

УДК 556.161

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4698

Шифр специальности ВАК: 1.6.16

Изменение гидрологических характеристик р. Оби под влиянием климатических изменений в 1922–2020 гг. (по данным наблюдений в г. Барнауле)

С.Ю. Самойлова✉, Е.В. Мардасова, А.А. Коломейцев

Институт водных и экологических проблем СО РАН, Россия, г. Барнаул

✉bastet@iwep.ru

Аннотация. *Актуальность* работы обусловлена нарушением стационарности гидрологических характеристик под влиянием потепления климата и необходимостью учета изменений стока при гидрологических расчетах и прогнозах. **Цель:** оценка стационарности гидрологических характеристик и анализ направленных изменений стока реки Оби у г. Барнаула и связанных с ними основных стокоформирующих факторов – температур воздуха и осадков по данным метеостанции г. Барнаула. **Методы:** комплексный географо-гидрометеорологический анализ, статистический анализ временных рядов, включающий: оценку однородности рядов с использованием критериев Фишера и Стьюдента, тестов Петита, Буишанда и Александерсона; исследование направленных изменений с использованием линейных трендов. **Результаты и выводы.** Выполнен анализ стационарности рядов метеорологических и гидрологических характеристик по гидропосту Барнаул и метеостанции Барнаул за период с 1922 по 2020 гг. с годовым, сезонным и месячным разрешением; определены годы нарушения однородности временных рядов. На основании выделенных условно однородных периодов выполнена количественная оценка изменений среднемесячных и среднесезонных расходов воды. Проанализированы линейные тренды средних и максимальных расходов и уровней воды, температуры воздуха и осадков, выполнена оценка их значимости. Выявлены климатические причины изменений стока р. Оби. Установлено, что нарушение стационарности рядов гидрологических характеристик является следствием изменения климатических факторов формирования стока, в первую очередь, температуры воздуха. Наиболее значимые изменения стока заключаются в его перераспределении внутри года. Отмечено статистически значимое увеличение расходов зимней межени на 20–30 %. В половодье характерен рост расходов в апреле и снижение – в мае–июне, однако эти изменения статистически незначимые. На фоне увеличения среднегодовых расходов воды произошло уменьшение максимальных расходов и уровней воды, а также снижение дисперсии годового и максимального стока, что говорит об увеличении его естественной зарегулированности. Изменения стока в период зимней межени и половодья выходят за рамки естественных колебаний водности, т. к. существенно изменилось соотношение талого и базисного стока. Начало нового квазистационарного периода на р. Оби в верхнем течении приходится на 80-е гг. XX в., в отличие от рек Европейской части России, у которых нарушение стационарности рядов соответствует началу интенсивного роста температуры в 1970-х гг.

Ключевые слова: река Обь, город Барнаул, изменение климата, стационарность, линейный тренд, расходы воды, максимальный сток, максимальные уровни воды

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00157, <https://rscf.ru/project/24-27-00157/>

Для цитирования: Самойлова С.Ю., Мардасова Е.В., Коломейцев А.А. Изменение гидрологических характеристик р. Оби под влиянием климатических изменений в 1922–2020 гг. (по данным наблюдений в г. Барнауле) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 4. – С. 75–88. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4698

UDC 556.161

DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4698

Changes in hydrological characteristics of the Ob River caused by climate change in 1922–2020 (according to the observations in Barnaul)

S.Yu. Samoilova✉, E.V. Mardasova, A.A. Kolomeytsev

Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, Barnaul, Russian Federation

✉bastet@iwep.ru

Abstract. Relevance. Violation of hydrological characteristics stationarity caused by climate change and the necessity to take into account the flow change in hydrological studies and prognoses. **Aim.** To assess the hydrological characteristics evaluation and analyze the Ob River flow directional changes near the city of Barnaul and the flow-forming factors related to the changes (air temperature and precipitations according to the Barnaul meteorological station data). **Methods.** Complex geographic-hydrological analysis; statistical analysis of time series including the evaluation of the time series homogeneity with the use of the Fisher and Student criteria, the Pettitt's, Buishand's and Alexandersson's tests; directional changes linear trends estimation. **Results and conclusions.** The authors have examined the meteorological and hydrological characteristics series stationarity according to Barnaul gauging station and Barnaul meteorological station from 1922 to 2020 with the annual, seasonal, and monthly resolution and detected the years with the time series homogeneity violations. Based on the conditionally selected homogenous periods the quantitative assessment of the average monthly and seasonal flow was performed. The linear trends of the average and maximum water flow and level, air temperature and precipitations were examined, their significance was assessed. The climate reasons for the Ob River flow changes were detected. During the study it was established that the hydrological characteristics series stationarity violation is caused by the climate flow-forming factors changes, predominantly by the air temperature changes. The main changes of the flow lie in its redistribution within a year. A statistically significant increase in winter low water discharge was marked, the figures being 20–30%. During the seasonal flood the discharge increases in April and decreases in May and June, however, these changes are not statistically significant. There was a decrease of the maximum water discharge and level as well as the dispersion reduction of the annual and maximum flow amid the increase of the annual average discharge of water, which indicates a natural flow regulation. The flow changes in the winter low water and seasonal flood go beyond natural fluctuations as the meltwater and base-flow ratio significantly changed. The new quasistationary period of the Ob River upper course starts in the 80s of the 20th century unlike the rivers in the European part of Russia, the violation of the time-series stationarity of which is correlated to the intense temperature increase in the 70s of the 20th century.

Key words: the Ob River, the city of Barnaul, climate change, homogeneity, linear trend, water discharge, maximum flow, maximum water levels

Acknowledgements: The research was carried out using the Russian Science Foundation grant no. 24-27-00157, <https://rscf.ru/project/24-27-00157/>

For citation: Samoilova S.Yu., Mardasova E.V., Kolomeytsev A.A. Changes in hydrological characteristics of the Ob River caused by climate change in 1922–2020 (according to the observations in Barnaul). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Asset Engineering*, 2025, vol. 336, no. 4, pp. 75–88. DOI: 10.18799/24131830/2025/4/4698

Введение

Начиная с середины 70-х гг. XX в. в связи с резким ростом глобальной температуры происходят изменения режима рек на территории России. Они выражаются в повсеместном росте меженных (в первую очередь, зимних) расходов. Вместе с тем отмечаются изменения стока половодья, носящие разнонаправленный характер [1]. Как показали исследования половодья на реках европейской части России, эти изменения могут быть настолько значительными, что существовавшие ранее представления о факторах формирования талого стока и разработанные на их основе прогнозы стали неак-

туальными [2, 3]. При традиционном подходе к прогнозированию стока половодья с использованием статистических методов требуется пересмотр предикторов для построения прогнозных моделей. Например, факторы, определяющие приходную часть водного баланса половодья, теряют свое значение, а определяющими становятся расходные составляющие водного баланса [3]. Уменьшение талой составляющей в стоке рек приводит к снижению предсказуемости годового стока от максимального запаса воды в снежном покрове, что имеет критические последствия для управления водными ресурсами [4].

В связи с этим анализ внутренних характеристик стока и стокоформирующих факторов (таких как тренд, стационарность, периодичность) в условиях климатических изменений является важным этапом при разработке гидрологических моделей для того, чтобы прогнозы половодья были более точными [4–7]. При этом, с одной стороны, мы можем проанализировать применимость стандартных статистических методов анализа стока, с другой – выявить значимое изменение факторов формирования стока [8].

Обзор традиционных методов, используемых для оценки стационарности гидрологических рядов и изменений стока, представлен в [1, 9, 10]. При этом в работах [9, 11] отмечается, что при использовании одних и тех же статистических критериев разными авторами могут быть получены противоречивые выводы о стационарности рядов и направленности изменений стока.

Целью работы является оценка направленных изменений стока реки Оби у г. Барнаула. Основными задачами являются: анализ однородности рядов метеорологических и гидрологических характеристик по гидропосту Барнаул и метеостанции Барнаул; определение момента нарушения однородности рядов с последующим их разделением на однородные периоды; оценка масштаба наблюдаемых изменений за период инструментальных наблюдений и определение их причин.

Авторами представленной работы не ставилась целью оценка пространственных изменений климата и стока. Данная работа направлена на статистическую оценку рядов гидрологических характеристик в заданном створе для последующей разработки прогнозных моделей талого стока.

Объект исследования

Обь – одна из крупнейших рек России, образуется от слияния рек Бии и Катунь. Площадь водосборного бассейна р. Оби в створе г. Барнаула – 169 тыс. км², средний расход воды – 1480 м³/с. Особенностью р. Оби в ее верхнем течении (до Новосибирского водохранилища) является то, что она имеет черты режима главных ее составляющих, берущих начало в горах Алтая. Питание реки смешанное, с преобладанием снегового.

По типу режима Обь относится к рекам с весенне-летним половодьем, во время которого проходит в среднем 65 % годового стока. Часто отмечается две волны половодья, первая обусловлена таянием снега на равнине, вторая – результат таяния горных снегов и ледников.

Исходные данные и методы исследования

Гидрологический пост на р. Оби в г. Барнауле является одним из старейших в регионе – наблюдение

за уровнями воды ведутся с 1893 г., а за расходами – с 1922 г. Данные наблюдений публикуются в изданиях государственного водного кадастра («гидрологические ежегодники») с 1936 г. Данные о ежегодных средних и максимальных расходах воды содержатся в сборниках «Основные гидрологические характеристики». Таким образом, доступный ряд наблюдений за расходами воды охватывает период с 1922 по 2020 гг., за уровнями воды – 1936–2020 гг.

В то же время на участке р. Оби до г. Барнаула и на ее крупнейших притоках, формирующих основной объем стока, отсутствуют водохранилища, т. е. изменения стока носят условно естественный характер и связаны с изменением климатических факторов.

Метеостанция в г. Барнауле также является одной из старейших в России, наблюдения на ней ведутся с 1836 г. Данные наблюдений за температурой воздуха содержатся на сайте ВНИИГМИ [12] и охватывают весь период инструментальных наблюдений. Ряд наблюдений за атмосферными осадками опубликован не в полном объеме по причине нарушения однородности ряда, связанного с изменением методики наблюдения за осадками: сменой дождемера с защитой Нифера на осадкомер Третьякова в начале 1950-х гг. и введением поправки на смачивание непосредственно на станции с 1966 г. [13, 14]. На сайте ВНИИГМИ представлено два архива данных об осадках с месячным разрешением. В первом представлены данные с 1966 г. по настоящее время, т. е. период, когда никаких изменений в методике наблюдений не происходило [15]. Второй – скорректированный архив, включающий данные о твердых и жидких осадках с введением всех видов поправок [16]. Доступные данные наблюдений за осадками охватывают период с 1936 г., так как в 1930-е гг. производился массовый перенос станций на открытое место [14]. Конкретно по г. Барнаулу – данные представлены с 1959 по 2015 гг.

На данном этапе мы решили ограничиться данными одной метеостанции для общей характеристики климатических изменений, чтобы обосновать возможные причины нарушения однородности гидрологических рядов. Безусловно, метеостанция, расположенная на равнинной территории, не может быть репрезентативной для всего бассейна, особенно в отношении осадков. Выбор метеостанции Барнаул обусловлен длительностью наблюдений на ней. Представляется весьма интересным выполнить совместный анализ гидрологических и метеорологических данных (по крайней мере, расходов воды и температуры воздуха) за весь доступный период наблюдений, с 1922 г. Такой длинный ряд метеонаблюдений имеется только по станции Барнаул. В отношении потепления климата и связанных с

ним процессов перераспределения стока данные метеостанции Барнаул, на наш взгляд, вполне показательны, поскольку колебания температуры в пределах региона в целом синхронны. Пространственно-временная оценка климатических изменений на территории Верхнеобского бассейна является предметом отдельного исследования, выходящего за рамки представленной работы.

Целью проверки рядов на однородность является установление принадлежности членов ряда к одной и той же генеральной совокупности. Специалистами Государственного гидрологического института для статистического анализа однородности гидрологических рядов рекомендованы критерии Фишера и Стьюдента [1]. Они являются общепринятыми [10] и широко используются в гидрологических исследованиях, например в [11, 17].

Согласно [10], расчетное значение статистики критерия Стьюдента определяется по формуле (1):

$$t = \frac{y_{срI} - y_{срII}}{\sqrt{\frac{n_1 \sigma_1^2 + n_2 \sigma_2^2}{n_1 + n_2}}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 2)}{n_1 + n_2}}, \quad (1)$$

где $y_{срI}$, $y_{срII}$, σ_1^2 , σ_2^2 – средние значения и дисперсии двух последовательных выборок; n_1 и n_2 – объемы выборок.

При анализе стационарности многолетних колебаний гидрологических характеристик исходный ряд, приведенный к многолетнему периоду, разбивается на две равные части, по которым производится оценка однородности выборочных средних.

Расчетные значения статистики Фишера определяются по формуле (2):

$$F = \frac{\sigma_j^2}{\sigma_{j+1}^2}, \quad (2)$$

где σ_j^2 – дисперсии двух следующих друг за другом частей выборок (j и $j+1$) объемом n_1 и n_2 .

Разбиение ряда может осуществляться как в предыдущем случае – на два равных периода, так и по предполагаемому году нарушения стационарности ряда, что предпочтительнее. В большинстве работ по оценке климатообусловленных изменений стока, например в [1, 11], границей разбиения гидрологического ряда является 1976 г. Критические значения критериев Фишера и Стьюдента, учитывающие внутрирядную скоррелированность и асимметричность распределений гидрологических рядов, представлены в табл. Б 13 и Б 15 [10].

В ряде работ, например в [18], отмечается, что классические тесты Фишера и Стьюдента корректно применять только при принадлежности анализируемых выборок нормальному закону распределения, что для гидрологических рядов не всегда выполняется. Кроме того, определить момент нарушения однородности ряда часто не представляется возможным.

В соответствии с принятой в настоящее время международной практикой, при проверке однородности временных гидрометеорологических рядов целесообразно использовать комбинированный статистический подход с применением нескольких тестов [18–20]. В работе [19] для оценки однородности рядов рекомендовано использовать четыре теста: Петита, Буишанда, Александерсона (Стандартный нормальный тест для проверки однородности рядов, SNHT) и Фон Неймана. Тест Петита непараметрический, остальные параметрические. Все тесты при нулевой гипотезе предполагают, что значения переменной независимы и одинаково распределены. Если только один из тестов отвергает нулевую гипотезу, ряд считается однородным. Если два теста – ряд считается «сомнительным». Если по результатам большинства тестов нулевая гипотеза отвергается, это свидетельствует о нарушении однородности ряда [19].

Преимуществом этого подхода является и то, что тесты Петита, Буишанда и Александерсона, согласно альтернативной гипотезе, предполагают наличие ступенчатого смещения среднего значения (перелома), т. е. способны определять год, в котором произошло нарушение однородности. В длинном временном ряду таких лет может быть несколько, при этом тест определяет только один «переломный» год, в котором значение критерия будет максимальным, остальные годы игнорируются. Поэтому определение «переломного» года может быть неоднозначным при использовании разных тестов и на разных временных интервалах.

Стандартный нормальный тест для проверки однородности рядов Александерсона (SNHT) [19] рассчитывается следующим образом (3), (4).

Ряд величин $Y_1, \dots, Y_n$ разбивается на две части, содержащие k и $n-k$ членов.

$$T(k) = k\bar{z}_1^2 + (n-k)\bar{z}_2^2, k = 1 \dots n, \quad (3)$$

где

$$\bar{z}_1 = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y}) / \sigma, \bar{z}_2 = \frac{1}{n-k} \sum_{i=k+1}^n (Y_i - \bar{Y}) / \sigma, \quad (4)$$

где σ – среднее квадратическое отклонение.

Если нарушение однородности произошло в году K , то $T(k)$ достигает максимума вблизи года $k=K$ образом (3), (4).

Тест Буишанда [19]. В этом тесте скорректированные частичные суммы определяются как:

$$S_n^* = 0; S_k^* = \sum_{i=1}^k (Y_i - \bar{Y}), \quad (5)$$

где $k = 1 \dots n$. Когда ряд однороден, значения S_k^* будут колебаться около нуля, поскольку систематических отклонений Y_i относительно их среднего значения $\bar{Y}$ нет. Если в году K имеется разрыв, то S_k^* достигает максимума (отрицательный сдвиг) или минимума (положительный сдвиг).

Непараметрический тест Петита [19]. Статистика X_k (6), для расчета которой используются ранги $r_1, \dots, r_n$ (номера в ранжированном ряду) гидрологических величин $Y_1, \dots, Y_n$:

$$X_k = 2 \sum r_i - k(n+1); X_K = \max_{0 \leq k \leq n} X_k, \quad (6)$$

где K – год нарушения однородности ряда.

Полученные значения X_K сравниваются с критическими, приведенными в работе [19].

Подобный подход использован при оценке стационарности климатических характеристик и речного стока в разных регионах мира [19, 21–24], в частности, в Беларуси [18]. В работах [11, 25] для определения года нарушения стационарности ряда использовался тест Петита совместно с разностными и интегральными кривыми.

В представленной нами работе для оценки стационарности рядов гидрологических и метеорологических характеристик использовался комбинированный подход. На первом этапе выполнена оценка с использованием критериев Фишера и Стьюдента. На втором этапе применены тесты Петита, Александерсона и Буишанда с целью определения года нарушения однородности, что дает возможность отследить момент начала реакции речной системы на климатические изменения. Оценка однородности выполнена на 5 % уровне значимости. Ряд признавался неоднородным в случае, если наличие неоднородности подтверждалось тремя и более тестами. Если неоднородность подтверждалась двумя тестами, ряд признавался «сомнительным», в соответствии с [19].

Для оценки направленности изменений проанализированы линейные тренды среднего значения по методу наименьших квадратов. Оценка значимости трендов производилась по значимости коэффициента корреляции [10]: коэффициент корреляции r оценивается по отношению к его случайной среднеквадратической ошибке σ_r (7).

$$\sigma_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n-1}}. \quad (7)$$

В случае, если $\frac{r}{\sigma_r} \geq \beta$, тренд значим при уровне значимости 5 % $\beta \approx 2$.

По сути, значимый тренд указывает на нарушение стационарности временного ряда, т. к. в этом случае закономерно изменяется во времени среднее значение гидрологической характеристики. В этом отношении данный подход близок к проверке однородности ряда по критерию Стьюдента [10].

В соответствии с (1)–(7) в среде Excel выполнен статистический анализ гидрологических характеристик: среднегодовых, среднемесячных и максимальных расходов воды, максимальных уровней воды; метеорологических характеристик: среднегодовых и среднемесячных температур, годовой и месячной суммы осадков. Длина рядов соответ-

ствует периоду инструментальных наблюдений за расходами воды – с 1922 по 2020 гг., и составляет в общей сложности порядка 100 лет.

Результаты и обсуждения

Среднемесячные и среднегодовые расходы воды. Анализ рядов среднемесячных и среднегодовых расходов показал неоднородность среднего значения (критерий Стьюдента) и однородность дисперсий (критерий Фишера) для расходов конца летне-осенней (октябрь) и всей зимней межени (с ноября по март). Для расходов марта, мая–июля, сентября и декабря, а также среднегодовых расходов характерна неоднородность дисперсий (критерий Фишера) (табл. 1).

Тесты Петита, Александерсона и Буишанда подтвердили неоднородность рядов расходов зимней межени (с ноября по март), причем в большинстве случаев момент нарушения однородности определяется 1982–1983 гг. (табл. 1).

Если для января и февраля годы нарушения определяются более-менее однозначно всеми тестами – 1982–1984, для ноября, декабря и марта они изменяются довольно существенно – от 1975 до 2012 гг.

Анализ средних расходов зимней межени однозначно свидетельствует о нарушении однородности ряда в 1982 г. (рис. 1). На рис. 1 представлен анализ ряда с использованием теста Буишанда (тесты Петита и Александерсона показали аналогичные результаты). Ряды расходов половодья и летне-осенней межени, а также среднегодовые расходы по результатам этих тестов являются однородными (табл. 1, рис. 1).

Линейные тренды и оценка их значимости рассчитаны для среднегодовых и среднемесячных расходов воды (табл. 2). На рис. 2 представлены графики изменения средних расходов воды и линейные тренды за год и гидрологические сезоны. Рассчитанные тренды (табл. 2) по уравнениям соответствуют коэффициентам корреляции от 0,04 (июнь) до 0,50 (март), средняя квадратическая ошибка которых составила от 0,08 до 0,1. Коэффициент корреляции r превышает удвоенную среднеквадратическую ошибку в уравнениях тренда для расходов с октября по март. Тренды являются статистически значимыми в колебаниях расходов зимней межени.

Таким образом, можно определенно утверждать о статистически значимом увеличении стока зимней межени. Направленность и количественная характеристика изменений расходов воды с ноября по март была оценена как разница между средними значениями расходов в условно однородные периоды, выделенные при помощи тестов Петита, Буишанда и Александерсона (табл. 1). Максимальный рост расходов воды, до 40,5 %, отмечен для рядов, момент нарушения однородности у которых определяется неоднозначно (ноябрь, декабрь и март). Средний рост расходов зимней межени составил 24 %.

Таблица 1. Результаты анализа на однородность среднемесячных и среднегодовых расходов воды р. Оби, г. Барнаул
Table 1. Results of the average monthly and annual water discharge homogeneity analysis in the Ob River, Barnaul

Месяц/Month	Критерий/Test													
	F-критерий/ F-criterion	t-критерий/ t-criterion	Петита Pettitt's				Александрсона SNHT				Буишанда Buishand's			
			Нарушение однородности Homogeneity violation	Средний расход, м³/с Average discharge, m³/s		Изменение/Change, %	Нарушение однородности Homogeneity violation	Средний расход, м³/с Average discharge, m³/s		Изменение/Change, %	Нарушение однородности Homogeneity violation	Средний расход, м³/с Average discharge, m³/s		Изменение/Change, %
				Q1	Q2			Q1	Q2			Q1	Q2	
I	1,34	3,90	1983	309	372	20,5	1983	309	372	20,5	1983	309	372	20,5
II	1,16	3,38	1982	274	331	21,0	1984	274	333	21,5	1984	274	333	21,5
III	1,49	3,27	1982	281	363	29,3	2012	297	480	61,1	1991	283	382	34,7
IV	1,26	1,16	-	2012	2012	0,0	-	2012	2012	0,0	-	2012	2012	0,0
V	2,30	1,80	-	3416	3416	0,0	-	3416	3416	0,0	-	3416	3416	0,0
VI	1,82	0,75	-	3646	3646	0,0	-	3646	3646	0,0	-	3646	3646	0,0
VII	2,06	0,69	-	2481	2481	0,0	-	2481	2481	0,0	-	2481	2481	0,0
VIII	1,14	0,96	-	1780	1780	0,0	-	1780	1780	0,0	-	1780	1780	0,0
IX	2,12	0,48	-	1304	1304	0,0	-	1304	1304	0,0	-	1304	1304	0,0
X	1,23	2,73	1968	993	1185	19,4	-	1095	1095	0,0	-	1095	1095	0,0
XI	1,38	3,70	1975	583	771	32,1	1993	604	840	39,0	1991	602	830	37,8
XII	1,82	3,38	1982	370	471	27,1	2008	390	548	40,5	1986	373	478	28,4
Год Year	1,95	0,45	-	1479	1479	0,0	-	1479	1479	0,0	-	1479	1479	0,0

Примечание: критические значения критериев Фишера F и Стьюдента t приняты в соответствии с [10]. Превышение критических значений критериев выделено в таблице курсивом. Q₁ и Q₂ – осредненные расходы воды в условно однородные периоды (для неоднородных рядов).

Note: Critical values of Fisher F and Student t criteria are in accordance with [10]. The exceeding of the critical value are italicized in the table. Q₁ and Q₂ are the average discharge in conditionally homogenous periods (for heterogenous series).

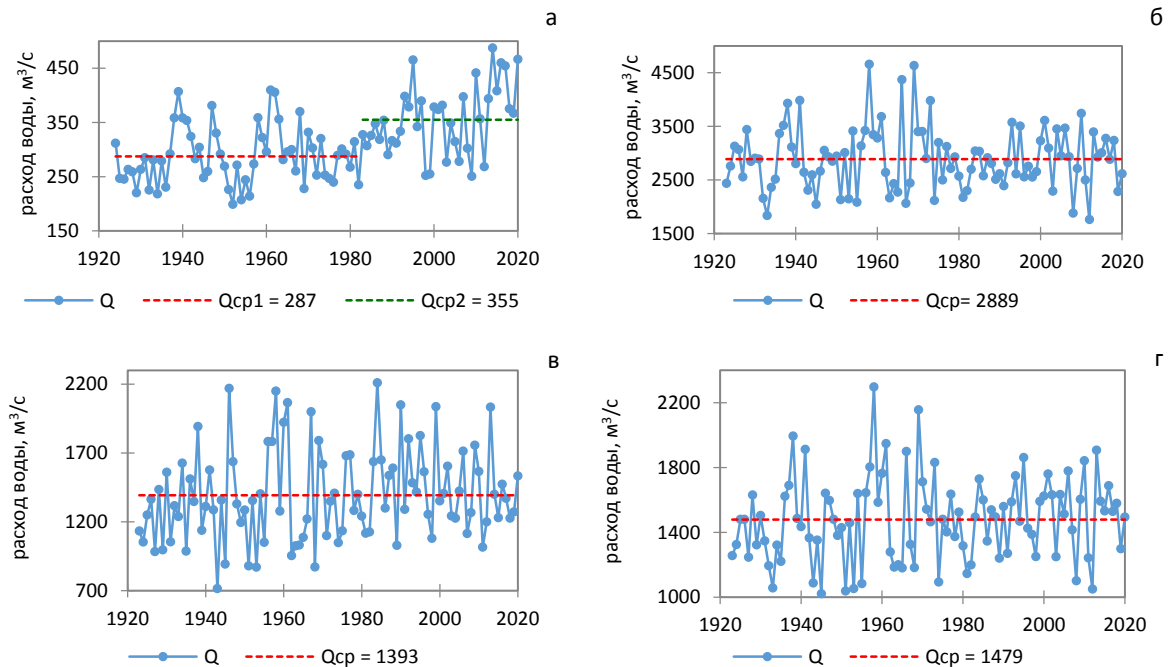


Рис. 1. Результат анализа на однородность расходов воды с использованием метода Буишанда (Buishand's test): а) зимней межени (ноябрь–март); б) половодья (апрель–июль); в) летне-осенней межени (август–октябрь); г) среднегодовых (Q – индивидуальный расход за отдельный год; Q_{ср} – осредненный за период)

Fig. 1. Results of the water discharge homogeneity analysis with the use of the Buishand's range test: а) winter low water (November–March); б) seasonal flood (April–July); в) summer-autumn low water period (August–October); г) average annual (Q – individual year average seasonal discharge; Q_{ср} – averaged for the observation period)

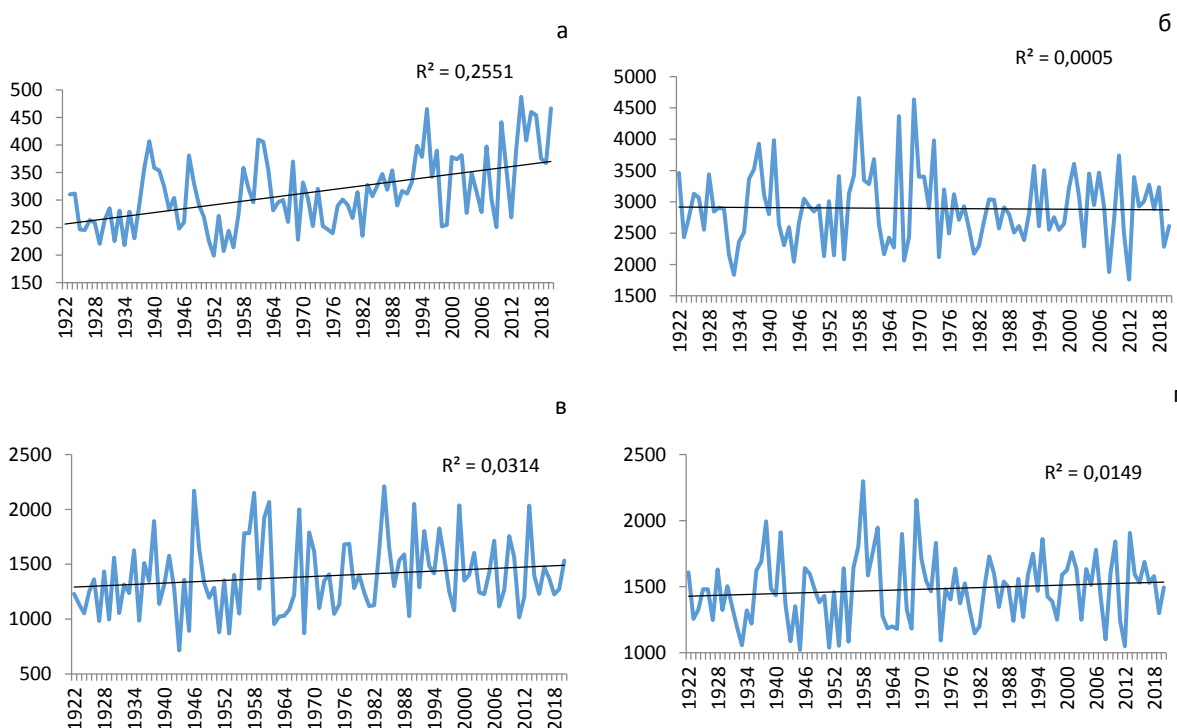


Рис. 2. График изменения расходов и линейный тренд: а) зимней межени (ноябрь–март); б) весеннего половодья (апрель–июль); в) летне-осенней межени (август–октябрь); г) среднегодовых

Fig. 2. Graphs of the changes in the water discharges and the linear trend: а) winter low water (November–March); б) seasonal flood (April–July); в) summer-autumn low water period (August–October); г) annual averaged

Таблица 2. Результаты анализа линейных трендов среднемесячных и годовых расходов р. Оби, г. Барнаул, за 1922–2020 гг.

Table 2. Results of the average monthly and annual water discharges linear trends analysis in the Ob River, Barnaul, for 1922–2020

Месяц Month	Уравнение линейного тренда Linear trend equation	r	σ_r	r / σ_r
I	$y = 1,066x + 278,7$	0,47	0,08	5,88
II	$y = 0,928x + 248,5$	0,44	0,08	5,5
III	$y = 1,551x + 234$	0,50	0,08	6,25
X	$y = 2,824x + 953,2$	0,26	0,09	2,89
XI	$y = 3,523x + 493,5$	0,42	0,08	5,25
XII	$y = 1,688x + 324,5$	0,44	0,08	5,5

Для остальных месяцев года ряды являются однородными, тренды имеют разнонаправленный характер и статистически незначимы. При этом следует отметить уменьшение изменчивости (дисперсии) годового стока и весеннего половодья. Показательны (хотя и статистически незначимы) тренды среднемесячных расходов в период с апреля по июль (половодье). Наблюдается рост расходов воды в апреле и уменьшение стока с мая по июль, очевидно, за счет сдвига снеготаяния на более ранние даты.

Максимальные расходы и уровни воды, с одной стороны, зависят от объема половодья, с другой стороны, в значительной степени обусловлены ме-

теорологическими условиями (интенсивность снеготаяния, жидкие осадки), поэтому были проанализированы отдельно (рис. 3, табл. 3).

Статистический анализ максимальных уровней показал их неоднородность по среднему значению (t-критерий), а максимальных расходов – по F-критерию. По результатам тестов Петита, Алесандерсона и Буишанда ряды являются однородными.

Отмечается статистически незначимый отрицательный тренд максимальных расходов и уровней воды (рис. 3), связанный, очевидно, с общим снижением стока в период весеннего половодья. Кроме того, последние десятилетия характеризуются уменьшением изменчивости (дисперсии) максимальных расходов воды.

Таким образом, несмотря на отсутствие значимых изменений годового и максимального стока, происходит перераспределение стока внутри года, выражающееся в статистически значимом увеличении расходов зимней межени. Расходы воды в половодье, а также максимальные расходы и уровни воды характеризуются отрицательным, статистически незначимым трендом. Тем не менее, учитывая тот факт, что сток половодья формируется под влиянием гидрометеорологических условий осеннего, зимнего и весеннего периодов, можно определенно говорить об увеличении доли базисного стока и,

соответственно, уменьшении талого стока. Это подтверждается уменьшением дисперсии средних и максимальных расходов за половодье (неоднородность рядов по критерию Фишера).

Изменение климата. Обнаруженные изменения водного режима р. Оби, в особенности увеличение стока зимней межени, являются характерной реак-

цией на потепление климата для рек со значительной долей снегового питания [1, 9, 25, 27] и связаны с увеличением количества оттепелей, уменьшением глубины промерзания грунтов, соответственно, ростом грунтового питания в зимний период. В связи с этим представляет особый интерес оценка однородности рядов зимних температур [10].

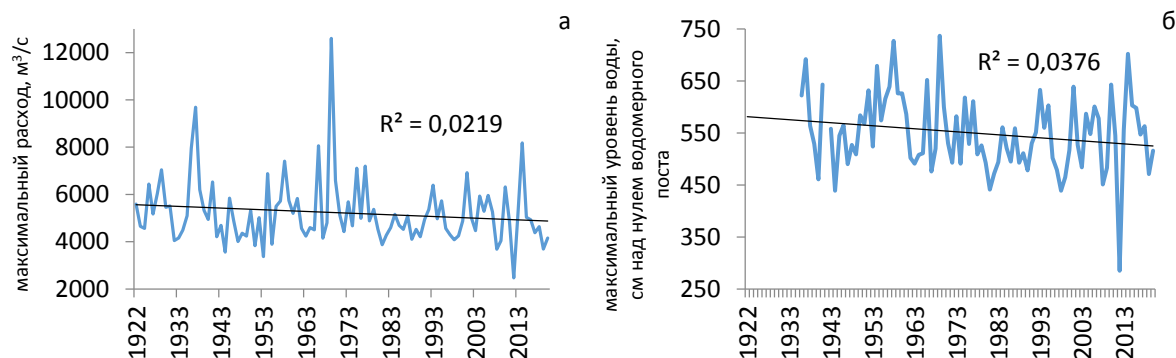


Рис. 3. Изменение максимальных: а) расходов; б) уровней воды, гидропост р. Обь, г. Барнаул

Fig. 3. Changes of the maximum: а) discharges; б) water levels, the Ob River gauging station, Barnaul

Таблица 3. Результаты статистического анализа максимальных расходов $Q_{\max}$ и уровней $H_{\max}$ р. Оби, г. Барнаул

Table 3. Results of statistical analysis of maximum discharges $Q_{\max}$ and levels $H_{\max}$ of the Ob River water, Barnaul

	F-критерий F-criterion	t-критерий t-criterion	Тест Петита Pettitt's test	Тест Александерсона SNHT	Тест Бушанда Buishand's test	r	σ_r	r/σ_r
$Q_{\max}$	2,43	1,72	однородный	однородный	однородный	0,14	0,1	1,4
$H_{\max}$	1,02	2,61	однородный	однородный	однородный	0,19	0,1	1,9

Примечание: критические значения критериев Фишера F и Стьюдента t приняты в соответствии с [10] и составили для максимальных расходов 1,62 и 1,89 соответственно; для максимальных уровней – 1,63 и 1,98. Превышение критических значений критериев выделено в таблице курсивом.

Note: Critical values of Fisher F and Student t criteria are in accordance with [10] and are 1.62 and 1.89 respectively; for maximum levels – 1.63 and 1.98. The exceeding of the critical value are italicized in the table.

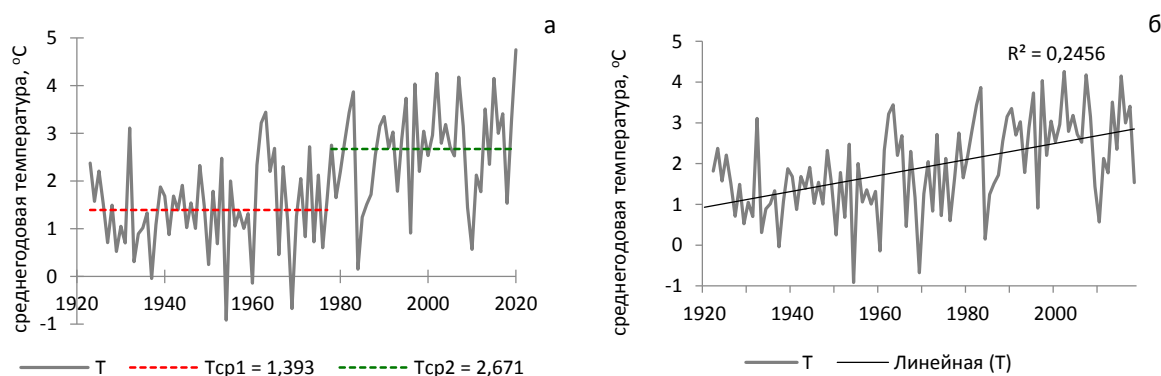


Рис. 4. Результаты статистического анализа среднегодовых температур, метеостанция г. Барнаул: а) тесты на стационарность Петита, Бушианда и Александерсона с определением года нарушения; б) линейный тренд. T – среднегодовая температура; T_{cr1} и T_{cr2} – средняя температура за период до и после нарушения стационарности ряда (1977 г.) соответственно

Fig. 4. Results of the statistics analysis of the annual average temperatures, Barnaul meteorological station: а) the Pettitt's, Buishand's and Alexandersson's tests with the indication of the violation year; б) linear trend. T – average annual temperature; T_{cr1} and T_{cr2} – average temperature during the period before and after the violation of the time-series stationarity (1977) respectively

Для обоснования причин выявленных изменений стока был выполнен анализ основных климатических стокоформирующих факторов – температур и осадков.

Температура воздуха. Анализ рядов среднегодовых температур по метеостанции Барнаул за последние 100 лет показал их неоднородность по среднему значению (критерий Стьюдента). Использование тестов Петита, Бушианда и Александерсона подтвердило неоднородность ряда с точкой нарушения в 1977 г. (табл. 4, рис. 4).

Это хорошо согласуется с общеизвестными представлениями об изменении климата на территории России [1, 28]. Значимость наблюдаемого увеличения среднегодовых температур подтверждает очень высокое значение критерия Стьюдента – 5,62 (при критическом 1,66).

Для среднемесячных температур нарушение однородности рядов характерно лишь для периода с февраля по май и августа, ряд температур за декабрь можно признать «сомнительным». Год нарушения однородности изменяется от 1957 г. (фев-

раль) до 1987–2006 г. (апрель). Очевидно, что изменение температурного режима внутри года происходит очень неравномерно и затрагивает в основном зимние и весенние месяцы (табл. 4).

Анализ линейных трендов показал, что наибольший рост температур наблюдается с февраля по апрель. В июне и с августа по октябрь наблюдаются статистически незначимый рост, а в июле – незначительное снижение температур (табл. 5). В отношении среднегодовых температур можно определенно утверждать о статистически значимом положительном тренде (рис. 4).

Атмосферные осадки. Как отмечалось выше, изменение методики наблюдения за осадками и связанная с этим неоднородность рядов затрудняют статистический анализ атмосферных осадков и его интерпретацию за исследуемый период. Был выполнен анализ двух рядов атмосферных осадков по ГМС Барнаул: один из них – с 1967 по 2020 гг., без разделения осадков на твердые, жидкие и смешанные [15], второй – скорректированный [13, 16] с 1959 по 2015 гг.

Таблица 4. Результаты анализа на однородность среднемесячных и среднегодовых температур воздуха по метеостанции г. Барнаул

Table 4. Results of the average monthly and annual air temperature homogeneity analysis according to Barnaul meteorological station data

Месяц/Month	Критерий/Test													
	F-критерий/F-criterion	t-критерий/t-criterion	Петита/Pettitt's				Александрсона/SNHT				Буишанда/Buishand's			
			Нарушение однородности Homogeneity violation	T ₁	T ₂	Изменение/Change, °C	Нарушение однородности Homogeneity violation	T ₁	T ₂	Изменение/Change, °C	Нарушение однородности Homogeneity violation	T ₁	T ₂	Изменение/Change, °C
I	1,45	1,56	-	-16,65	-16,65	-	-	-16,65	-16,65	0,0	-	-16,65	-16,65	-
II	1,13	2,69	1957	-16,9	-14,3	2,7	1957	-16,9	-14,3	2,7	1957	-16,9	-14,3	2,7
III	1,03	3,72	1982	-8,6	-5,9	2,7	1999	-8,3	-4,8	3,5	1982	-8,6	-5,9	2,7
IV	1,05	3,52	1989	2,7	5,1	2,4	2006	2,9	6,4	3,5	1987	2,6	4,9	2,3
V	1,03	2,56	1988	11,4	13,0	1,5	1988	11,4	13,0	1,5	1988	11,4	13,0	1,5
VI	1,45	1,50	-	17,83	17,83	0,0	-	17,83	17,83	0,0	-	17,83	17,83	0,0
VII	1,71	0,41	-	19,82	19,82	0,0	-	19,82	19,82	0,0	-	19,82	19,82	0,0
VIII	1,28	1,50	1986	16,7	17,6	0,8	1996	16,8	17,7	0,9	1986	16,7	17,6	0,8
IX	1,72	0,59	-	11,0	11,0	0,0	-	11,0	11,0	0,0	-	11,0	11,0	0,0
X	1,20	0,98	1988	2,9	4,0	1,1	-	3,26	3,26	0,0	-	3,26	3,26	0,0
XI	1,13	2,15	-	3,26	3,26	0,0	-	3,26	3,26	0,0	-	3,26	3,26	0,0
XII	1,12	2,46	1976	-15,3	-12,8	2,5	-	-14,16	-14,16	0,0	1976	-15,3	-12,8	2,5
Год Year	1,27	5,62	1977	1,4	2,7	1,3	1977	1,4	2,7	1,3	1977	1,4	2,7	1,3

Примечание: критические значения критериев Фишера F и Стьюдента t приняты в соответствии с [26] и составили 1,45 и 1,66 соответственно. Превышение критических значений критериев выделено в таблице курсивом. T₁ и T₂ – средняя температура в условно однородные периоды (для неоднородных рядов), °C.

Note: Critical values of Fisher F and Student t criteria are in accordance with [29] and are 1.45 and 1.66 respectively. The exceeding of the critical value are italicized in the table. T₁ and T₂ are the average temperature in conditionally homogenous periods (for heterogenous series), °C.

Таблица 5. Результаты анализа линейных трендов среднемесячных и годовых температур по метеостанции Барнаул за период 1922–2020 гг.

Table 5. Results of the average monthly and annual temperature linear trends according to Barnaul meteorological station data from 1922 to 2020

Месяц Month	Уравнение тренда Linear trend equation	r	σ_r	r/ σ_r
I	$y=0,024x-17,91$	0,16	0,10	1,6
II	$y=0,042x-17,33$	0,28	0,09	3,1
III	$y=0,047x-9,884$	0,42	0,08	5,3
IV	$y=0,039x+1,43$	0,41	0,08	5,1
V	$y=0,022x+10,82$	0,31	0,09	3,4
VI	$y=0,006x+17,49$	0,12	0,10	1,2
VII	$y=-0,000x+19,84$	0,00	0,10	0,00
VIII	$y=0,008x+16,61$	0,18	0,10	1,8
IX	$y=0,005x+10,64$	0,10	0,10	1,0
X	$y=0,005x+2,985$	0,08	0,10	0,8
XI	$y=0,019x-8,150$	0,15	0,10	1,50
XII	$y=0,031x-15,69$	0,20	0,10	2,0
Год/Year	$y=0,020x+0,905$	0,53	0,07	7,6

Примечание: значимые тренды выделены курсивом.
 Note: significant trends are italicized.

Детальный сравнительный анализ этих двух массивов данных является предметом отдельного исследования и не входит в наши задачи, тем не менее представляет интерес проследить некоторые общие тенденции в изменении осадков внутри года, в том числе оценить изменение доли твердых осадков. Проверка рядов атмосферных осадков за 1966–2020 гг. с помощью тестов Петита, Буишанда и Александерсона для большинства месяцев не выявила нарушения стационарности. В ноябре и декабре два теста показали нарушение стационарности в 1998 и 1986 гг. соответственно (ряды можно охарактеризовать как «сомнительные»). Анализ линейных трендов показал разнонаправленные статистически незначимые (за исключением ноября и декабря) изменения (табл. 6).

Аналогичные результаты получены при анализе общих сумм осадков по данным скорректированных рядов за 1959–2015 гг. (табл. 7). Особый интерес представляет изменение соотношения осадков разных типов: статистически значимое уменьшение твердых осадков и увеличение жидких и смешанных. Наиболее существенные изменения наблюдаются для твердых осадков – по результатам всех тестов их количество уменьшилось более чем на треть. Год нарушения однородности – 1972, что позволяет связать эту тенденцию с потеплением климата. С другой стороны, значимое увеличение количества жидких осадков с 1989 г. может быть связано как с сокращением доли твердых осадков, так и с общим ростом увлажненности территории.

Таблица 6. Результаты анализа линейных трендов месячных и годовых сумм осадков по метеостанции Барнаул за период 1967–2020 гг.

Table 6. Results of the monthly and annual amount of precipitation linear trends according to Barnaul meteorological station data from 1967 to 2020

Месяц Month	Уравнение тренда Linear trend equation	r	σ_r	r/ σ_r
I	$y=-0,1219x+27,49$	0,11	0,14	0,79
II	$y=-0,063x+19,999$	0,10	0,14	0,71
III	$y=-0,0045x+19,136$	0,00	0,14	0,00
IV	$y=0,0499x+24,993$	0,04	0,14	0,29
V	$y=0,0049x+40,794$	0,00	0,14	0,00
VI	$y=0,0271x+49,048$	0,02	0,14	0,14
VII	$y=0,4649x+54,392$	0,21	0,13	1,62
VIII	$y=-0,3645x+57,372$	0,23	0,13	1,77
IX	$y=0,116x+29,604$	0,09	0,14	0,64
X	$y=-0,0643x+41,06$	0,05	0,14	0,36
XI	$y=0,3751x+25,812$	0,33	0,12	2,75
XII	$y=0,3126x+18,936$	0,36	0,12	3,0
Год/Year	$y=0,7622x+406,89$	0,17	0,13	1,31

Примечание: значимые тренды выделены курсивом.
 Note: significant trends are italicized.

Таблица 7. Результаты статистического анализа сумм жидких, твердых и смешанных осадков по метеостанции Барнаул за период 1959–2015 гг. (скорректированный архив)

Table 7. Results of the statistical analysis of the liquid, solid and mixed precipitations according to Barnaul meteorological station data from 1959 to 2015 (edited archive)

Критерий Test	Тип осадков/Precipitation type			
	Жидкие Wet	Смешанные Mingled	Твердые Solid	Общие Total
	результаты анализа на однородность results of homogeneity analysis			
F-критерий/F-criterion ($F_{крит}=2$)	1,01	1,76	3,28	1,54
t-критерий/t-criterion ($t_{крит}=2,01$)	2,47	1,60	2,54	0,84
Тест Петита/Pettitt's test	1989	1975	1972	однородный homogenous
Тест Александерсона/SNHT	1989	однородный homogenous	1972	
Тест Буишанда/Buishand's test	1989		1972	
Изменение/Change, %	19,58	–	–31,68	–
результаты анализа линейных трендов/linear trend analysis results				
r	0,31	0,24	0,48	0,04
σ_r	0,12	0,12	0,10	0,13
r/ σ_r	2,6	2	4,8	0,31

Таким образом, значимые изменения климата по данным метеостанции Барнаул за последние 100 лет заключаются в интенсивном увеличении температуры воздуха начиная с 1977 г., в основном за счет весенних и зимних месяцев. Следует отметить, что весной начало роста температур отмечается позднее – с 80-х гг. прошлого века. В летние месяцы рост температур минимальный, тренды статистически незначимы. В совокупности с ростом зимних температур статистически значимое уменьшение твердых осадков и замещение их жидкими существенным образом изменяет климатические условия зимних месяцев, определяющих формирование стока как в период зимней межени, так и в половодье.

Заключение

Совместный статистический анализ расходов воды р. Оби на гидропосту в г. Барнауле и основных стокоформирующих факторов (температуры и осадки) по данным метеостанции в г. Барнауле позволил выявить изменения стока, связанные с потеплением климата, произошедшие за период с 1922 по 2020 гг.

Статистически значимые изменения климатических характеристик заключаются, в первую очередь, в увеличении температуры воздуха. Рост годовой температуры по ГМС Барнаул составил 1,3 °С. С ростом температур на 2,3–3,5 °С в зимние месяцы связано уменьшение количества твердых осадков до 30 % и замещение их смешанными и жидкими. Значимого изменения общего количества осадков не выявлено. Нарушение однородности рядов температур, определенное по результатам тестов Петита, Буишанда и Александерсона, произошло в 1977 г., что соответствует имеющимся данным об изменении климата на территории России. Наиболее интенсивный рост температур наблюдается в зимние и весенние месяцы. Изменение количества осадков внутри года характеризуется разнонаправленными статистически незначимыми изменениями.

На фоне увеличения среднегодовых расходов воды произошло уменьшение максимальных расходов и уровней воды, а также снижение дисперсии годового и максимального стока. Ряды годовых

расходов являются однородными по среднему значению (критерий Стьюдента), а также по результатам тестов Петита, Буишанда и Александерсона; линейные тренды статистически незначимы.

В связи с ростом температур произошло значительное перераспределение стока внутри года. Оно проявляется в статистически значимом увеличении стока зимней межени в среднем на 24 % начиная с 1982 г., в росте расходов воды в апреле, в первую волну половодья (за счет сдвига снеготаяния на более ранние даты), и уменьшении стока во вторую волну половодья (май–июль). Следует отметить некоторое «запаздывание» реакции меженного стока на рост зимних температур.

Расходы периода половодья однородны по среднему значению (критерий Стьюдента, а также Буишанда, Петита и Александерсона), но неоднородны по дисперсии (критерий Фишера). При этом можно определенно говорить об увеличении естественной зарегулированности стока, связанной с ростом базисного и уменьшением талого стока. Это подтверждает факт снижения дисперсии средних и максимальных расходов.

Таким образом, наблюдаемые изменения стока выходят за рамки естественных колебаний водности, т. к. существенно изменились факторы, определяющие соотношения талого и грунтового стока, что необходимо учитывать при изучении и прогнозировании, в том числе опасных гидрологических явлений. Этот момент является принципиальным, во-первых, при расчленении гидрографа по типам питания, во-вторых, при определении предикторов для построения моделей формирования талого стока и разработки прогноза объема и максимума половодья с использованием традиционных физико-статистических методов. Определение года нарушения однородности расходов воды с одной стороны и климатических характеристик с другой является основанием для разделения временных рядов как минимум на два условно однородных периода. В отличие от рек Европейской части России, начало нового квазистационарного периода на р. Оби в верхнем течении приходится на начало 80-х гг. XX в.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водные ресурсы России и их использование / под ред. И.А. Шикломанова. – СПб.: ГГИ, 2008. – 600 с.
2. Лавров С.А., Калужный И.Л. 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.
3. Формирование весеннего стока рек ЕТР: основные факторы и способы их учета. II. Переоценка с учетом современных условий на примере рек бассейна Дона / Н.А. Варенцова, М.Б. Киреева, М.А. Харламов, М.И. Варенцов, Н.Л. Фролова, Е.С. Павлишеникова // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2022. – № 2. – С. 117–146. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-2-117-146.
4. Pervasive alterations to snow-dominated ecosystem functions under climate change / W.R. Wieder, D. Kennedy, F. Lehner, K.N. Musselman, K.B. Rodgers, N. Rosenbloom, R. Yamaguchi // Proc. of the National Academy of Sciences. – 2022. – Vol. 119. – № 30. – P. e2202393119. DOI: 10.1073/pnas.2202393119.
5. Long term trend analysis of river flow and climate in northern Canada / M.S. Zaghloul, E. Ghaderpour, H. Dastour, B. Farjad, A. Gupta, H. Eum, Q.K. Hassan // Hydrology. – 2022. – Vol. 9. – № 11. – P. 197. DOI: 10.3390/hydrology9110197.

6. Rishika A., Reghunath G., Mujumdar P.P. Impact of climate change on non-stationarity of extreme streamflows in Godavari River Basin, India // EGU General Assembly Conference Abstracts. – 2023. – P. EGU-2697. DOI: 10.5194/egusphere-egu23-2697.
7. Teegavarapu R.S.V., Sharma P.J. Nonoverlapping block stratified random sampling approach for assessment of stationarity // Journal of Hydrologic Engineering. – 2021. – Vol. 26. – № 7. – P. 04021020. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002098.
8. Wang W., Van Gelder P., Vrijling J.K. Trend and stationarity analysis for streamflow processes of rivers in western Europe in the 20th century // Proc. IWA International Conference on Water Economics, Statistics, and Finance Rethymno, Greece. – London: IWA, 2005. – Vol. 810. – P. 451–461.
9. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз / А.Н. Гельфан, Н.Л. Фролова, Д.В. Магрицкий, М.Б. Киреева, В.Ю. Григорьев, Ю.Г. Мотовилов, Е.М. Гусев // Фундаментальная и прикладная климатология. – 2021. – Т. 7. – № 1. – С. 36–79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79.
10. Рождественский А.В., Лобанова А.Г. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. – СПб: Нестор-История, 2010. – 162 с.
11. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений / Н.Л. Фролова, Д.В. Магрицкий, М.Б. Киреева, В.Ю. Григорьев, А.Н. Гельфан, А.А. Сазонов, А.И. Шевченко // Водные ресурсы. – 2022. – Т. 49. – № 3. – С. 251–269. DOI: 10.31857/S032105962203004X.
12. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России / О.Н. Булыгина, В.Н. Разуваев, Л.Т. Трофименко, Н.В. Швец // Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485 от 23 октября 2014 г. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=8> (дата обращения 15.02.2024).
13. Богданова Э.Г., Гаврилова С.Ю., Ильин Б.М. Временные изменения атмосферных осадков на территории России по данным их скорректированных значений за период 1936–2000 гг. // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 10. – С. 78–89.
14. Булыгина О.Н., Коршунова Н.Н., Разуваев В.Н. Специализированные массивы данных для климатических исследований // Труды Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных. – 2014. – № 177. – С. 136–148.
15. Описание массива данных месячных сумм осадков на станциях России / О.Н. Булыгина, В.Н. Разуваев, Н.Н. Коршунова, Н.В. Швец. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2015620394 от 27 февраля 2015 г. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=17> (дата обращения 15.02.2024).
16. Описание массива месячных сумм осадков, с устранением систематических погрешностей осадкомерных приборов / Б.М. Ильин, О.Н. Булыгина, Э.Г. Богданова, В.М. Веселов, С.Ю. Гаврилова. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=12> (дата обращения 15.02.2024).
17. Сикан А.В., Байдук О.В. Влияние изменения климата на водный режим рек южной и восточной частей Республики Беларусь // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2015. – № 40. – С. 61–70.
18. Волчек А.А., Сидак С.В., Парфомук С.И. Статистическая оценка однородности временных рядов стока рек Беларуси // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2021. – Т. 3 (126). – С. 92–95. DOI: 10.36773/1818-1112-2021-126-3-92-95.
19. Wijngaard J.B., Klein Tank A.M.G., Können G.P. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series // InterScience J Climatol. – 2003. – Vol. 23 (6). – P. 679–692. DOI: 10.1002/joc.906.
20. Руководство по гидрологической практике. Т. II: Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов. – Женева: ВМО, 2012. – Вып. 168. – 324 с.
21. Trend analysis of hydro-climate variables in the Jemma sub-basin of Upper Blue Nile (Abbay) Basin, Ethiopia / T.M. Lebeza, T. Gashaw, G.W. Tefera, J.A. Mohammed // SN Applied Sciences. – 2023. – Т. 5. – № 5. – P. 129. DOI: 10.1007/s42452-023-05345-4.
22. Yilmaz M., Tosunoğlu F. Assessing the main drivers of low flow series in Turkey // Natural Hazards. – 2023. – Т. 115. – № 3. – P. 1927–1953. DOI: 10.1007/s11069-022-05621-3.
23. Jaiswal R.K., Lohani A.K., Tiwari H.L. Statistical analysis for change detection and trend assessment in climatological parameters // Environmental Processes. – 2015. – Т. 2. – P. 729–749. DOI: 10.1007/s40710-015-0105-3.
24. 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. – Т. 137. – № 3–4. – P. 1643–1658. DOI: 10.1007/s00704-018-2677-0.
25. Современные изменения характеристик максимального стока рек России / Н.Л. Фролова, Д.В. Магрицкий, М.Б. Киреева, В.Ю. Григорьев, А.Н. Гельфан, А.А. Сазонов, Л.С. Курочкина // Вопросы географии. – 2023. – № 157. – С. 137–166. DOI: 10.24057/probl.geogr.157.7.
26. Somorowska U. Warming air temperature impacts snowfall patterns and increases cold-season baseflow in the Liwiec River basin (Poland) of the central European lowland // Resources. – 2023. – Т. 12. – № 2. – P. 18. DOI: 10.3390/resources12020018.
27. Warming soil temperature and increasing baseflow in response to recent and potential future climate change across northern Manitoba, Canada / R. Lilhare, S.J. Déry, T.A. Stadnyk, S. Pokorny, K.A. Koenig // Hydrological Processes. – 2022. – Vol. 36. – № 11. – P. e14748. DOI: 10.1002/hyp.14748.
28. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. – СПб.: Научное издание, 2022. – 676 с.
29. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. – М.: Наука, 1971. – 576 с.

Информация об авторах

Светлана Юрьевна Самойлова, кандидат географических наук, старший научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. bastet@iwer.ru; <http://orcid.org/0000-0002-3365-0048>

Елена Владимировна Мардасова, научный сотрудник Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; mardasova_ev@mail.ru

Андрей Алексеевич Коломейцев, ведущий инженер Института водных и экологических проблем СО РАН, Россия, 656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1; kolomeyev@iwer.ru

Поступила в редакцию: 15.05.2024

Поступила после рецензирования: 15.10.2024

Принята к публикации: 19.11.2024

REFERENCES

1. *Russian water resources and their use*. Ed. by I.A. Shiklomanov. St. Petersburg, GGI Publ., 2008. 600 p. (In Russ.)
2. Lavrov S.A., Kalyuzhny 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, pp. 42–60. (In Russ.)
3. Varenkova N.A., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Varentsov M.I., Frolova N.L., Povalishnikova E.S. Spring river runoff in the European part of Russia main factors and their estimation. II reassessment in modern conditions on example of the Don basin rivers. *Hydrometeorological Research and Forecasting*, 2022, no. 2, pp. 117–146. DOI: 10.37162/2618-9631-2022-2-117-146. (In Russ.)
4. Wieder W.R., Kennedy D., Lehner F., Musselman K.N., Rodgers K.B., Rosenbloom N., Yamaguchi R. Pervasive alterations to snow-dominated ecosystem functions under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2022, vol. 119, no. 30, p. e2202393119. DOI: 10.1073/pnas.2202393119.
5. Zaghloul M.S., Ghaderpour E., Dastour H., Farjad B., Gupta A., Eum H., Hassan Q.K. Long term trend analysis of river flow and climate in northern Canada. *Hydrology*, 2022, vol. 9, no. 11, p. 197. DOI: 10.3390/hydrology9110197.
6. Rishika A., Reghunath G., Mujumdar P.P. Impact of climate change on non-stationarity of extreme streamflows in Godavari River Basin, India. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2023, p. EGU-2697. DOI: 10.5194/egusphere-egu23-2697.
7. Teegavarapu R.S.V., Sharma P.J. Nonoverlapping block stratified random sampling approach for assessment of stationarity. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2021, vol. 26, no. 7, p. 04021020 DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002098.
8. Wang W., Van Gelder P., Vrijling J. K. Trend and stationarity analysis for streamflow processes of rivers in western Europe in the 20th century. *Proc. IWA International Conference on Water Economics, Statistics, and Finance Rethymno, Greece*. London, IWA, 2005, vol. 810, pp. 451–461.
9. Gelfan A.N., Frolova N.L., Magritsky D.V., Kireeva M.B., Grigorev V.Yu., Motovilov Yu.G., Gusev E.M. Climate change impact on annual and maximum runoff of Russian rivers: diagnostic and projections. *Fundamental and Applied Climatology*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 36–79. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-36-79. In Russ.
10. Rozhdestvensky A.V., Lobanova A.G. *Methodological recommendations for assessing the homogeneity of hydrological characteristics and determining their calculated values based on heterogeneous data*. St. Petersburg, Nestor-History Publ., 2010. 162 p. (In Russ.)
11. Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., Grigoriev V.Yu., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Shevchenko A.I. Streamflow 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, no. 3, pp. 333–350. DOI: 10.1134/S0097807822030046.
12. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V. *Description of the data array of the average monthly air temperature at Russian stations*. Certificate of state registration of the database no. 2014621485 dated October 23, 2014. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=8> (accessed 15 February 2024).
13. Bogdanova E.G., Gavrilova S.Y., Ilin B.M. Time changes of atmospheric precipitation in Russia from the corrected data during 1936–2000. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2010, vol. 35, no. 10, pp. 706–714. DOI: 10.3103/S1068373910100092.
14. Bulygina O.N., Korshunova N.N., Razuvaev V.N. Specialized data sets for climate research. *The work of the All-Russian Scientific Research Institute of Hydrometeorological Information – the World Data Center*, 2014, no. 177, pp. 136–148. (In Russ.)
15. Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Korshunova N.N., Shvets N.V. *Description of the data array of monthly precipitation amounts at stations in Russia*. Certificate of state registration of the database no. 2015620394 dated February 27, 2015. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=17> (accessed 15 February 2024).
16. Ilyin B.M., Bulygina O.N., Bogdanova E.G., Veselov V.M., Gavrilova S.Yu. *Description of the array of monthly precipitation amounts, with the elimination of systematic errors of precipitation measuring devices*. Available at: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/index.xhtml?idata=12> (accessed 15 February 2024).
17. Sikan A.V., Baiduk O. V. The impact of climate change on river water regime over southern and eastern parts of the Republic of Belarus. *Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*, 2015, no. 40, pp. 61–70. (In Russ.)
18. Volchak A.A., Sidak S.V., Parfomuk S.I. Statistical assessment of the runoff time series homogeneity of the rivers in Belarus. *Vestnik of Brest State Technical University*, 2021, no. 3 (126), pp. 92–95. DOI: 10.36773/1818-1112-2021-126-3-92-95.
19. Wijngaard J.B., Klein Tank A.M.G., Können G.P. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *InterScience J Climatol.*, 2003, vol. 23 (6), pp. 679–692. DOI: 10.1002/joc.906.
20. *Handbook of Hydrological Practice Vol. II: Water resources management and the practice of applying hydrological methods*. Geneva, WMO, 2012. Iss. 168, 324 p. (In Russ.)

21. Lebeza T.M., Gashaw T., Tefera G.W., Mohammed J.A. Trend analysis of hydro-climate variables in the Jemma sub-basin of Upper Blue Nile (Abbay) Basin, Ethiopia. *SN Applied Sciences*, 2023, vol. 5, no. 5, p. 129. DOI: 10.1007/s42452-023-05345-4.
22. Yilmaz M., Tosunoğlu F. Assessing the main drivers of low flow series in Turkey. *Natural Hazards*, 2023, vol. 115, no. 3, pp. 1927–1953. DOI: 10.1007/s11069-022-05621-3.
23. Jaiswal R.K., Lohani A.K., Tiwari H.L. Statistical analysis for change detection and trend assessment in climatological parameters. *Environmental Processes*, 2015, vol. 2, pp. 729–749. DOI: 10.1007/s40710-015-0105-3.
24. 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, no. 3–4, pp. 1643–1658. DOI: 10.1007/s00704-018-2677-0.
25. Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., V Grigorev.Y., Gelfan A.N., Sazonov A.A., Zhuravlev S.A., Kurochkina L.S. Modern changes of the maximum flow characteristics of the rivers of Russia. *Problems of Geography*, 2023, no. 157, pp. 137–166. DOI: 10.24057/probl.geogr.157.7.
26. Somorowska U. Warming air temperature impacts snowfall patterns and increases cold-season baseflow in the Liwiec River basin (Poland) of the central European lowland. *Resources*, 2023, vol. 12, no. 2, pp. 18. DOI: 10.3390/resources12020018.
27. Lilhare R., Déry S.J., Stadnyk T.A., Pokorny S., Koenig K.A. Warming soil temperature and increasing baseflow in response to recent and potential future climate change across northern Manitoba, Canada. *Hydrological Processes*, 2022, vol. 36, no. 11, p. e14748. DOI: 10.1002/hyp.14748.
28. *The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation*. Ed. by V.M. Kattsov. St. Petersburg, High-tech technologies Publ., 2022. 676 p. (In Russ.)
29. Mitropolsky A.K. *Technique of statistical computing*. Moscow, Nauka Publ., 1971. 576 p. (In Russ.)

Information about the authors

Svetlana Yu. Samoilova, Cand. Sc., Senior Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation; bastet@iwep.ru; <http://orcid.org/0000-0002-3365-0048>

Elena V. Mardasova, Researcher, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation; mardasova_ev@mail.ru

Andrey A. Kolomeytsev, Leading Engineer, Institute for Water and Environmental Problems SB RAS, 1, Molodezhnaya street, Barnaul, 656038, Russian Federation; kolomeycev@iwep.ru

Received: 15.05.2024

Revised: 15.10.2024

Accepted: 19.11.2024