

Оценка стационарности годового и сезонного стока рек бассейна Верхней Оби

С.Ю. Самойлова  , О.В. Ловцкая , А.Б. Голубева 

 bastet@iwep.ru

ФГБУН «Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук», г. Барнаул, Россия

АННОТАЦИЯ:

Актуальность исследования обусловлена тем, что в последние десятилетия на реках России наблюдаются изменения водного режима, вызванные климатическими факторами. С этим связано нарушение однородности рядов стока, что требует пересмотра существующих методов гидрологических расчетов и прогнозов. В представленной работе выполнен статистический анализ рядов среднегодовых и среднесезонных расходов воды для рек бассейна Верхней Оби. **Методы.** Оценка циклических колебаний водности проведена с использованием разностных интегральных кривых. Для анализа стационарности рядов использовали Standard normal homogeneity test, Buishand's test, Pettitt's test, позволяющие определить год нарушения однородности ряда, и Neumann's test, а также традиционные параметрические тесты Стьюдента и Фишера. Для графического отображения момента нарушения стационарности построены суммарные интегральные кривые. **Результаты.** На большинстве рек бассейна Верхней Оби с начала 1960-х годов наблюдается рост годовых расходов воды. Неоднородность годовых расходов, обусловленная климатическими изменениями, характерна для средних рек, стекающих с северного макросклона Алтайской горной области. На всех исследуемых реках отмечается нарушение стационарности и рост расходов зимней межени, что связано с увеличением зимних температур и количества осадков в октябре-ноябре. Значимые расчетные значения F-критерия свидетельствуют об увеличении дисперсии расходов зимней межени. Нарушение однородности годовых и сезонных расходов на реках бассейна Верхней Оби, в отличие от рек Европейской территории России, произошло после 2000 г.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: р. Верхняя Обь, расход воды, зимняя межень, половодье, летне-осенняя межень, климатические изменения, стационарность, интегральная кривая.

Финансирование: Исследование выполнено в рамках базового госбюджетного проекта ИВЭП СО РАН.

Для цитирования: Самойлова С.Ю., Ловцкая О.В., Голубева А.Б. Оценка стационарности годового и сезонного стока рек бассейна Верхней Оби // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 5. С. 21–38. DOI:10.35567/19994508-2024-5-21-38.

Дата поступления 14.03.2024.

ASSESSMENT OF STATIONARITY OF ANNUAL AND SEASONAL RIVER FLOW IN THE UPPER OB BASIN

Svetlana Y. Samoilova  , Olga V. Lovtskaya , Anastasia B. Golubeva 

 bastet@iwep.ru

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russia

ABSTRACT

Relevance. The climate-induced changes recorded in the recent decades in water regime of Russian rivers make the study topical. This is associated with breaks in the homogeneity of runoff series and requires a revision of existing methods for hydrological calculations and forecasts. In this work, a statistical analysis of series of average annual and average seasonal flows for the rivers of the Upper Ob basin (up to the Novosibirsk reservoir) has been performed. **Methods.** The estimation of cyclic fluctuations in water content is based on the use of differential integral curves. To analyze stationarity of the series, we apply the Standard normal homogeneity test, the Buishand's and the Pettitt's tests providing the determination of the year of breaks in the homogeneity of the series, as well as the Neumann's test and the Student and Fisher traditional parametric tests. The constructed total integral curves are used in graphical display of the moment of stationarity disturbance. **Results.** An increase in annual water flows has been recorded on most rivers of the Upper Ob basin since the early 60s. The annual flows heterogeneity caused by climate change is typical for the medium-sized rivers flowing from the northern macro/slope of the Altai Mountain Region. On all studied rivers, the disturbed stationarity and increased winter low-water flows are associated with rising winter temperatures and precipitation in October-November. Significant calculated values of the F-criterion indicate an increase in dispersion of winter low-water flows. In contrast to the rivers of the European part of Russia, breaks in the homogeneity of annual and seasonal flows for the rivers of the Upper Ob basin occurred after 2000.

Keywords: Upper Ob, water flow, winter low water, flood, summer-autumn low water, climate change, stationarity, integral curve.

Financing: The work was carried out within the framework of the state assignment of the IWEP SB RAS.

For citation: Samoilova. S.Y., Lovtskaya O.V., Golubeva A.B. Assessment of stationarity of annual and seasonal river flow in the Upper Ob basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No.5. P. 21–38. DOI:10.35567/19994508-2024-5-21-38.

Received 14.03.2024.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение динамики стока рек под влиянием климатических изменений является актуальной научной и практически важной задачей. На территории России отмечаются существенные изменения годового стока и его внутригодового распределения [1, 2], вплоть до смены типа водного режима [3], а также максимальных расходов воды, связанных с половодьями и дождевыми паводками [4, 5]. Направленные изменения стока приводят к нарушению стационарности гидрологических рядов, что требует пересмотра существующих методик расчета и прогнозирования гидрологических характеристик¹[6].

Считается, что начало наиболее значимых климатических изменений приходится на вторую половину 1970-х годов [7]. С учетом этого, в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) Росгидромета [8] была разработана методика оценки изменения годового и сезонного стоков рек, в соответствии с которой стационарность рядов рекомендуется определять с использованием критериев Стьюдента и Фишера. В других работах, например [9], для оценки стационарности рядов использован непараметрический Pettitt's test совмест-

¹ СТО ГГИ 52.08.41-2017. Основные гидрологические характеристики при нестационарности временных рядов, обусловленной влиянием климатических факторов. Рекомендации по расчету. СПб.: ФГБУ «ГГИ», 2017. 46 с.

но с методом суммарной и разностной интегральных кривых, что позволило не только оценить ряды на однородность, но и определить год ее нарушения. Интересно, что для рек Европейской территории России «переломным» является 1978 г., а для рек Урала, Сибири и Дальнего Востока нарушение стационарности произошло позднее – в 1985–1996 гг. [9]. Очевидно, что в этих регионах значимые климатические изменения (или же реакция рек на них) начались позднее. В работе [10] отмечено, что гидрологическая система может постепенно накапливать изменения, а затем достаточно резко, за 2–3 года, переходить в новое стационарное состояние.

Представленное в данной статье исследование посвящено оценке стационарности гидрологических рядов и выявлению значимых изменений водности на разнотипных водосборах Верхней Оби (до Новосибирского гидроузла). В его рамках выполнен статистический анализ рядов годового и сезонного стока с использованием параметрических и непараметрических тестов, позволяющих определить год нарушения однородности ряда. Дополнительно использованы методы разностной и суммарной интегральных кривых.

Причинами нарушения стационарности гидрологических характеристик, как известно, могут выступать не только климатические изменения (в глобальном и региональном масштабах), но и антропогенное воздействие на отдельную реку и ее водосбор (строительство ГТС, сбросы воды, изъятие стока, распашка земель, сведение лесов и т. д.). Поэтому, как правило, для рек, режим которых был нарушен под влиянием антропогенных изменений, анализ рядов расходов воды на однородность не проводится [8, 9]. Однако для оценки достоверности использованных статистических методов (правильность определения момента нарушения стационарности ряда) в проведенном исследовании мы не исключили такие ряды из анализа.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования стали притоки р. Оби I–II порядка, на которых имеются гидрологические посты с рядом наблюдений 55 лет и более с минимальным количеством пропусков в наблюдениях, а также р. Обь до Новосибирского гидроузла (гидропост в г. Камень-на-Оби) (рис. 1).

Всего выбрано 14 гидрологических постов (г/п), три из которых за исследуемый период переносились: с. Солонешное на р. Ануй (1985 г.), пгт Тальменка на р. Чумыш (1973 г.) и с. Староалейское на р. Алей (1962). Перечень исследуемых створов, а также основные гидрологические характеристики рек представлены в табл. 1. Из-за значительного количество пропусков в рядах среднемесячных расходов по г/п р. Катунь – с. Сростки, для этой реки был выполнен анализ только среднегодовых расходов, восстановленных по рекам-аналогам.

Основной особенностью рек бассейна Верхней Оби (до Новосибирского водохранилища) является неоднородность условий формирования стока, обусловленная сложностью рельефа. Обь, образованная при слиянии Бии и Катуни, является равнинной рекой, а водосборы основных крупных притоков расположены в пределах Алтайской горной области, поэтому их гидрологический режим разнообразен.



Рис. 1. Картограмма бассейна Верхней Оби до Новосибирского водохранилища.
 Fig. 1. Schematic map of the Upper Ob basin up to the Novosibirsk reservoir.

Большинство исследуемых рек являются притоками р. Оби I порядка, которые условно можно отнести к категории средних рек (согласно ГОСТ 19179-73², это реки с площадью бассейна от 2000 до 50 000 км²). Для исследования влияния климатических изменений на сток использование в качестве объектов исследования средних рек оптимально, поскольку динамика их стока определяется, в основном, климатическими факторами [8]. Малые реки Каменка и Белая являются притоками рек Катуни и Чулыша соответственно.

На большинстве рек крупные водохранилища отсутствуют. Исключение – р. Алей, сток которой в верхнем течении зарегулирован Гилевским водохранилищем (построено во второй половине 1970-х годов, начало эксплуатации – 1980 г.) и р. Каскала с водохранилищем в с. Ребриха, построенным в конце 1970-х годов.

² ГОСТ 19179-73. Государственный стандарт Союза ССР. Гидрология суши. Термины и определения.

Таблица 1. Основные гидрологические характеристики рек бассейна Верхней Оби в исследуемых створах [11]

Table 1. Main hydrological characteristics of rivers of the Upper Ob basin in the sections under study

Река – пост	Открыт/ перенесен, гг.	Площадь водосбора, км ²	Среднегодовые величины основных гидрологических характеристик		
			расход воды, м ³ /с	модуль стока, л/(с•км ²)	слой стока, мм
р. Бия – г. Бийск	1894	36 900	477	12,9	408
р. Катунь – с. Сростки	1919	58 400	633	10,8	342
р. Каменка- с. Советское	1959	1730	12,5	7,21	228
р. Песчаная– с. Точильное	1931	4720	32,9	6,96	220
р. Ануй – с. Солонешное	1944/1985	2540	17,3	6,81	215
р. Ануй – свх. Ануйский	1961	4870	31,1	6,39	201
р. Чарыш – с. Чарышское	1959	7180	92,3	12,8	406
р. Чарыш – свх. Чарышский*	1933	20 700	192	9,26	292
р. Белая – с. Бугрышиха	1960	1140	26,3	23,1	728
р. Алей – с. Староалейское	1959/1962	2070	21	10,1	318
р. Алей – г. Алейск	1953	18 700	34,8	1,85	59
р. Касмала – с. Рогозиха	1939	1650	2,12	1,29	41
р. Чумыш – пгт Тальменка	1934/1973	20 600	146	7,09	223
р. Обь – г. Камень-на-Оби	1893	216 000	1570	7,26	230

Примечание: * – пост закрыт в 2016 г.

Определение сроков гидрологических сезонов для каждого створа выполняли по рядам среднемесячных расходов воды в соответствии с методикой [8], с поправкой на то, что месяцы начала и окончания половодья определяли по среднемноголетней, а не наиболее ранней и поздней дате. Сроки зимней межени (ноябрь–март) и начала половодья (апрель) приняты одинаковыми для всех рек. Продолжительность половодья, соответственно, и его окончание зависят от типа водного режима и характера питания. Для малых (Касмала) и средних (Алей, Чумыш) равнинных рек с преимущественно снеговым питанием, а также рек, водосборы которых приурочены преимущественно к низкогогорьям и предгорьям (Ануй, Песчаная), окончание половодья приходится на май или июнь. У крупных горных рек со снего-дождевым питанием, водосборы которых расположены в нескольких высотных зонах, за счет неравномерного таяния снега и дождевых паводков летом сроки окончания половодья наблю-

даются в июле-августе (например, Чарыш, Бия). На р. Катунь, значительную часть водосбора которой занимают высокогорья с современным оледенением, половодье обычно заканчивается в сентябре. У р. Оби половодье растянуто во времени и часто проходит в две волны: сначала за счет таяния снега на равнине и в предгорьях, затем – в горах. Окончание половодья наблюдается, как правило, в июле.

Проверка гидрологических рядов на однородность. Проверка на однородность временного ряда данных может быть выполнена с помощью множества тестов, для которых нулевая гипотеза соответствует предположению об однородности ряда в заданном временном интервале. Указание на необходимость оценки однородности гидрологических рядов, а также критерии для этой оценки приведены в Руководстве по гидрологической практике (в таблице II.6.1.)³.

Традиционно в отечественных исследованиях для анализа рядов на однородность используются критерии Стьюдента и Фишера [8, 13]. Первый определяет стационарность выборок относительно средних значений, второй – дисперсий. Эти критерии рекомендованы соответствующими нормативными документами по гидрологическим расчетам^{1,4}. При расчете данных критериев предполагается разбиение временного ряда либо на две равные части, либо по году нарушения стационарности. В работах по оценке климатообусловленных изменений стока, например [8], границей разбиения гидрологического ряда выбран 1976 г. (начало резкого роста температур). Недостаток такого подхода в том, что реальный год нарушения стационарности, как правило, неизвестен. Кроме того, критерий Фишера корректно применять только в случае принадлежности анализируемых выборок к нормальному закону распределения, что не всегда выполняется.

В соответствии с принятой в настоящее время международной практикой при проверке однородности рядов признано наиболее целесообразным использовать комбинированный статистический подход с использованием нескольких тестов. Если большая часть из них показывает значимые результаты, то это свидетельствует о нарушении однородности³. В работе [14] рекомендуется использовать четыре статистических метода, из которых два параметрических, предполагающих нормальное распределение ряда данных: стандартный нормальный тест для проверки однородности рядов Александерсона (SNHT) [15], Buishand's test [16], третий, использующий непараметрический критерий (Pettitt's test) [17], и четвертый, основанный на отношении фон Неймана [18]. Первые три теста при нарушении однородности ряда определяют наиболее ярко выраженную точку «перелома», не рассматривая другие возможные точки. Поэтому определение года «перелома» различными тестами и на разной длине ряда может быть неоднозначным.

³ Руководство по гидрологической практике. Т. II. Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов (ВМО № 168). Женева: ВМО, 2012. 324 с.

⁴ Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор-История, 2010. 162 с.

Если не выполняется только один из тестов, ряд считается однородным. В случае, когда два теста отрицают однородность на 5 % уровне значимости, ряд относят к сомнительным и дальнейшие операции с ним и выводы на его основе следует делать с осторожностью. Если наличие неоднородности ряда подтверждается тремя и более тестами, он признается неоднородным [14].

Статистические методы для анализа временных рядов являются универсальными. Указанные выше критерии для анализа стока рек используются в российских [9] и зарубежных [12, 19, 20] исследованиях. В работе [20] представлен обзор литературы по применению этих тестов как к климатическим, так и к гидрологическим показателям. Преимуществом тестов является возможность их применения к рядам данных, не подчиняющихся закону нормального распределения.

В данной работе использован комбинированный подход к оценке однородности рядов. На первом этапе выполнен анализ с помощью SNHT, Buishand's test, Pettitt's test и Neumann's test [18]. Затем неоднородные ряды были проанализированы при помощи традиционных критериев Стьюдента и Фишера, при этом разбиение ряда осуществлялось по определенному тестами году нарушения однородности (или годам – если разные тесты определяли год «перелома» по-разному). При расчете критерия Фишера ряды предварительно анализировали на принадлежность к нормальному распределению с использованием теста Колмогорова–Смирнова. Все расчеты выполнены в среде MS Excel с использованием авторского приложения (для Pettitt's test) и условно бесплатной надстройки XLStat.

Дополнительно к перечисленным тестам построены и проанализированы разностные и суммарные интегральные кривые. Разностные интегральные кривые использовали для оценки циклических колебаний водности и выявления маловодных и многоводных фаз гидрологического цикла. Суммарные интегральные кривые позволяют графически определить момент нарушения стационарности ряда и направление изменения стока.

Оценка однородности гидрологических рядов не предполагает выделения периодической составляющей временного ряда⁴, достаточно приведения ряда к многолетнему периоду⁵, при этом продолжительность ряда более 50 лет считается достаточной [СП 47.13330.2016]⁶. Анализируемые ряды охватывают период 1960–2020 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Годовой сток

Период 1960–2020 гг. характеризуется положительными тенденциями годового стока на реках бассейна Верхней Оби. Анализ разностных интеграль-

⁴ Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений. СПб.: Ротапринт ГНЦ РФ АА-НИИ, 2007. 66 с.

⁶ СП 47.13330.2016. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.

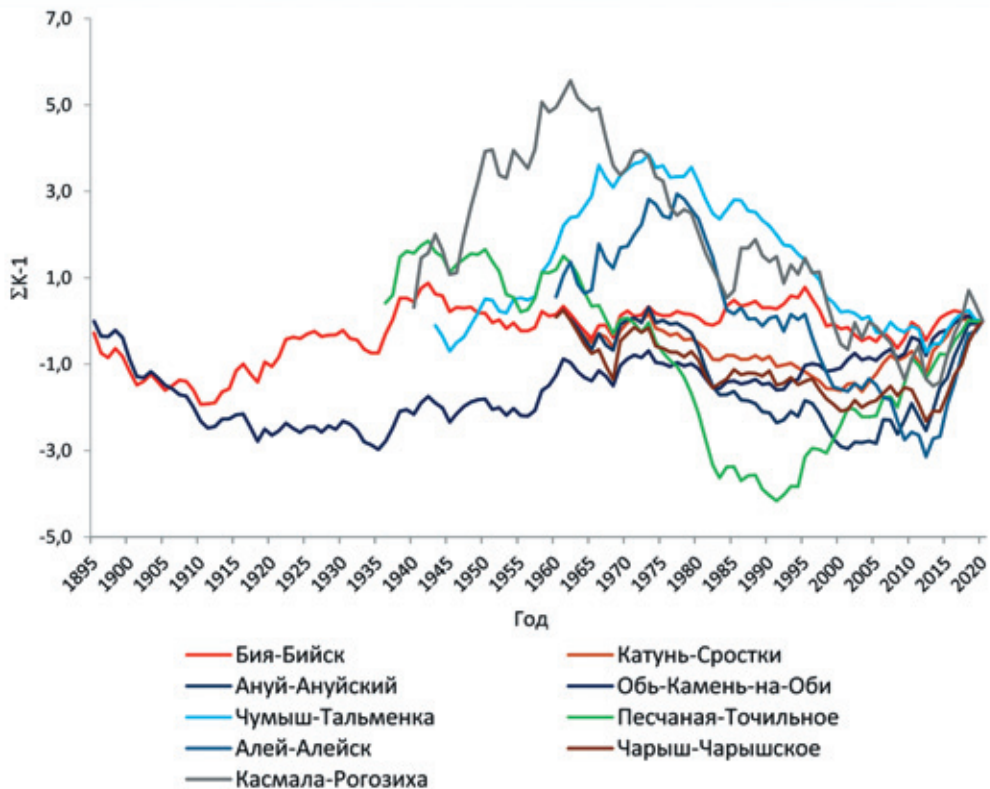


Рис. 2. Разностные интегральные кривые среднегодовых расходов рек бассейна Верхней Оби.

Fig. 2. Difference integral curves of average annual runoff of rivers in the Upper Ob basin.

ных кривых (рис. 2) показал, что большинство рек с 2012 г. находятся в многоводной фазе. Снижение расходов воды наблюдается на реках Бия и Чумыш.

Статистический анализ с применением комплекса тестов, включающих Pettitt's test, Standard normal homogeneity test (SNHT), Buishand range test и Neumann's test, свидетельствует о нарушении однородности рядов среднегодовых расходов на реках Ануй, Песчаная, Чарыш в створе с. Чарышское, Чумыш (табл. 2). Ряд расходов р. Алей можно отнести к «сомнительным».

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты анализа среднегодовых расходов р. Ануй с применением Pettitt's test, Standard normal homogeneity test, Buishand range test и методом разностной и суммарной интегральных кривых.

На реках Ануй и Чарыш (табл. 2) нарушение однородности ряда произошло в 2000–2012 гг., что графически подтверждают интегральные кривые. С 2012 г. началась многоводная фаза на большинстве рек (рис. 2). На р. Песчаной отчетливо выделяется смена фаз водного режима в 1991 г. Таким образом, нарушение стационарности рядов отражает изменение стока, обусловленное природно-климатическими факторами. Нарушение однородности расходов под влиянием климатических изменений произошло позднее 1976 г., указанного в [8].

Таблица 2. Результаты анализа рядов среднегодовых расходов на однородность
Table 2. Results of homogeneity analysis of series of average annual runoff

Река – створ	Метод*						Тенденция +/-
	Pettitt's test	Standard normal homogeneity test (SNHT)	Buishand's test	Von Neumann's test	t	F	
р. Бия – г. Бийск	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Катунь – с. Сростки	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Каменка – с. Советское	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Песчаная – с. Точильное	1991	1991	1991	неоднородный	4,8	1,02	+
р. Ануй – свх. Ануйский	2001	2012	2001	неоднородный	4	1,30	+
р. Ануй – с. Солонешное	2000	2000	2000	неоднородный	3,32 4,04	<u>1,61</u> 1,5	+
р. Чарыш – с. Чарышское	2000	2014	однородный	неоднородный	2,4 3,8	<u>1,09</u> 3,14	+
р. Чарыш – свх. Чарышский	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Белая – с. Бугрышиха	однородный	2012	однородный	однородный			
р. Алей – с. Староалейское	однородный	однородный	однородный	неоднородный			
р. Алей – г.Алейск	однородный	2012	однородный	неоднородный			+
р. Касмала – с.Рогозиха	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Чумыш – пгт Тальменка	1973	1973	1973	неоднородный	4,02	1,67	-
р. Обь – г. Камень-на-Оби	однородный	однородный	однородный	однородный			

Примечание: в таблицах 2–5 цветом выделены неоднородные ряды и указан год нарушения однородности. Значение t-критерия и F – критерия, рассчитанные для разных вариантов разделения ряда, приведены через дробь. Значения, превышающие критические, выделены.

Нарушение однородности ряда на р. Чумыш в 1973 г., очевидно, связано с переносом в этом году гидропоста на 310 м выше по течению. Перенос гидрометрического створа, вряд ли, существенно изменил расходы воды. Однако изменение формы поперечного сечения и скорости течения могли повлиять на результаты измерения расходов и кривую связи расходов и уровней. Реки

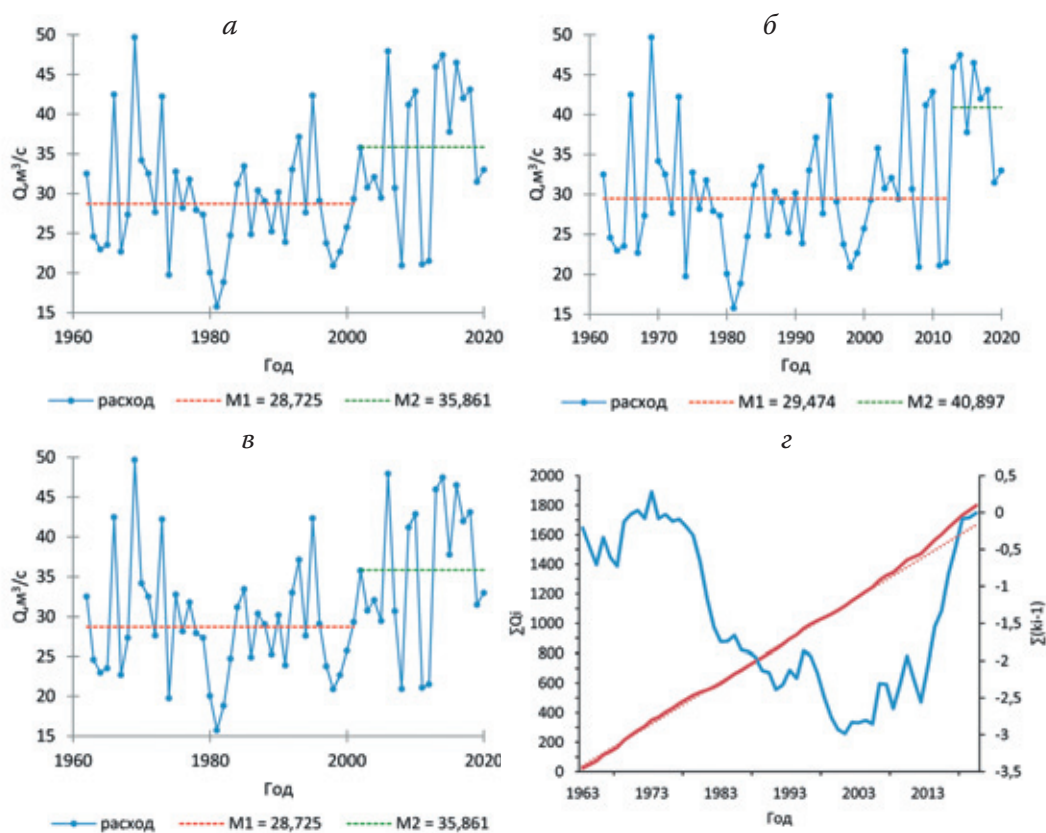


Рис. 3. Определение даты нарушения стационарности рядов среднегодовых расходов воды на г/п р. Ануй–свх. Ануйский: *а* – Pettitt's test; *б* – Standard normal homogeneity test; *в* – Buishand range test; *г* – методом интегральных кривых (M1 – среднее до, M2 – среднее после нарушения однородности ряда).

Fig. 3. Dating of the year with a breaking point in the series of average annual runoff at the gauge River Anuy–farm Anuysky, using: *a* – Pettitt's test; *b* – Standard normal homogeneity test; *c* – Buishand range test; *d* – method of integral curves (M1 – average before and M2 – average after stationarity disturbance).

с неустойчивым руслом (как у р. Чумыш), характеризуются неоднозначными кривыми связи [21]. В работе [22] описано нарушение однородности рядов расходов воды в связи с переносом гидрологических постов и, как следствие, изменением кривой связи. Так или иначе, этот вопрос является темой отдельного исследования, выходящего за рамки представленной работы.

Сезонный сток

На всех исследуемых реках бассейна Верхней Оби фиксируется увеличение стока зимней межени. Эта тенденция, характерная для большинства рек России, объясняется потеплением климата, увеличением количества оттепелей, и, соответственно, грунтового питания рек [8, 13, 23]. В работе [1] в качестве причины увеличения стока зимней межени в бассейне р. Волги указывается также рост осенних осадков.

Таблица 3. Результаты анализа на однородность расходов зимней межени
Table 3. Results of homogeneity analysis of winter low-water flow rates

Река – створ	Метод						Тенденция +/-
	Pettitt's test	Standard normal homogeneity test (SNHT)	Buishand's test	Von Neumann's test	t	F	
р. Бия – г. Бийск	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Каменка – с. Советское	2006	2009	2009	неоднородный	<u>4,04</u> 4,76	-	+
р. Песчаная – с. Точильное	1992	1992	1992	неоднородный	5,29	3,84	+
р. Ануй – с. Солонешное	1994	2009	1994	неоднородный	<u>5</u> 5,8	<u>6,25</u> 5,26	+
р. Ануй-свх Ануйский	1999	2009	2009	неоднородный	<u>3,7</u> 5,1	<u>2,94</u> 2,32	+
р. Чарыш – с. Чарышское	2003	2013	2006	неоднородный	<u>4,7</u> <u>7,4</u> 5,3	<u>4,16</u> <u>2,17</u> 4,76	+
р. Чарыш – свх. Чарышский	1999	2013	2006	неоднородный	<u>3,9</u> <u>6,04</u> 4,05	<u>2,27</u> <u>1,05</u> 2,5	+
р. Белая – с. Бугрышиха	2009	2012	2012	неоднородный	<u>4,4</u> 5,3	<u>0,94</u> 2,1	+
р. Алей – с. Староалейское	однородный	2013	2012	неоднородный	5,6	2,85	+
р. Алей – г. Алейск	1986	2013	1992	неоднородный	<u>6,7</u> <u>5,9</u> 7,95	<u>4,34</u> <u>3,84</u> 1,17	+
р. Касмала – с.Рогозиха	2000	2013	2000	неоднородный	<u>3,84</u> 3,89	-	+
р. Чумыш – пгт Тальменка	2001	2013	2006	неоднородный	<u>3,1</u> <u>4,25</u> 3,76	<u>1,31</u> <u>1,51</u> 1,2	+
р. Обь – г. Камень-на-Оби	1992	2009	1992	неоднородный	<u>4</u> 5,1	<u>3,03</u> 2,94	+

Анализ рядов зимних расходов в бассейне Верхней Оби показал, что у всех рек они неоднородны, за исключением р. Бия (ряд характеризуется как «сомнительный») (табл. 3). Наиболее ранняя дата нарушения однородности ряда зимних расходов приходится на 1992 г. (р. Песчаная). Для остальных рек Standard

normal homogeneity test (SNHT) определяет этот момент 2009 г. или 2012–2013 гг., согласно Pettitt's test и Buishand's test разброс дат достаточно большой.

Сток летне-осенней межени на реках бассейна Верхней Оби характеризуется разнонаправленными изменениями. Ряды расходов летне-осенней межени, в большинстве случаев, однородны (табл. 4). Нарушение однородности ряда характерно для рек Песчаная (1983 г.), Ануй (2001 г.), Касмала и Алей (1983–1985 гг.). Для двух последних рек это, очевидно, связано с зарегулированием их стока, что подтверждается определенными при помощи тестов годами нарушения однородности ряда.

Таблица 4. Результаты анализа на однородность расходов летне-осенней межени

Table 4. Results of homogeneity analysis of summer-autumn low-water flow rates

Река – створ	Метод						Тенденция +/-
	Pettitt's test	Standard normal homogeneity test (SNHT)	Buishand's test	Von Neumann's test	t	F	
р. Бия – г. Бийск	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Каменка – с. Советское	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Песчаная – с. Точильное	1983	1983	1983	неоднородный	4,77	1,33	+
р. Ануй – с. Солонешное	1998	однородный	2001	неоднородный	3,04 3,28	<u>1,1</u> 1,25	+
р. Ануй – свх Ануйский	2001	2001	2001	неоднородный	3,6	1,56	+
р. Чарыш – с. Чарышское	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Чарыш – свх Чарышский	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Белая – с. Бугрышиха	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Алей – с. Староалейское	1985	2013	2000	неоднородный	2,9 4,2 3,6	3,45 <u>1,56</u> 3,03	+
р. Алей – г. Алейск	1985	1985	1985	неоднородный	6,26	0,30	+
р. Касмала – с. Рогозиха	1983	однородный	1984	неоднородный	2,91	1,61	+
р. Чумыш – пгт Тальменка	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Обь – г. Камень-на-Оби	однородный	однородный	однородный	однородный			

Изменение стока половодья на разных реках также носит разнонаправленный характер, нарушение однородности рядов наблюдается на реках Чумыш, Каменка (1978–1979 гг.) и Алей (1978 г.) (табл. 5). На р. Алей в створе г. Алейска

тесты зафиксировали дату начала регулирования стока Гилевским водохранилищем, выше по течению (с. Староалейское) ряд однородный

Таблица 5. Результаты анализа на однородность расходов половодья
Table 5. Results of homogeneity analysis of spring flood runoff

Река – створ	Метод						Тенденция +/-
	Pettitt's test	Standard normal homogeneity test (SNHT)	Buishand's test	Von Neumann's test	t	F	
р. Бия– г. Бийск	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Каменка-с. Советское	1979	1979	1979	однородный	3,4	2,5	–
р. Песчаная – с. Точильное	1990	однородный	1991	однородный			
р. Ануй – с. Солонешное	2003	однородный	2003	однородный			
р. Ануй-свх Ануйский	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Чарыш – с. Чарышское	2000	однородный	однородный	однородный			
р. Чарыш – свх Чарышский	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Белая – с. Бугрышиха	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Алей – с. Староалейское	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Алей-г. Алейск	1978	1977	1978	неоднородный	4,3	2,37	–
р. Касмала – с. Рогозиха	однородный	однородный	однородный	однородный			
р. Чумыш – пгт Тальменка	1979	1979	1979	неоднородный	4,17	2,18	–
р. Обь – г. Камень-на-Оби	однородный	однородный	однородный	однородный			

После анализа рядов годовых и сезонных расходов с помощью Pettitt's test, Standard normal homogeneity test (SNHT), Buishand's test и von Neumann's test для каждого неоднородного ряда проведен t-тест (табл. 2–5): т. к. в ряде случаев год нарушения однородности определен неоднозначно, расчет выполнен для всех вариантов «разделения ряда», значения t-критерия приведены в таблицах через дробь. Для всех гидрологических рядов с зафиксированной точкой «перелома» критерий Стьюдента превышает критическое значение при $\alpha = 5\%$, что подтверждает неоднородность рядов по среднему значению. В случае, если определялись разные годы нарушения однородности, макси-

мальное значение t-критерия соответствует разделению выборки с использованием Standard normal homogeneity test (SNHT).

В исследовании [24] отмечается, что параметрические критерии проверки однородности дисперсий, к которым относится критерий Фишера, чрезвычайно чувствительны к малейшим отклонениям от нормальности, что негативно отражается на корректности статистических выводов. По результатам теста Колмогорова–Смирнова, для большинства рядов подтверждается гипотеза об их принадлежности к нормальному закону распределения, за исключением зимних расходов рек Каменка и Касмала. Выборки, принадлежащие к нормальному распределению, проанализированы с использованием F-критерия. Часть рядов, в основном зимних расходов, характеризуются неоднородностью дисперсий. Критическое значение F-критерия определяется в зависимости от количества элементов в сравниваемых выборках, т. е. существенно зависит от точки разбиения. В случаях неоднозначного определения года нарушения однородности, максимальная разница дисперсий соответствует разделению выборки с использованием Pettit's test либо Buishand's test.

Значимые расчетные значения F-критерия для расходов зимней межени свидетельствуют об увеличении дисперсии, что совпадает с результатами, приведенными в [9]. Для расходов половодья характерно уменьшение дисперсии в современный период, что может быть связано с зарегулированностью стока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Период с середины 1960-х годов характеризуется положительными тенденциями годового стока на реках бассейна Верхней Оби. По результатам анализа разностных интегральных кривых, многоводная фаза гидрологического цикла началась в 2012 г. Общие для большинства рек тенденции позволяют сделать вывод о том, что изменение стока носит естественный характер и связано с природно-климатическими факторами.

С использованием von Neumann's test, Standard normal homogeneity test (SNHT), Pettitt's test и Buishand's test проанализированы расходы воды на стационарность и определены годы нарушения однородности рядов. Последующее сравнение полученных выборок по критерию Стьюдента подтвердило их неоднородность по среднему значению. Таким образом, разделение гидрологических рядов целесообразно производить с учетом локальных границ стационарности, которые могут не совпадать даже у соседних водосборов. Наиболее чувствительным для оценки стационарности по среднему значению является Standard normal homogeneity test (SNHT).

Большинство рядов имеют нормальное распределение (по критерию Колмогорова–Смирнова). Значимые расчетные значения F-критерия свидетельствуют об увеличении дисперсии для расходов зимней межени и уменьшении – для половодья.

Неоднородность рядов годовых расходов, половодья и летней межени характерна, в основном, для притоков Оби, стекающих с северного макросклона Алтайской горной области. Это ожидаемо, т. к. именно средние реки являются

наиболее чувствительными индикаторами изменений климатических факторов формирования стока.

Повсеместно отмечается рост расходов зимней межени, ряды характеризуются неоднородностью средних значений по всем критериям. Это характерно для всех рек, независимо от размеров водосбора и типа водного режима, за исключением р. Бии, сток которой зарегулирован Телецким озером. Очевидно, что увеличение расходов зимней межени вызвано ростом зимних температур и увеличением осадков в октябре-ноябре.

В отличие от рек Европейской территории России, нарушение однородности рядов на большинстве рек бассейна Верхней Оби, обусловленное климатическими изменениями, произошло в 2000-е (реже в 1990-е) годы, что существенно позднее начала интенсивного роста температур (со второй половины 1970-х годов).

В некоторых случаях нарушение стационарности рядов связано не с климатическими факторами, а с антропогенным влиянием, что подтверждается зафиксированными тестами «переломными» годами, например, переносом гидрологического поста на р. Чумыш в 1973 г. или строительством Гилевского водохранилища на р. Алей в конце 1970-х годов.

Таким образом, при оценке однородности гидрологических рядов целесообразно совместное использование комплекса методов, включающих von Neumann's test, Standard normal homogeneity test (SNHT), Pettitt's test, Buishand's test и традиционные критерии Стьюдента и Фишера. Разделение временных рядов с учетом локальных границ стационарности делает оценки критериев Стьюдента и Фишера более обоснованными, при этом полученные результаты не противоречат исследованиям, выполненным ранее с помощью этих методов. Предложенный подход целесообразно использовать при гидрологических расчетах и прогнозах в условиях нестационарности, связанной с климатическими изменениями и антропогенным влиянием на реки и их водосборы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Болгов М.В., Филиппова И.А., Осипова Н.В., Коробкина Е.А., Трубецкова М.Д. Современные особенности гидрологического режима рек бассейна Волги // Вопросы географии. 2018. № 145. С. 206–218.
2. Лавров С.А., Калужный И.А. Влияние климатических изменений на сток весеннего половодья и факторы его формирования в бассейне Волги // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 6. С. 42–60. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-6-4.
3. Гельфан А.Н., Гусев Е.М., Калугин А.С., Крыленко И.Н., Мотовилов Ю.Г., Насонова О.Н., Миллионщикова Т.Д., Фролова Н.А. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 2. Влияние изменения климата на водный режим рек России в 21 веке // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 270–285. DOI: 10.31857/S0321059622030051.
4. Гельфан А.Н., Фролова Н.А., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 36–79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79.
5. Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Грек Е.Н., Лобанова А.Г., Молчанова Т.Г. Оценка современных изменений максимального стока рек России // Метеорология и гидрология. 2019. № 11. С. 46–55.

6. Болгов М. В., Филиппова И. А. Об определении расчетных характеристик стока в условиях нарушения однородности временных рядов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 5. С. 7–17. DOI: 10.35567/19994508_2022_5_1.
7. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова; Росгидромет. СПб.: Научное издание, 2022. 676 с.
8. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. СПб.: ГГИ, 2008. 600 с.
9. Фролова Н.А., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т. 49. № 3. С. 251–269. DOI: 10.31857/S032105962203004X.
10. Болгов М.В. Оценка гидрологических и водохозяйственных характеристик в условиях неопределенности факторов формирования // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2016. № 4. С. 6–17. DOI: 10.35567/1999-4508-2016-4-1.
11. Ресурсы поверхностных вод. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Ч. 1: Реки и каналы. Т. 1: РСФСР. Вып. 10. Бассейны Оби (без бассейна Иртыша), Надыма, Пура, Таза / под ред. Ж.С. Попова. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 542 с.
12. Волчек А.А., Сидак С.В., Парфомук С.И. Многолетняя изменчивость стока рек Беларуси в условиях изменения климата и антропогенных воздействий // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания: сб. трудов IV Межд. научно-практ. конф., посвященной 55-летию Брестского государственного технического университета и 50-летию факультета инженерных систем и экологии, Брест, 7–8 октября 2021 г. Брест: БрГТУ, 2021. С. 101–113.
13. Таврыкина О.М., Шмакова М.В., Булак И.А., Русина А.О., Громадская Е.И. Сток трансграничных рек Республики Беларусь и России в условиях изменяющегося климата // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 2. С. 101–114. DOI: 10.35567/19994508-2024-2-101-114.
14. Wijngaard J.B, Klein Tank A.M.G, Können G.P. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series // International Science Journal of Climatology. 2003. 23(6). P. 679–692. DOI: 10.1002/joc.906.
15. Alexandersson H. A homogeneity test applied to precipitation data // Journal of Climatology. 1987. No 6. P. 661–675. DOI:10.1002/JOC.3370060607.
16. Buishand T.A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall data // Journal of Hydrology. 1982. Vol. 58. P. 11–27. DOI:10.1016/0022-1694(82)90066-X.
17. Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change-point problem // Applied Statistics. 1979. 28(2). P. 126–135.
18. Neumann J. von. Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance // The Annals of Mathematical Statistics. 1941. Vol. 12(4). P. 367–395.
19. Drissia T. K., Jothiprakash V., Anitha A. B. Statistical classification of streamflow based on flow variability in west flowing rivers of Kerala, India // Theoretical and applied climatology. 2019. Vol. 137(3). P. 1643-1658.
20. Vezzoli, R., Pecora, S., Zenoni, E., Tonelli, F. Data analysis to detect inhomogeneity, change points, trends in observations: an application to Po river discharge extremes. CMCC Research Paper. 2012. No. 138.
21. Двинских С.А., Девяткова Т.П., Китаев А.Б., Тереханова Т.А. Динамика кривых расходов воды как индикатор русловых процессов // Географический вестник. 2012. № 4(23). С. 30–40.
22. Будник С.В. О переносе створов гидрологических постов и однородности данных наблюдений за стоком воды // Современные проблемы водохранилищ и их водосборов: труды VIII Всеросс. научно-практ. конф. с межд. участием, Пермь, 27–30 мая 2021 г. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет, 2021. С. 36–40.
23. Коробкина Е.А., Филиппова И.А., Харламов М.А. Оценка стока в бассейне р. Дон: необходимость смены парадигмы гидрологических расчетов // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 663–673. DOI: 10.31857/S0321059620060073.

24. Лемешко Б.Ю. Критерии проверки гипотез об однородности. Руководство по применению. М.: Научно-издательский центр ИНФРА-М, 2021. 248 с.

REFERENCES

1. Bolgov M.V., Filippova I.A., Osipova N.V., Korobkina E.A., Trubetskova M.D. Present features of the hydrological regime of the rivers in the Volga River basin. *Problems of Geograpy*. 2018. No. 145. P. 206–218 (In Russ.).
2. Lavrov S.A., Kalyuzhnyi I.L. Climatic changes impact upon the spring high-water runoff and its formation factors in the Volga basin. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2016. No. 6. P. 42–60. (In Russ.).
3. Gelfan A.N., Gusev E.M., Kalugin A.S., Krylenko I.N., Motovilov Yu.G., Nasonova O.N., Millionshchikova T.D., Frolova N.L. Runoff of Russian rivers under current and projected climate change: A review 2. Climate change impact on the water regime of Russian Rivers in the XXI century. *Water Resources*. 2022. Vol. 49(3). P. 351–365. DOI: 10.1134/S0097807822030058
4. Gelfan A., Frolova N., Magritsky D., Kireeva M., Grigoriev V., Motovilov Yu., Gusev E. Climate change impact on annual and maximum runoff of Russian rivers: diagnosis and projections. *Fundamental and Applied Climatology*. 2021. Vol. 7 (1). P. 36–79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79 (In Russ.).
5. Georgievskii V.Y., Grek E.A., Grek E.N., Lobanova A.G., Molchanova T.G. Assessment of modern changes in maximum river flow in Russia. *Russian Meteorology and Hydrology*. 2019. Vol. 44 (11). P. 739–745. DOI: 10.3103/S1068373919110037 (In Russ.).
6. Bolgov M.V., Filippova I.A. On the determination of the calculated runoff characteristics in conditions of time series homogeneity violation. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2022. No. 5. P. 7–17. DOI: 10.35567/19994508_2022_5_1 (In Russ.).
7. Third assessment report on climate changes and their consequences on the territory of the Russian Federation / ed. Kattsov V. M.; Roshydromet. St. Petersburg: Science-consuming technologies, 2022. 676 p. (In Russ.).
8. Water resources of Russia and their use / ed. Shiklomanov I.A., St. Petersburg: SHI, 2008. 600 p. (In Russ.).
9. Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigoriev V.Yu., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Stream flow of Russian rivers under current and forecasted climate changes: a review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of Russian Rivers by observation data. *Water Resources*. 2022. Vol. 49 (3). P. 333–350. DOI: 10.1134/S0097807822030046 (In Russ.).
10. Bolgov M.V. Assessment of hydrological and water management characteristics under conditions of uncertainty of the formation factors. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2016. No. 4. P. 6–17 (In Russ.).
11. Surface water resources. Long-term data on the regime and resources of land surface waters. Part 1: Rivers and canals. Vol. 1: RSFSR, Vol. 10: The basins of rivers Ob (without the Irtysh basin), Nadya, Pura, Taza. / ed. Popov J.S. L.: Gidrometoizdat, 1984. 542 p. (In Russ.).
12. Volchak A.A., Sidak S.V., Parfomuk S.I. Long-term variability of the river runoff in Belarus in the conditions of climate changes and anthropogenic influences. Current scientific, technical and environmental problems of habitat conservation: proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference dedicated to the 55th anniversary of Brest State Technical University and the 50th anniversary of the Faculty of Engineering Systems and Ecology, Brest, October 7–8, 2021 Brest: BrSTU, 2021. P. 101–113 (In Russ.).
13. Taurykina A.M., Shmakova M.V., Bulak I.A., Rusina A.O., Hramadskaya A.I. The flow of transboundary rivers of the Republic of Belarus and Russia in a changing climate. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*. 2024. No. 2. P. 101–114. DOI:10.35567/19994508-2024-2-101-1 (In Russ.).
14. Wijngaard J.B., Klein Tank A.M.G., Können G.P. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *International Journal of Climatology*. 2003. Vol. 23(6). P. 679–692. DOI: 10.1002/joc.906.
15. Alexandersson H. A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*. 1987. No. 6. P. 661–675. DOI:10.1002/JOC.3370060607.

16. Buishand T.A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall data. *Journal of Hydrology*. 1982. Vol. 58. P. 11–27. DOI:10.1016/0022-1694(82)90066-X.
17. Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*. 1979. Vol. 28(2). P. 126–135.
18. Neumann J. von. Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance. *The Annals of Mathematical Statistics*. 1941. Vol. 12(4). P. 367–395.
19. Drissia T. K., Jothiprakash V., Anitha A. B. Statistical classification of stream flow based on flow variability in west flowing rivers of Kerala, India. *Theoretical and applied climatology*. 2019. Vol. 137. P. 1643–1658. DOI: 10.1007/s00704-018-2677-0.
20. Vezzoli, R., Pecora, S., Zenoni, E., & Tonelli, F. Data analysis to detect inhomogeneity, change points, trends in observations: an application to Po river discharge extremes. CMCC Research Paper. 2012. No. 138.
21. Dvinskikh S.A., Devyatkovskaya T.P., Kitaev A.B., Terekhanova T.A. Dynamics of water flow curves as an indicator of channel processes. *Geographical Bulletin*. 2012. No. 4(23). P. 30–40 (In Russ.).
22. Budnik S. V. About carry gauge line hydrological posts and uniformity of the given supervis. Modern problems of reservoirs and their catchments: proceedings of the VIII All-Russian scientific-practical conference with international participation (Perm, May, 27-30, 2021). Perm State University. Perm, 2021. P. 36–40 (In Russ.).
23. Korobkina E.A., Filippova I.A., Kharlamov M.A. Evaluating the runoff in the Don basin: the need to change the paradigm of hydrological calculations. *Water Resources*. 2020. Vol. 47 (6). P. 924–933. DOI: 10.1134/S009780782006007X (In Russ.).
24. Lemeshko, B. Yu. Criteria for testing homogeneity hypotheses. Practical manual. M.: “Scientific Publishing Center INFRA-M”, 2021. 248 p. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Самойлова Светлана Юрьевна, канд. геогр. наук, старший научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1; ORCID: 0000-0002-3365-0048; e-mail: bastet@iwep.ru

Ловцкая Ольга Вольфовна, старший научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1; ORCID: 0000-0002-3942-1350; e-mail: lov@iwep.ru

Голубева Анастасия Борисовна, младший научный сотрудник, Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 656038, Барнаул, ул. Молодежная, 1; ORCID: 0000-0002-3942-1350; e-mail: apticagolub@yandex.ru

About the authors:

Svetlana Y. Samoilova, Candidate of Geographic Sciences, Senior Researcher, SB RAS Institute for Water and Environmental Problems. ul. Molodezhnaya 1, Barnaul 656038, Russia; ORCID: 0000-0002-3365-0048, e-mail: bastet@iwep.ru

Olga V. Lovtskaya, Senior Researcher, SB RAS Institute for Water and Environmental Problems. ul. Molodezhnaya 1, Barnaul 656038, Russia; ORCID: 0000-0002-3942-1350, e-mail: lov@iwep.ru

Anastasia B. Golubeva, Junior Researcher, SB RAS Institute for Water and Environmental Problems. ul. Molodezhnaya 1, Barnaul 656038, Russia; ORCID: 0000-0002-3942-1350, e-mail: apticagolub@yandex.ru