смены пониженного/повышенного сезонного стока р. Енисей у пос. Базаиха, определенные на основе разностно-интегральных кривых, критериев Стьюдента и Манна – Уитни – Пети совпали между собой во всех рассмотренных случаях, кроме одного (табл. 4). При этом при использовании критерия Стьюдента разница в стоке контрастных фаз статистически значима при уровне значимости <0.01 (зимний сток), <0.05 , <0.1 и >0.1 (сток сезона половодья и летне-осенних дождевых паводков). При использовании критерия MWP уровень статистической значимости разницы в стоке контрастных фаз зимнего стока также равен <0.01 , тогда как для стока фаз сезона половодья и дождевых паводков он был ниже.

Аналогичные результаты получены для годового стока р. Енисей у пос. Базаиха, а также для годового и сезонного стока у пос. Никитино и г. Кызыл.

Таблица 4. Годы смены фаз сезонного стока р. Енисей у пос. Базаиха, определенные на основе разностно-интегральных кривых, критериев Стьюдента и Манна–Уитни–Пети (MWP)

Table 4. Years of seasonal runoff phase shift Yenisei near the Bazaikha village, defined on the basis of cumulative deviations sum curves, Student t test and Mann–Whitney–Pettitt (MWP) test

Годы смены фаз, определенные на основе				
разностно-интегральных кривых	критерия Стьюдента		критерия MWP	
Год	Год	Уровень значимости	Год	Уровень значимости
Сток сезона снегового половодья и летне-осенних дождевых паводков				
пониженный→повышенный				
1951	1951	<0,1	1951	>0,1
2001	2000	<0.05	2001	~0,1
повышенный→пониженный				
1971	1971	>0,1	1996	>0,1
2011	2011	<0,1	2011	~0,1
Зимний сток				
пониженный→повышенный				
1991	1991	<0,01	1991	<0,01

4.3. Характеристики длительных фаз контрастной водности

Продолжительность фаз повышенного зимнего стока изменялась от 31 года у пос. Никитино и пос. Базаиха до 38 лет у г. Кызыл. Продолжительность фаз пониженного стока превышала 50 лет в каждом из створов (табл. 5). Длительность сезона половодья и дождевых паводков составляла для фазы повышенного стока от 9 лет у пос. Никитино и 10 лет у пос. Базаиха до 19 лет у г. Кызыл и пос. Базаиха и 20 лет у пос. Никитино. Максимальный диапазон для фазы пониженного стока наблюдался у пос. Базаиха и составлял от 9 до 30 лет. Наиболее длительной она была у г. Кызыл (38 лет). При этом суммарная продолжительность фаз пониженного стока в каждом из этих створов, как для годового стока, так и для стока рассмотренных сезонов, существенно превышала продолжительность фаз повышенного стока.

Одна из характерных особенностей многолетних изменений годового и сезонного стока в рассмотренных створах состояла в формировании относительно коротких фаз водности длительностью до 5–7 лет.

Наиболее заметная разница в среднем стоке контрастных фаз р. Енисей характерна для зимнего стока: у г. Кызыл она составляла почти

39 %, у пос. Никитино – 24 %, у пос. Базаиха – 20 % (табл. 6). Для годового стока и стока сезона снегового половодья и летне-осенних дождевых паводков она изменяется от 8 до 11 %.

Таблица 5. Характеристика контрастных долговременных фаз стока на р. Енисей: наблюдаемого у г. Кызыл и восстановленного годового и сезонного стока в створах поселков Никитино и Базаиха

Table 5. Characteristics of contrasting water flow long phases of the Yenisei River: observed near Kyzyl City and naturalized annual and seasonal water flow at Nikitino and Bazaikha gage stations

Пункт	Фаза	Границы	Длительность, лет	Средний сток, м³/с
Годовой сток				
г. Кызыл	ФНС	1927–1964	38	997
		1971–2000	30	990
	ФВС	2001–2021	21	1091
пос. Никитино	ФНС	1942–1964	23	1445
		1974–2000	27	1464
	ФВС	1965–1973	9	1631
		2001–2021	21	1617
пос. Базаиха	ФНС	1942–1951	10	2721
		1971–2000	30	2887
		2011–2019	9	2920
	ФВС	1952–1970	19	3044
		2001–2010	10	3279
Сезон снегового половодья и летне-осенних дождевых паводков				
г. Кызыл	ФНС	1927–1964	38	1398
		1971–2002	32	1369
	ФВС	2003–2021	19	1496
пос. Никитино	ФНС	1942–1964	23	2008
		1974–2002	29	2030
	ФВС	1965–1973	9	2270
		2003–2021	19	2238
пос. Базаиха	ФНС	1942–1951	10	3793
		1971–2000	30	4016
		2011–2019	9	3893
	ФВС	1952–1970	19	4257
		2001–2010	10	4545
Зимний сезон				
г. Кызыл	ФНС	1926–1982	57	201
	ФВС	1983–2020	38	279
пос. Никитино	ФНС	1937–1990	54	320
	ФВС	1991–2021	31	397
пос. Базаиха	ФНС	1940–1990	51	596
	ФВС	1991–2021	31	716

Примечание. ФНС, ФВС – фазы пониженного и повышенного стока.

Таблица 6. Средний сток контрастных фаз, разница в стоке между ними
Table 6. Average water flow of contrasting phases, difference in water flow between them

Пункт	Сток, м ³ /с	ФВС	ФНС	Разница в стоке	
				м ³ /с	%
г. Кызыл	годовой	1091	994	97	9,8
	снегового половодья и летне-осенних дождевых паводков	1496	1385	111	8,0
	зимний	279	201	78	38,8
пос. Никитино	годовой	1621	1455	166	11,4
	снегового половодья и летне-осенних дождевых паводков	2249	2020	229	11,3
	зимний	397	320	77	24,1
пос. Базаиха	годовой	3125	2862	263	9,2
	снегового половодья и летне-осенних дождевых паводков	4357	3948	409	10,4
	зимний	716	596	120	20,1

Примечание. ФНС, ФВС – фазы пониженного и повышенного стока.

Заключение

Восстановлены многолетние ряды средних суточных расходов воды р. Енисей у пос. Никитино и пос. Базаиха после создания Саяно-Шушенского и Красноярского водохранилищ, из которых были исключены изменения, вызванные антропогенными факторами (в основном регулирующим влиянием Саяно-Шушенского и Красноярского водохранилищ).

Для восстановления годовых гидрографов стока близкого к условиям естественного водного режима применен метод Калинина – Милюкова, в основе которого использовалась линейная модель, описывающая связь между расходами воды на входе и выходе расчетного участка реки.

Полученные многолетние ряды восстановленных расходов воды позволили для всего периода наблюдений (1936–2021 гг.) на р. Енисей в створах пос. Никитино и пос. Базаиха выявить границы и исследовать особенности долговременных фаз повышенного/пониженного годового и сезонного стока в условиях естественного водного режима. Для зимнего стока р. Енисей в рассматриваемых створах характерны две продолжительные контрастные фазы, как и для многих других исследованных авторами рек Русской равнины, арктических и других рек. Сначала наблюдалась длительная фаза пониженного зимнего стока, которая в 1980–1990-е годы

сменилась на фазу его повышенной водности. Многолетние изменения стока объединенного сезона снегового половодья и дождевых паводков, так же как и годового стока, характеризовались четырех-пятикратной сменной контрастных фаз.

Изменения продолжительности контрастных фаз происходили на р. Енисей у г. Кызыл, пос. Никитино и пос. Базаиха в близком диапазоне – от 9 лет для фазы повышенного стока сезона снегового половодья и летне-осенних дождевых паводков до более 50 лет для фазы пониженного зимнего стока. При этом суммарная продолжительность фаз пониженного стока в каждом из этих створов, как для годового, так и для сезонного стока существенно превышала продолжительность фаз повышенного стока.

Разница в стоке контрастных фаз р. Енисей была наиболее заметна для зимнего стока и составляла 39 % у г. Кызыл. Она была существенно меньше у пос. Базаиха (20 %) и у пос. Никитино (24 %). Для годового стока и стока сезона снегового половодья и летне-осенних дождевых паводков она варьировала от 8 до 11 %.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ 24-27-00143 «Сток рек России в эпохи глобального потепления».

Список литературы

1. Андреев В.Г. Циклические колебания годового стока, их изменения по территории и учет при расчётах стока // Труды III Всесоюз. гидролог. Съезда. Том II. Л.: Гидрометеиздат, 1959. С. 3-50.
2. Водные ресурсы России и их использование / Под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: Государственный гидрологический институт, 2008. 600 с.
3. Вуглинский В.С. Водные ресурсы и водный баланс крупных водохранилищ СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 223 с.
4. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милюкова И.П., Какутина Е.А., Барабанова Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Часть 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: Макс Пресс, 2014. 214 с.
5. Георгиевский В.Ю., Моисеенков А.И. Восстановление естественных гидрографов стока крупных рек, зарегулированных каскадом водохранилищ (на примере р. Волги) // Труды ГГИ. 1984. Вып. 291. С. 54-61.
6. Дроздов О.А., Рубинштейн Е.С. Что следует называть климатическими нормами? // Известия АН СССР, серия географическая. 1966. № 1. С. 93-98.
7. Калинин Г.П., Милюков П.И. Приближенный расчет неустановившегося движения водных масс // Труды ЦИП. 1958. Вып. 66. 72 с.
8. Кузин П.С. Циклические колебания стока рек Северного полушария. Л.: Гидрометеиздат, 1970. 179 с.
9. Научно-прикладной справочник: Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации. СПб.: ООО "РИАЛ", 2021. 190 с.
10. Розенброк Х., Стори С. Вычислительные методы для инженеров-химиков. М.: Мир, 1968. 440 с.
11. Соколовский Д.Л., Шикломанов И.А. Расчеты гидрографов паводков с использованием электронных моделирующих устройств // Труды ЛГМИ. 1965. Вып. 23. С. 65-79.

12. Шпакова Р.Н., Ping Wang. Изменение характера многолетних колебаний стока рек Южной Якутии и прилегающих районов российского Дальнего Востока в условиях глобального потепления // Российская Арктика. 2023. Т. 5, № 1. С. 33-44. DOI: <https://doi.org/10.24412/2658-4255-2023-1-33-44>
13. Юмина Н.М., Терешина М.А. Многолетние изменения стока рек бассейна Вилюя // Вестник Московского университета. Серия 5. География. 2017. № 6. С. 62-70.
14. Chiew F., Siriwardena L., Arene S., & Rahman J. TREND detection software. Canberra: CRC for Catchment Hydrology's (CRCCH) Climate Variability Program. 2017. <http://www.toolkit.net.au/trend>
15. Cramer H. Mathematical Methods of Statistics. Princeton, Princeton University Press, 1946. 575 p.
16. Georgiadi A.G., Groisman P.Ya. Long-term changes of water flow, water temperature and heat flux of two largest arctic rivers of European Russia, Northern Dvina and Pechora // Environmental Research Letters. 2022. Vol. 17, no. 8. P. 1-14. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac82c1>
17. Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Long-term Changes of Water Flow, Water Temperature and Heat Flux of the Largest Siberian Rivers // Polarforschung. 2018. Vol. 87 (2). P. 167-176. DOI: <https://doi.org/10.2312/polarforschung.87.2.167>
18. Georgiadi A.G., Milyukova I.P. Peculiarities of Long-term Phases of the Increased and Decreased Don and Lena Runoff in the 19th–21st Centuries // Russ. Meteorol. Hydrol. 2023. No. 48. P. 1066-1075. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068373923120075>
19. Georgiadi, A.G., Milyukova, I.P. and Kashutina, E.A. Erratum to: Contemporary and Scenario Changes in River Runoff in the Don Basin // Water Resour. 2021. Vol. 48. P. 167. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0097807821120010>
20. Milyukova I., Georgiadi A., Borodin O. Long-term changes in water flow of the Volga basin rivers // E3S Web Conf. 2020. Vol. 163. P. 05008. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016305008>
21. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles // Journal of Hydrology. 1970. No. 10 (3). P. 282-290.
22. Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change-point problem // Journal of the Royal Statistical Society. Series. C (Applied Statistics). 1979. Vol. 28, no. 2. P. 126-135.
23. Sharma S, Singh P.K. Long-term spatiotemporal variability in rainfall trends over the state of Jharkhand // India Climate. 2017. No. 5. P. 2-18.
24. Shi X., Qin T., Nie H., Weng B., He Sh. Changes in major global river discharges directed into the ocean // Int. J. of Environ. Res. and Public Health. 2019. No. 16 (8). P. 1-19.
25. Stepanek P. AnClim – software for time series analysis. Department of Geography Fakulty of Sciences Masaric University, Brno, 2008. <http://www.climehom.eu>.

References

1. Andrejanov V.G. Ciklicheskie kolebanija godovogo stoka, ih izmenenija po territorii i uchet pri raschjotah stoka [Cyclical fluctuations of annual runoff, their changes in the territory and accounting for runoff calculations]. *Trudy III Vsesojuz. gidrolog. S'ezda*. T. II. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1959, pp. 3-50 [in Russ.].

2. Vodnye resursy Rossii i ih ispol'zovanie [Water resources of Russia and their use]. I.A. Shiklomanov Ed. Saint-Petersburg: Gosudarstvennyj gidrologicheskij institute Publ., 2008, 600 p. [in Russ.].

3. Vuglinskij V.S. Vodnye resursy i vodnyj balans krupnyh vodohranilishh SSSR [Water resources and water balance of large reservoirs of the USSR]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1991, 223 p. [in Russ.].

4. Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Miljukova I.P., Kashutina E.A., Barabanova E.A. Sovremennye i scenariye izmeneniya rechnogo stoka v bassejnah krupnejshih rek Rossii. Ch. 2. Bassejny rek Volgi i Dona [Modern and scenario changes in river flow in the basins of the largest rivers of Russia. Part 2. Basins of the Volga and Don rivers]. Moscow, Maks Press Publ., 2014, 214 p. [in Russ.].

5. Georgievskij V.Ju., Moiseenkov A.I. Vosstanovlenie estestvennyh gidrografov stoka krupnyh rek, zaregulirovannyh kaskadom vodohranilishh (na primere r. Volgi) [Restoration of natural hydrographs of the flow of large rivers regulated by a cascade of reservoirs (on the example of the Volga River)]. *Trudy GGI*, 1984, vol. 291, pp. 54-61 [in Russ.].

6. Drozdov O.A., Rubinshtejn E.S. Chto sleduet nazyvat' klimaticheskimi normami? [What should be called climatic norms?]. *Izvestija AN SSSR, serija geograficheskaja*, 1966, no. 1, pp. 93-98 [in Russ.].

7. Kalinin G.P., Miljukov P.I. Priblizhennyj raschet neustanovivshegosja dvizheniya vodnyh mass [Approximate calculation of unsteady motion of water masses]. *Trudy CIP*, vyp. 66, Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1958, 72 p. [in Russ.].

8. Kuzin P.S. Ciklicheskie kolebanija stoka rek Severnogo polusharija [Cyclic fluctuations in the flow of rivers of the Northern hemisphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1970, 179 p. [in Russ.].

9. Nauchno-prikladnoj spravocchnik: Mnogoletnie kolebanija i izmenchivost' vodnyh resursov i osnovnyh harakteristik stoka rek Rossijskoj Federacii [Scientific and applied reference book: Long-term fluctuations and variability of water resources and the main characteristics of river flow in the Russian Federation]. Saint-Petersburg: OOO "RIAL" Publ., 2021, 190 p. [in Russ.].

10. Rosenbrock H., Storey S. Vychislitel'nyye metody dlya inzhenerov-khimikov [Calculable methods for chemical engineers]. Moscow: Mir Publ., 1968, 440 p. [in Russ.].

11. Sokolovskij D.L., Shiklomanov I.A. Raschety gidrografov pavodkov s ispol'zovaniem jelektronnyh modelirujushchih ustrojstv [Calculations of flood hydrographs using electronic modeling devices]. *Trudy LGMI*, 1965, vyp. 23, pp. 65-79 [in Russ.].

12. Shpakova R.N., Ping Wang. Izmeneniye kharaktera mnogoletnikh kolebanij stoka rek yuzhnoy yakutii i prilgayushchikh rayonov rossiyskogo dal'nego vostoka v usloviyakh global'nogo potepleniya [Changes in the nature of long-term fluctuations in the river runoff of southern Yakutia and adjacent areas of the Russian Far East in the context of global warming]. *Russian Arctic*, 2023, vol. 5, no. 1, pp. 33-44 [in Russ.]. DOI: 10/24412/2658-4255-2023-1-33-44

13. Yumina N.M., Tereshina M.A. Mnogoletniye izmeneniya stoka rek basseyna Vilyuya [Long-term changes in the flow of rivers in the Vilyuy basin]. *Lomonosov Geography Journal*, 2017, no. 6, pp. 62-70 [in Russ.].

14. Chiew F., Siriwardena L., Arene S., Rahman J. TREND detection software. Canberra: CRC for Catchment Hydrology's (CRCCH) Climate Variability Program, 2017. <http://www.toolkit.net.au/trend>

15. Cramer H. *Mathematical Methods of Statistics*. Princeton, Princeton University Press, 1946, 575 p.
16. Georgiadi A.G., Groisman P.Ya. Long-term changes of water flow, water temperature and heat flux of two largest arctic rivers of European Russia, Northern Dvina and Pechora. *Environmental Research Letters*, 2022, vol. 17, no. 8, pp. 1-14. DOI: 10.1088/1748-9326/ac82c1.
17. Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Milyukova I.P. Long-term Changes of Water Flow, Water Temperature and Heat Flux of the Largest Siberian Rivers. *Polarforschung*, 2018, vol. 87, no. 2, pp. 167-176. DOI: 10.2312/polarforschung.87.2.167
18. Georgiadi A.G., Milyukova I.P. Peculiarities of Long-term Phases of the Increased and Decreased Don and Lena Runoff in the 19th–21st Centuries. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2023, no. 48, pp. 1066-1075. DOI: 10.3103/S1068373923120075
19. Georgiadi, A.G., Milyukova, I.P. and Kashutina, E.A. Erratum to: Contemporary and Scenario Changes in River Runoff in the Don Basin. *Water Resour*, 2021, vol. 48, p. 167. DOI: 10.1134/S0097807821120010.
20. Milyukova I., Georgiadi A., Borodin O. Long-term changes in water flow of the Volga basin rivers. *E3S Web Conf.*, 2020, vol. 163, pp. 05008. DOI: 10.1051/e3sconf/202016305008.
21. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models. Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970, no. 10 (3), pp. 282-290.
22. Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Journal of the Royal Statistical Society. Series. C (Applied Statistics)*, 1979, vol. 28, no. 2, pp. 126-135.
23. Sharma S., Singh P.K. Long-term spatiotemporal variability in rainfall trends over the state of Jharkhand. *India Climate*, 2017, no. 5, pp. 2-18.
24. Shi X., Qin T., Nie H., Weng B., He Sh. Changes in major global river discharges directed into the ocean. *Int. J. of Environ. Res. and Public Health*, 2019, no. 16 (8), pp. 1-19.
25. Stepanek P. AnClim – software for time series analysis. Department of Geography Fakulty of Sciences Masaric University, Brno, 2008. Available at: www.climehom.eu.

Поступила 03.07.2024; одобрена после рецензирования 24.09.2024;
принята в печать 15.10.2024.

Submitted 03.07.2024; approved after reviewing 24.09.2024;
accepted for publication 15.10.2024.