

Гидрология

Лобанов В.А., Григорьева А.А.

**ГИДРОЛОГИЯ**

Научная статья

УДК 556.048

doi: 10.17072/2079-7877-2023-1-84-99

**КЛИМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
НА РЕКАХ РЕСПУБЛИКИ САХА (ЯКУТИЯ)**Владимир Алексеевич Лобанов<sup>1✉</sup>, Алёна Андреевна Григорьева<sup>2</sup><sup>1</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург, Россия<sup>2</sup>Управление гидрометслужбы Республики Саха (Якутия), г. Якутск, Россия<sup>1</sup>lobanov@EL6309.spb.edu<sup>✉</sup>, Author ID: 2290, SPIN-код 7045-4156<sup>2</sup>alngrgrva@mail.ru

**Аннотация.** Рассматриваются многолетние ряды разных гидрологических характеристик (среднегодовые расходы воды, максимальные расходы в году, весеннего половодья, дождевых паводков и слои стока весеннего половодья, минимальные летние и зимние расходы воды) на реках Республики Саха (Якутия) и их аппроксимация моделями нестационарного среднего значения (линейный тренд и модель ступенчатых изменений). Получено, что для максимальных в году расходов воды эффективные нестационарные модели практически отсутствуют, но имеют место для слоев половодья, среднегодовых и минимальных расходов воды, которые увеличились в основном в конце XX – начале XXI в. в связи с возможным дополнительным притоком воды от оттаившей вечной мерзлоты. Построены пространственные распределения увеличения характеристик речного стока в % по отношению к предыдущему стационарному периоду и по отношению к естественной изменчивости.

**Ключевые слова:** изменение климата, Республика Саха (Якутия), основные гидрологические характеристики, многолетние ряды, модели нестационарного среднего значения, увеличение минимального и среднегодового стока воды

**Для цитирования:** Лобанов В.А., Григорьева А.А. Климатические изменения гидрологических характеристик на реках Республики Саха (Якутия) // Географический вестник. 2023. № 1(64). С. 84–99. doi: 10.17072/2079-7877-2023-1-84-99.

**HYDROLOGY**

Original article

doi: 10.17072/2079-7877-2023-1-84-99

**CLIMATE CHANGES OF HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS IN THE RIVERS OF  
REPUBLICA SAKHA (YAKUTIA)**Vladimir A. Lobanov<sup>1✉</sup>, Alena A. Grigorieva<sup>2</sup><sup>1</sup> Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia<sup>2</sup> Department of Hydrometeorological Service of the Republic Sakha (Yakutia), Yakutsk, Russia<sup>1</sup>lobanov@EL6309.spb.edu<sup>✉</sup>, Author ID: 2290, SPIN-код 7045-4156<sup>2</sup>alngrgrva@mail.ru

**Abstract.** The paper deals with long-term series of different hydrological characteristics (average annual water discharges, maximum discharges throughout the year, maximum discharges during spring floods and rain floods, spring flood runoff layers, minimum summer and winter water discharges) on the rivers of the Republic of Sakha (Yakutia) and their approximation by models of the non-stationary average (the linear trend and the stepwise change model). It has been found that there are practically no effective non-stationary models for the maximum water discharges, but there are such models for flood layers and for average annual and minimum water discharges, which increased mainly in the late 20th and early 21st centuries due to the possible additional inflow of water from the thawed permafrost. The number of effective non-stationary average models increases from 30% of all cases for flood layers to 50–60% for average annual and minimum summer water discharges, and almost to 100% for minimum winter water discharges. Estimation of the stationarity of the mean values and variances by statistical criteria when dividing the series of stepwise changes by year confirmed the nonstationarity of the mean values for all a priori established nonstationary models and, in some cases, the nonstationarity of the variances. The largest increase in average values up to 100% takes place in the minimum winter water discharges, up to 70–80% – in the minimum summer water discharges, and up to 40–50% – in the average annual water discharges; a change in average values up to 20% cannot be considered statistically significant and reliably determined. Relative to natural variability, the excess is up to 1.5–1.6 standard deviation, but no more. Spatial distributions of the increase in river runoff characteristics in % relative to the previous stationary period and to natural variability are constructed. The greatest increase in the minimum winter water discharge takes place in the northern part of Yakutia. In recent years, water discharges have been observed



## Гидрология

Лобанов В.А., Григорьева А.А.

even on freezing rivers. For the minimum summer and average annual water discharges, the largest increase occurs in the northeast and east.

**Keywords:** climate change, Republic of Sakha (Yakutia), main hydrological characteristics, long-term time series, models of non-stationary average, increase in minimum and average annual runoff

**For citation:** Lobanov V.A., Grigorjeva A.A. (2023). Climate changes of hydrological characteristics in the rivers of Republica Sakha (Yakutia). *Geographical Bulletin*. No. 1(64). Pp. 84–99. doi: 10.17072/2079-7877-2023-1-84-99.

## Введение

К оценке влияния современного изменения климата на гидрологические характеристики как нельзя лучше подходит известное определение А.И. Воейкова: «Реки – продукт климата» [1]. Исследованию современных климатических изменений метеорологических факторов речного стока на территории Якутии посвящены многочисленные исследования, например [2–13]. В частности, в работах [7–9] установлено, что многолетние ряды среднемесячных температур воздуха на территории Якутии не являются стационарными и процент нестационарных рядов увеличивается в последнее время. Наиболее эффективной для описания нестационарных рядов является модель ступенчатых изменений, рост температуры в соответствии с этой моделью относится в большинстве случаев к 1960–1980-м гг. Получено, что во внутригодовом распределении нестационарности определены два максимума: в переходный период от зимы к лету (апрель–июнь) и в начале зимнего периода (октябрь–ноябрь). Территориально весенний и осенний максимумы нестационарности располагаются в разных частях территории Якутии: весенне-летний – на юге, осенне-зимний – на северо-востоке. Современные изменения атмосферных осадков в Якутии более однородны по сравнению с температурой воздуха в пространстве и времени, но в целом они меняются до противоположных по знаку тенденций в разные сезоны года [10]. В холодный сезон года, особенно за период с декабря по март, наблюдается тенденция к снижению количества осадков, наиболее проявляющаяся на северо-востоке республики. В теплый период года (с мая по сентябрь) наблюдается противоположная тенденция их роста.

В целом можно сделать вывод, что изменение в большей степени характерно для температуры воздуха, чем для осадков. Она увеличилась на сегодняшний день и продолжает расти, особенно в северных частях Якутии [4]. Рост температур воздуха привел к росту температур почвы и оттаиванию вечной мерзлоты [12; 13], что обусловило дополнительный приток воды в реки. В работе [5] установлено оттаивание верхней части пород ледового комплекса до глубины 3,7 м со скоростью 0,03–0,16 м/год.

Анализ характеристик речного стока и уровней воды на территории республики Саха (Якутия) показывает их изменения. Так, в работе [14] приведены тренды роста среднегодового и минимального стоков на территории России, в том числе и Якутии. В статье [15] показано, что продолжительность ледостава на реках Якутии уменьшилась на 1–2 недели за счет более поздней (на 3–4 дня) даты начала и более ранней (на 6–8 дней) даты окончания ледостава, а максимальная толщина льда пока не изменилась. Из характерных зимних уровней воды нестационарность проявляется лишь в многолетних рядах максимальных уровней начала ледостава, которые увеличиваются только для половины рассмотренных рядов. Увеличение числа наводнений, особенно экстремальных, связано с затоплением территории [6].

Оценке последствий от негативного влияния потепления климата, особенно на эпидемиологическую обстановку в республике и здоровье населения, увеличение площади и интенсивности лесных пожаров, на сложившиеся коммуникационные пути и другие социально-экономические факторы экономики и жизнедеятельности посвящены работы [3; 4; 6; 7].

Однако, несмотря на то, что общий фон изменений определен, существуют проблемы детализации этих изменений. Поэтому цель нашего исследования состоит в выявлении не только самих изменений в многолетних временных рядах различных гидрологических

## Гидрология

Лобанов В.А., Григорьева А.А.

характеристик в разных частях территории Якутии, но и характера этих изменений, их устойчивости во времени и закономерностей по пространству как в количественном отношении, так и по отношению к естественной изменчивости.

## Исходные данные

На реках Республики Саха (Якутия) выбран 21 пункт с наиболее продолжительными рядами наблюдений за различными гидрологическими характеристиками, включая среднегодовые и максимальные в году расходы воды, максимальные расходы и слои стока весеннего половодья, максимальные расходы дождевых паводков, минимальные летние и зимние расходы воды. Схема пунктов наблюдений приведена на рис. 1, а основные характеристики рядов и пунктов наблюдений – в табл. 1.

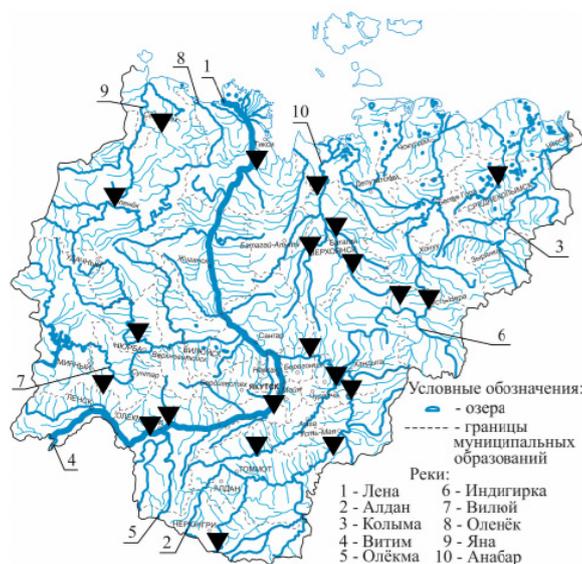


Рис. 1. Схема размещения гидрологических пунктов наблюдений.

Fig. 1. Map of hydrological observation sites

Таблица 1

Названия, продолжительности и периоды наблюдений для выбранных гидрологических постов  
Names, duration and periods of observations for selected hydrological sites

Код поста	Пункт	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Среднегодовые расходы воды		Весеннее половодье		Минимальный сток	
			период	n	период	n	период	n
1	2	3	4	5	6	7	8	9
3036	р. Лена – с. Солянка	770000	1933–2020	88	1933–2020	88	1934–2020	87
3042	р. Лена – с. Табага	897000	1927–2020	94	1927–2020	94	1938–2020	83
3156	р. Нюя – с. Курум	32600	1934–2020	85	1934–2020	86	1934–2020	86
3180	р. Чара – с. Токко	62500	1934–2020	87	1934–2020	87	1934–2020	84
3222	р. Алдан – с. Усть-Миль	269000	1935–2020	86	1935–2020	86	1934–2020	87
3225	р. Алдан – с. Охотский Перевоз	514000	1927–2020	94	1927–2020	94	1926–2020	95
3229	р. Алдан – гм.ст. Верхоянский Перевоз	696000	1942–2020	79	1942–2020	79	1942–2020	79
3246	р. Тимптон – р.п. Нагорный	613	1926–2020	89	1926–2020	90	1926–2020	89
3291	р. Амга – с. Буяга	23900	1937–2020	84	1933–2020	87	1933–2020	87
3293	р. Амга – с. Терюг	65400	1937–2020	83	1937–2020	82	1937–2020	83
3367	р. Марха – с. Малыкай	89600	1940–2020	78	1938–2020	79	1938–2020	79
3405	р. Оленек – с. Оленек	89200	1936–2020	83	1936–2020	83	1936–2020	83
3414	р. Яна – г. Верхоянск	45300	1927–2020	88	1927–2018	86	1926–2020	89
3443	р. Адыча – гм.ст. Усть-Чаркы	52800	1943–2020	63	1943–2020	63	1943–2020	63
3445	р. Адыча – гп Юрдюк-Кумах	89600	1937–2020	84	1937–2020	84	1937–2020	84
3483	р. Быгантай – пос. Асар	40000	1937–2020	82	1937–2020	82	1937–2020	81

## Гидрология

Лобанов В.А., Григорьева А.А.

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3507	р. Эльги – 5.0 км выше устья р. Артык-Юрях	17600	1946–2020	75	1945–2020	75	1945–2020	76
3518	р. Нера – пос. Ала-Чубук	22300	1936–2020	85	1944–2020	77	1944–2020	77
3801	р. Анабар – с. Саскылах	78800	1936–2020	85	1954–2020	66	1954–2020	67
3821	р. Лена – с. Кюсюр	2430000	1930–2018	89	1935–2010	70	1935–2020	83
3881	р. Алазея – с. Аргахта	17700	1936–2020	83	1953–2018	52	1962–2020	55

Как следует из данных табл. 1, выбранные пункты гидрологических наблюдений находятся в широком диапазоне площадей водосбора: от 613 км<sup>2</sup> (р. Тимптон – р.п. Нагорный) до 2430000 км<sup>2</sup> (р. Лена – с. Кюсюр), и их водосборы в основном относятся к средним или зональным рекам. Пункты наблюдений находятся в разных частях Республики Саха (Якутия) и позволяют объективно оценить пространственные изменения (рис. 1). Период наблюдений в среднем составляет 80 лет, варьируя от 63 до 94 лет с последним годом наблюдений 2020 г., что определяет надежность моделирования продолжительных рядов, включая и наблюдения последних лет.

Предварительный анализ однородности экстремумов эмпирических распределений выполнен по статистическим критериям Диксона, Смирнова–Граббса и стационарности дисперсий и средних значений по статистическим критериям Фишера и Стьюдента [16–18]. Результаты анализа позволили установить, что неоднородные максимумы выявлены только в двух случаях в эмпирических распределениях максимальных расходов дождевых паводков (р. Оленек – с. Оленек в 1973 г. и р. Яна – г. Верхоянск в 1985 г.), которые, в свою очередь, привели и к нестационарности дисперсий при оценке по критерию Фишера. По критериям Фишера и Стьюдента, даже при формальном разделении рядов на две равные части, выводы о нестационарности были сделаны только для двух рядов из 21 для максимальных расходов весеннего половодья и дождевых паводков, для трех рядов слоев весеннего половодья, для 8 рядов среднегодовых и минимальных летних расходов воды и практически для всех рядов минимальных зимних расходов воды. Поэтому даже на основе такой предварительной оценки можно считать, что нестационарность в разных гидрологических характеристиках проявляется неодинаково.

Априори рассматриваемые гидрологические характеристики можно разделить на два вида: «быстрые» и «медленные» или «инерционные». К «быстрым» можно отнести максимальные в году расходы воды и максимальные расходы весеннего половодья, которые в этом регионе и являются практически всегда максимальными в году. Эти максимумы могут в большей мере зависеть от конкретных погодных условий, а не от инерционных климатических изменений. Напротив, среднегодовые расходы воды, слои стока половодья и минимальные летние и зимние расходы воды формируются в течение длительного времени: год для среднегодовых, период весеннего половодья для слоев стока и продолжительность кривых истощения при формировании зимних и летних минимумов. Поэтому можно предположить, что влияние изменения климата в большей степени скажется на «инерционные» гидрологические характеристики, чем на «быстрые».

### Методика исследований

В основе исследования лежит выбор эффективной модели среднего значения при аппроксимации временных рядов моделями нестационарного среднего двух видов: линейного тренда и модели ступенчатых переходов от одних стационарных условий к другим [19–22]. При этом проверяется, действительно ли модель нестационарного среднего статистически эффективнее, чем модель стационарного среднего, и на сколько, а также какого вида эта нестационарность (тренд или ступенчатые изменения) и когда она начала проявляться.

В общем виде модель стационарного среднего может быть представлена как:

$$Y_i = Y_{cp} \pm \varepsilon_i, \quad (1)$$

## Гидрология

Лобанов В.А., Григорьева А.А.

где  $Y_i$  – наблюдаемые значения временного ряда,  $Y_{cp}$  – среднее значение временного ряда и  $\varepsilon_i$  – случайные отклонения от стационарного среднего.

В модели линейного тренда зависимость среднего значения от времени представлена в виде уравнения

$$Y_{cp} = b_1 t + b_0 \quad \text{или} \quad Y_i = b_1 t + b_0 \pm \varepsilon_i, \quad (2)$$

где  $b_1, b_0$  – коэффициенты.

Нестационарность среднего в виде ступенчатого перехода от одного среднего  $Y_{cp1}$  к другому  $Y_{cp2}$  можно представить как

$$Y_i = Y_{cp1} \pm \varepsilon_i \quad \text{при} \quad i=1, k \quad \text{и} \quad Y_i = Y_{cp2} \pm \varepsilon_i \quad \text{при} \quad i=k+1, n; \quad (3)$$

где  $k, n-k$  – продолжительности 1-й и 2-й стационарных частей ряда,  $n$  – продолжительность всего ряда.

Известно, что для оценки эффективности любой модели, построенной по данным наблюдений, существуют два основных показателя: коэффициент детерминации ( $R^2$ ), характеризующий, какую часть исходного рассеяния объяснила модель, и остаточная дисперсия ( $\sigma_\varepsilon^2$ ), или стандарт остатков ( $\sigma_\varepsilon$ ), определяющий обратное, т.е. сколько не объяснено моделью [23]. Между этими двумя показателями эффективности модели существует функциональная зависимость

$$\sigma_\varepsilon = \sigma_y \sqrt{1 - R^2}, \quad (4)$$

где  $\sigma_y$  – стандартное или среднее квадратическое отклонение исходного ряда (СКО).

Формула (4) свидетельствует, что если модель полностью объясняет исходную неопределенность, т.е. является детерминированной, то  $R^2=1$  и  $\sigma_\varepsilon=0$ . Если же модель совсем ничего не объясняет, то  $R^2=0$  и  $\sigma_\varepsilon = \sigma_y$ , и модель является стохастической.

При аппроксимации временных рядов гидрометеорологических характеристик во времени не следует ожидать высоких значений  $R^2$  и поэтому сложно оценить по этому показателю, насколько статистически отличаются  $R^2$  одной и другой модели. В качестве показателя эффективности лучше выбрать дисперсию остатков  $\sigma_\varepsilon^2$  и для оценки статистического отличия этих дисперсий при разных моделях вполне применим известный критерий Фишера. Стандартное отклонение остатков нестационарной модели  $\sigma_\varepsilon$  сравнивается со стандартным отклонением остатков стационарной или базовой модели, равным  $\sigma_y$ , и если  $\sigma_\varepsilon$  меньше, чем  $\sigma_y$ , и это отличие статистически значимо, то модель нестационарного среднего эффективнее, чем модель стационарного среднего. Для модели линейного тренда стандартное отклонение остатков этой модели  $\sigma_\varepsilon$  рассчитывается по формуле (4), для модели ступенчатых изменений среднего в случае перехода от одного среднего к другому по формуле

$$\sigma_{\text{смын}} = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 n_1 + \sigma_2^2 n_2}{(n_1 + n_2 - 1)}}, \quad (5)$$

где  $\sigma_1^2, \sigma_2^2$  – дисперсии первой и второй стационарных частей ряда,  $n_1, n_2$  – продолжительности первой и второй частей ряда.

В модели ступенчатых изменений требуется определить год перехода от одного стационарного среднего к другому ( $T_{ст}$ ), который обычно неизвестен, хотя его и можно задать из анализа хронологического графика. Однако, чтобы исключить субъективизм, можно определить этот год итерациями при достижении минимального значения сумм квадратов отклонений двух частей временного ряда [19; 20], что аналогично применению МНК (метода наименьших квадратов) в регрессионном анализе

$$\sigma_1^2(n_1-1) + \sigma_2^2(n_2-1) = \min. \quad (6)$$

При этом следует задать минимальный объем первой части ряда, например,  $n_1=10$ , при котором  $n_2=n-n_1$ , и затем последовательно увеличивать  $n_1$  до  $m=n-10$ , при котором  $n_2=10$ , т.е.  $n_1=11, 12, \dots, m$ . Иначе эту процедуру можно назвать методом расширяющегося окна [19; 20].

## Гидрология

Лобанов В.А., Григорьева А.А.

Очевидно, что стандарт остатков модели стационарного среднего должен быть наибольшим или, по крайней мере, равен стандарту остатков нестационарных моделей, если они практически ничего не объясняют. Чем больше разность между стандартами остатков стационарной и нестационарной моделей, тем нестационарная модель эффективнее стационарной. В качестве меры отличия можно рассмотреть относительные отклонения  $\Delta$  в % (или  $\Delta_{тр}$  и  $\Delta_{ст}$  – для моделей тренда и ступенчатых изменений), рассчитываемые по формуле

$$\Delta = \left( \frac{\sigma_y - \sigma_\varepsilon}{\sigma_y} \right) 100\%, \quad (7)$$

В первом приближении можно принять, что любая нестационарная модель будет эффективнее модели стационарной выборки, если  $\Delta \geq 10\%$ , т.е. отличие между моделями гарантированно превышает погрешность процесса или погрешность рассматриваемой характеристики.

Для оценки статистически значимого отличия остаточных дисперсий стационарной и нестационарной моделей можно применить критерий Фишера

$$F_{TP} = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_\varepsilon^2}. \quad (8)$$

В числителе всегда будет дисперсия исходного ряда наблюдений, так как она является наибольшей или, по крайней мере, равна остаточной дисперсии конкурирующей модели. В случае, если расчетное значение статистики Фишера оказывается больше критического, то остаточные дисперсии двух моделей имеют статистически значимое различие и соответствующая модель (тренда или ступенчатых изменений) статистически эффективнее, чем модель стационарной выборки. Аналогичным образом можно оценить, насколько одна модель нестационарного среднего эффективнее, чем другая модель, например, модель тренда и модель ступенчатых изменений.

На основе критических значений статистик Фишера можно определить и критическое значение  $\Delta_{кр}\%$ , которое получается при подстановке (8) в (7)

$$\Delta_{кр} = \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{F^*}} \right) * 100\%, \quad (9)$$

где  $F^*$  — критическое значение статистики критерия Фишера при уровне значимости  $\alpha$  и степенях свободы  $\nu_1$  и  $\nu_2$ , где  $\nu_1 = n_1 - 1$  и  $\nu_2 = n_2 - 1$ , а  $n_1, n_2$  – объемы выборок.

Принимая, что уровень значимости  $\alpha = 5\%$ , а временной ряд один и тот же, т.е.  $n_1 = n_2 = n$  и для средней продолжительности ряда, равной  $n = 61$  г. из таблиц критических значений [16], получим  $F^* = 1,53$  и из (9)  $\Delta_{кр} = 19,4\%$ . Если же продолжительность ряда равна  $n = 31$  год, то  $F^* = 1,84$  и  $\Delta_{кр} = 26,5\%$ , если  $n = 120$ , то  $F^* = 1,35$  и  $\Delta_{кр} = 13,8\%$  и т.д. Можно также найти, что  $\Delta_{кр} = 10\%$  соответствует  $F^* = 1,235$  и  $n$  примерно равно 500, т.е. выбранное  $\Delta = 10\%$  соответствует предельному критическому при очень большой продолжительности ряда.

Последовательность оценки эффективности моделей нестационарного среднего можно представить в виде следующего алгоритма:

- моделями нестационарного среднего аппроксимируется временной ряд за весь период наблюдений и предварительно оценивается их эффективность и год перехода от одних стационарных условий к другим;

- если показатели моделей нестационарного среднего эффективны, то оценивается, какая из двух моделей лучше (имеет большее отличие от стационарной модели): линейного тренда или ступенчатых изменений путем сравнения  $\Delta_{тр}$  и  $\Delta_{ст}$ ;

- для эффективной нестационарной модели оценивается устойчивость показателей ее эффективности ( $r$ ,  $\Delta_{тр}$  и  $\Delta_{ст}$ ) и года перехода ( $T_{ст}$ ) путем построения ее за разные временные отрезки ряда;

- выбирается наиболее часто повторяющийся год перехода от одних стационарных условий к другим ( $T_{стр}$ ) и временной ряд по этому году делится на две части;

## Гидрология

Лобанов В.А., Григорьева А.А.

– оценивается статистическая значимость коэффициента корреляции ( $r$ ) со временем для каждой части временного ряда (до и после года перехода  $T_{\text{ср}}$ ) с целью оценки вида модели (стационарная или тренд для каждой из двух частей ряда);

– рассчитываются средние значения для каждой части временного ряда ( $Q_{\text{ср1}}$  и  $Q_{\text{ср2}}$ ) и оценивается их статистически значимое различие на основе критерия Стьюдента [17];

– для количественной оценки влияния изменений климата рассчитывается разность между средними значениями ( $\Delta Q_{\text{ср}} = Q_{\text{ср2}} - Q_{\text{ср1}}$ ), сопоставляется со средним квадратическим отклонением всего ряда ( $\sigma_y$ ), которое характеризует естественную климатическую изменчивость.

## Результаты моделирования и их обсуждение

В соответствии с алгоритмом исследования, прежде всего, была осуществлена аппроксимация моделями линейного тренда и ступенчатых изменений всех рядов с первого по последний год наблюдений для каждой гидрологической характеристики. Полученные показатели  $\Delta_{\text{тр}}$ ,  $\Delta_{\text{ст}}$ ,  $T_{\text{ст}}$  и  $r$  приведены в табл. 2, где  $Q_{\text{мах вп}}$  – максимальные срочные расходы весеннего половодья в  $\text{м}^3/\text{с}$ ,  $Q_{\text{мах дп}}$  – максимальные срочные расходы дождевых паводков,  $Y$  – слой стока весеннего половодья,  $Q_{\text{min лет}}$  – минимальные летние расходы воды,  $Q_{\text{min зим}}$  – минимальные зимние расходы воды,  $Q_{\text{год}}$  – среднегодовые расходы воды. В табл. 2 не представлены результаты моделирования максимальных в году срочных расходов воды, т.к. они практически полностью совпадают с результатами для  $Q_{\text{мах вп}}$ . Жирным шрифтом в табл.2 выделены  $\Delta > 10\%$  и соответствующие им годы  $T_{\text{ст}}$  для модели ступенчатых изменений и статистически значимые  $r$  при  $\alpha = 5\%$ .

Таблица 2

Показатели эффективности аппроксимации временных рядов гидрологических характеристик моделями нестационарного среднего

Efficiency indicators of the time series approximation of hydrological characteristics by nonstationary average models

Код	Тн	$Q_{\text{мах вп}}$				$Q_{\text{мах дп}}$				Y			
		$\Delta_{\text{мп}}$	$\Delta_{\text{см}}$	$T_{\text{см}}$	r	$\Delta_{\text{мп}}$	$\Delta_{\text{см}}$	$T_{\text{см}}$	r	$\Delta_{\text{мп}}$	$\Delta_{\text{см}}$	$T_{\text{см}}$	r
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
3036	1940	1,5	3,8	1956	0,17	2,8	9,1	2005	0,23	1,7	3,6	1959	0,18
3042	1927	1	3,6	1999	0,14	0,6	4,4	2004	0,11	1,8	3,1	1974	0,19
3156	1934	1,3	3,1	1978	0,16	1,2	2,1	1998	0,15	6,5	7,9	1977	<b>0,35</b>
3180	1934	0,8	3,9	1951	0,13	2,2	5,3	2006	0,21	<b>16,7</b>	<b>22,9</b>	<b>2004</b>	<b>0,55</b>
3222	1935	0	0,7	1997	0,13	1,6	3,7	1972	0,18	0,3	2,2	1994	0,08
3225	1927	0	1,7	1939	0	1,3	2,9	1955	0,16	2,4	3,6	1966	0,22
3229	1943	1,3	3	1952	0,16	0,9	2	1972	0,13	1,6	2,9	1966	0,18
3246	1926	0	0,7	2005	0	1,4	3,3	1979	0,17	0,1	0,9	1942	-0,05
3291	1933	0,6	3,3	1996	0,11	1,6	3,9	2003	0,18	1,4	4	1996	0,17
3293	1937	2,5	7	1998	0,22	4,7	5,9	2003	<b>0,30</b>	6,3	9,8	1998	0,35
3367	1938	4,4	9,3	1988	<b>0,29</b>	0,3	2,8	1956	-0,08	5,4	8,1	1987	<b>0,32</b>
3405	1936	0,6	2,3	1967	0,11	0	0,6	1962	0	2,6	5	1964	0,23
3414	1926	4,4	8,2	2004	<b>0,29</b>	0,1	2,1	2004	0,04	3,8	9,1	2004	<b>0,27</b>
3443	1943	2,4	8,5	1969	-0,22	0	2	1996	0,01	1,5	8,8	2008	0,17
3445	1937	1,4	3,1	1991	0,17	1	5,2	1998	0,14	6,1	8,6	1989	<b>0,34</b>
3483	1937	0,7	3,1	2004	0,12	0	1,1	1949	0,01	2,1	5,3	2007	0,2
3507	1945	1,7	5,8	2004	0,18	2,9	<b>11,1</b>	<b>2004</b>	0,24	4,6	7,7	1996	<b>0,3</b>
3518	1944	0,5	3,4	1957	-0,1	2	4,4	2004	0,2	0,5	1,6	2003	-0,1
3801	1954	0,1	0,9	1967	0,03	0,6	5,5	1949	-0,11	1,5	4,2	1964	0,17
3821	1936	0,3	6,8	1947	0,08	0,7	1,3	1963	-0,12	2,8	5,4	1948	0,24
3881	1962	<b>10,9</b>	<b>10,1</b>	<b>1996</b>	<b>0,45</b>	-	-	-	-	<b>13</b>	<b>13</b>	<b>1991</b>	<b>0,49</b>
Среднее		1,7	4,4	1979	0,12	1,3	3,9	1984	0,10	3,9	6,6	1983	0,23
Год	Тн	$Q_{\text{min лет}}$				$Q_{\text{min зим}}$				$Q_{\text{год}}$			
		$\Delta_{\text{мп}}$	$\Delta_{\text{см}}$	$T_{\text{см}}$	r	$\Delta_{\text{мп}}$	$\Delta_{\text{см}}$	$T_{\text{см}}$	r	$\Delta_{\text{мп}}$	$\Delta_{\text{см}}$	$T_{\text{см}}$	r
3036	1940	1,3	3,9	1997	0,16	7,8	<b>11,6</b>	<b>1998</b>	<b>0,39</b>	0,5	3,7	2007	0,1
3042	1927	1,2	3,9	1997	0,16	<b>17,2</b>	<b>28,9</b>	<b>1997</b>	<b>0,56</b>	2,3	6,4	2004	0,21
3156	1934	7,9	<b>13,4</b>	<b>1996</b>	<b>0,39</b>	<b>15,1</b>	<b>20,9</b>	<b>1989</b>	<b>0,53</b>	7,8	<b>11,6</b>	<b>1998</b>	<b>0,39</b>
3180	1934	<b>15,7</b>	<b>35,1</b>	<b>2002</b>	<b>0,54</b>	<b>23,2</b>	<b>31,1</b>	<b>2005</b>	<b>0,64</b>	<b>12,9</b>	<b>30,7</b>	<b>2004</b>	<b>0,49</b>

Гидрология  
Лобанов В.А., Григорьева А.А.

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
3222	1935	3,7	6	1997	0,27	21,3	28,9	1994	0,62	5,4	9,6	1997	0,32
3225	1927	3	4,5	1997	0,24	20	19,1	1972	0,60	3,7	7,1	1997	0,27
3229	1943	1	2,1	1971	0,14	34	28,9	1990	0,75	5,4	7,6	1996	0,33
3246	1926	0,2	2,3	1994	-0,06	–	–	–	–	1,4	3,7	1994	-0,17
3291	1933	7,4	9,1	2003	0,38	14,4	19,6	1980	0,52	3,3	5,7	1996	0,25
3293	1937	9,4	14,4	2003	0,42	27,5	26,8	2004	0,69	11,7	13,7	2005	0,47
3367	1938	0,8	2,8	1960	0,12	–	–	–	–	2,4	5,5	1987	0,22
3405	1936	1,1	2,7	1973	0,15	–	–	–	–	2,9	5,6	1973	0,24
3414	1926	1,8	7,5	1994	0,19	–	–	–	–	3,6	6,4	2004	0,26
3443	1943	12,9	19,4	1994	0,49	–	–	–	–	12,6	21,9	1996	0,49
3445	1937	29,5	39,8	1994	0,71	–	–	–	–	11	17,2	1988	0,46
3483	1937	8	10,0	1950	0,39	–	–	–	–	2	2,8	1949	0,2
3507	1945	2,1	3,6	2000	0,21	0,1	3,1	1988	0,05	4,7	9,6	2000	0,3
3518	1944	1,3	3,9	1967	0,16	–	–	–	–	0,1	0,8	1994	0,04
3801	1954	8,3	13,2	2002	0,4	–	–	–	–	3,2	8,1	1989	0,25
3821	1936	1	5,5	1997	0,14	34,5	41,7	1980	0,76	0,4	2,3	1988	0,09
3881	1962	12	15,9	1996	0,48	16,1	23,0	1998	0,54	13,7	16,6	1996	0,51
Среднее		6,2	10,5	1990	0,29	19	24	1991	0,55	5,2	9,4	1993	0,27

Из результатов табл. 2 следует основной вывод, что если модели нестационарного среднего эффективны, то всегда имеет место рост среднего значения. При этом процент эффективных нестационарных моделей является разным для разных гидрологических характеристик. Для многолетних рядов максимальных срочных расходов воды как весеннего половодья, так и дождевых паводков преобладает модель стационарного среднего. Исключение составляет пункт 3881 р. Алазея – с. Аргахта, но для него нестационарность характерна для всех остальных гидрологических характеристик, что может быть связано с влиянием хозяйственной деятельности. Для многолетних рядов слоев весеннего половодья нестационарные модели, если оценивать их по статистически значимому  $r$ , присущи для трети рядов, а для минимальных летних и среднегодовых расходов воды – уже для половины. Наибольшее число нестационарных эффективных моделей имеет место для рядов минимальных зимних расходов воды. Если исключить реки с перемерзанием (в табл. 2 результаты по ним отсутствуют), то для оставшейся половины рядов в 92% случаев эффективна модель нестационарного среднего. В то же время на некоторых реках с зимним перемерзанием (3405 р. Оленек – с. Оленек, 3414 р. Яна – г. Верхоянск) с конца 1990-х – начала 2000-х уже регистрируются минимальные зимние расходы воды. Наблюдаемое увеличение стока, особенно минимального и среднегодового, вполне может быть связано с дополнительным притоком воды за счет таяния многолетней мерзлоты [13; 24].

Еще один важный вывод, который может быть получен по результатам табл. 2, это какая из моделей нестационарного среднего более эффективна: тренда или ступенчатых изменений. Средние по всем рядам значения  $\Delta_{тр}$  и  $\Delta_{ст}$  наглядно показывают, что всегда  $\Delta_{ст} > \Delta_{тр}$ , причем если рассматривать только эффективные модели нестационарного среднего для минимальных и среднегодовых расходов воды, то в среднем для минимальных летних расходов  $\Delta_{тр}=13\%$  и  $\Delta_{ст}=20\%$ , для минимальных зимних расходов воды  $\Delta_{тр}=21\%$  и  $\Delta_{ст}=26\%$  и для среднегодовых расходов воды  $\Delta_{тр}=12\%$  и  $\Delta_{ст}=19\%$ . Поэтому можно считать, что модель ступенчатых изменений эффективнее при аппроксимации временных рядов, чем модель линейного тренда. Примеры характерных эффективных моделей ступенчатых изменений среднегодовых расходов воды приведены на рис. 2.

Если в большинстве случаев преобладает нестационарная модель ступенчатых изменений, то следующим является вопрос о годе этого ступенчатого перехода от одних однородных условий к другим. Очевидно, что этот год можно оценивать только для эффективных нестационарных моделей и в среднем он приходится на 1990-е гг. (1992–1999), хотя варьирует в широких пределах. Так, для эффективных нестационарных моделей

## Гидрология

Лобанов В.А., Григорьева А.А.

минимальных летних расходов воды  $T_{ст}$  изменяется от 1994 до 2004 г., для минимальных зимних расходов воды  $T_{ст}$  изменяется в широких пределах (от 1970-х до начала 2000-х) и группируется в основном в двух временных интервалах 1972–1980 и 1994–2004 гг., что может зависеть как от территории, так и от локальных особенностей формирования и изменения зимних расходов воды, связанных с влиянием хозяйственной деятельности. Для среднегодовых расходов воды  $T_{ст}$  в основном соответствует периоду 1996–2004 гг.

Достаточно большой диапазон  $T_{ст}$ , особенно в минимальных зимних расходах воды, обусловлен и погрешностями его определения, а также влиянием не только климата, но и антропогенных, а также локальных факторов. Поэтому необходимо было оценить устойчивость определения  $T_{ст}$ , а также остальных показателей эффективности для нестационарных моделей:  $\Delta_{тр}$ ,  $\Delta_{ст}$  и  $r$ , так как некоторые  $\Delta_{тр}$  и  $\Delta_{ст}$  не намного больше 10%.

Для оценки устойчивости во времени  $\Delta_{тр}$ ,  $\Delta_{ст}$ ,  $T_{ст}$  и  $r$  рассматривался временной ряд разной продолжительности, которая определялась заданием разного начала временного ряда: с 1930–1940 гг. и т.д. до начала ряда в 1990 г. При такой оценке за разные интервалы времени можно более надежно определить и наиболее вероятный год  $T_{стр}$ , который характеризует переход от одного однородного режима к другому. Даже если помимо модели ступенчатых переходов эффективна и модель тренда,  $T_{стр}$  позволяет фиксировать год изменений в параметрах этой модели, например, в изменении скорости тренда или его статистической значимости, когда тренд был статистически значим до  $T_{стр}$  и стал статистически незначим после  $T_{стр}$ . Поэтому после определения  $T_{стр}$  для каждой части ряда были рассчитаны коэффициенты корреляции  $r$  со временем и оценена их статистическая значимость. Эта процедура позволяет еще раз проверить вид модели временного ряда. Если до и после  $T_{стр}$  коэффициенты  $r$  статистически незначимы, то эта ситуация соответствует модели ступенчатых изменений. Если до и после  $T_{стр}$  коэффициенты  $r$  статистически значимы, то временной ряд соответствует модели тренда, а скорость и/или направление этого тренда, видимо, изменились. Также может быть ситуация, когда до  $T_{стр}$  коэффициент  $r$  статистически незначим, а после  $T_{стр}$  – статистически значим, что свидетельствует о начале трендовых изменений после  $T_{стр}$ , а до этого ряд был стационарен. Также возможна и обратная ситуация: наличие тренда до  $T_{стр}$  и стационарность после.

В табл. 3 в качестве примера приведены результаты оценки устойчивости во времени показателей  $\Delta_{тр}$ ,  $\Delta_{ст}$ ,  $T_{ст}$  и  $r$  при назначении разных лет начала ряда, а также определения  $T_{стр}$  по наибольшей повторяемости  $T_{ст}$  (повторяющиеся  $T_{ст}$  выделены жирным шрифтом) и рассчитанные  $r$  для частей ряда до и после  $T_{стр}$  для рядов среднегодовых расходов воды с эффективными нестационарными моделями. Из результатов табл. 3 следует, что практически всегда  $T_{ст}$  не зависит от задания начала ряда, т.е. является устойчивым и определяется надежно, а установленные  $T_{стр}$  находятся в диапазоне от 1996 по 2005 г. Коэффициенты корреляции  $r$  для первой и второй частей ряда (до и после  $T_{стр}$ ) практически всегда статистически незначимы, что подтверждает вывод о преобладании модели ступенчатого изменения среднего значения во временных рядах. Исключение составляет ряд 3180 р. Чара – с. Токко, в котором в 2013 г. имеет место неоднородный минимум (рис. 2), после исключения которого  $r$  становится статистически незначимым. Показатели  $\Delta_{тр}$ ,  $\Delta_{ст}$  и  $r$  эффективны и статистически значимы вне зависимости от задаваемого года начала ряда. В отдельных случаях отмечаются некоторый рост параметров при сдвиге задаваемого года начала ряда от прошлого к настоящему или их уменьшение при начале ряда с 1990 г., что свидетельствует о нарушении однородности рядов в последний период наблюдений с конца XX века.

Гидрология  
Лобанов В.А., Григорьева А.А.

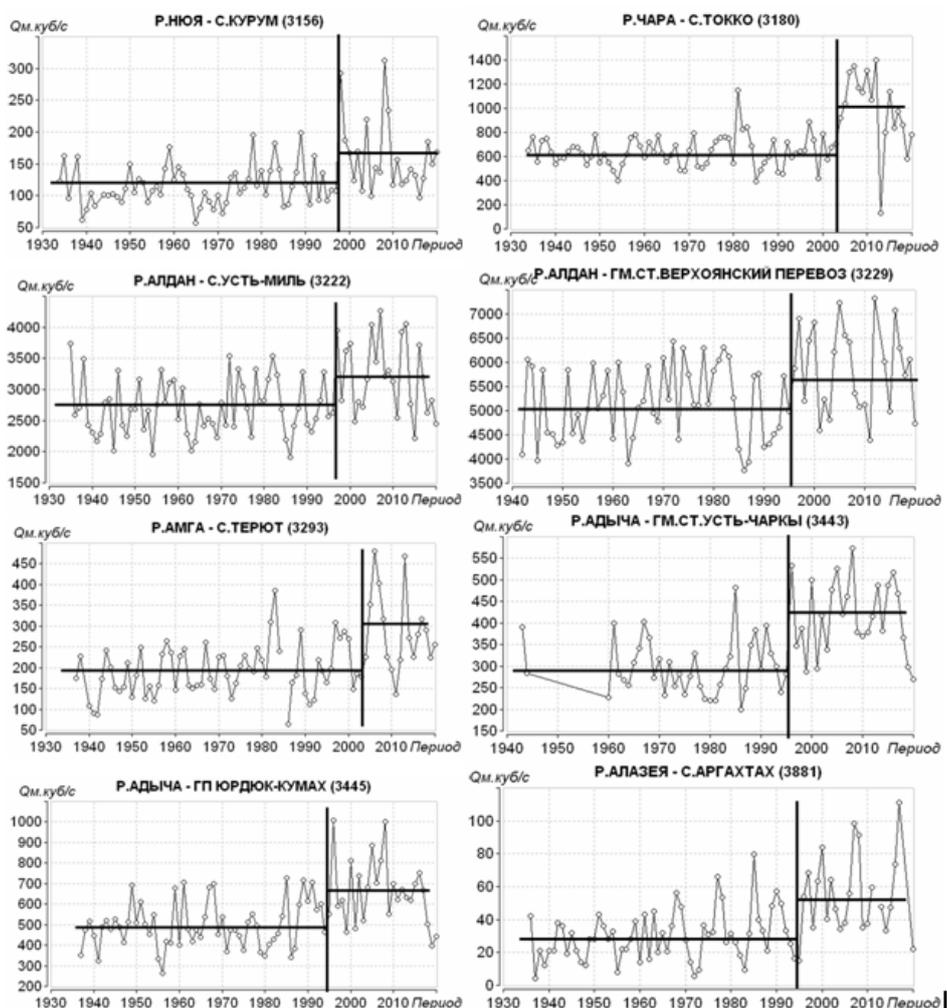


Рис. 2. Нестационарные ряды среднегодовых расходов воды  
Fig. 2. Non-stationary time series of annual discharges

Таблица 3

Оценка устойчивости во времени показателей эффективности нестационарных моделей среднегодовых расходов воды  
Estimation of stability in time for performance indicators of non-stationary models  
of average annual water discharges

Код	Показатели	Год начала ряда	C 1930	C 1940	C 1950	C 1960	C 1970	C 1980	C 1990	r до T <sub>ст</sub>	r после T <sub>ст</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3042	$\Delta_{TP}$	2,3	3	8,1	4,9	3,7	3,7	1,5	4,8	–	–
	$\Delta_{CT}$	6,4	6,6	8,4	7,7	7,9	7,7	6,4	<b>12,1</b>	–	–
	T <sub>ст</sub>	<b>2004</b>	<b>2004</b>	<b>2004</b>	<b>2004</b>	<b>2004</b>	<b>2004</b>	<b>2004</b>	<b>2004</b>	–	–
	r	0,21	0,24	<b>0,39</b>	<b>0,31</b>	<b>0,27</b>	<b>0,27</b>	0,17	<b>0,31</b>	–	–
3156	$\Delta_{TP}$	7,8	7,8	9,3	6,2	7,7	4,4	1,8	0,9	0,10	–0,14
	$\Delta_{CT}$	<b>11,6</b>	<b>11,6</b>	<b>12,2</b>	<b>10,6</b>	<b>11</b>	8,6	7,1	1,3	–	–
	T <sub>ст</sub>	<b>1998</b>	<b>1998</b>	<b>1998</b>	<b>1998</b>	<b>1998</b>	<b>1998</b>	<b>1998</b>	<b>1998</b>	–	–
	r	<b>0,39</b>	<b>0,39</b>	<b>0,42</b>	<b>0,35</b>	<b>0,38</b>	0,29	0,19	0,13	0,15	–0,29
3180	$\Delta_{TP}$	<b>12,9</b>	<b>12,9</b>	<b>15,1</b>	<b>16</b>	<b>14,6</b>	<b>13,3</b>	<b>12,5</b>	<b>14,2</b>	–	–
	$\Delta_{CT}$	<b>30,7</b>	<b>30,7</b>	<b>31,1</b>	<b>30,7</b>	<b>30,5</b>	<b>29,3</b>	<b>28,6</b>	<b>32</b>	–	–
	T <sub>ст</sub>	<b>2004</b>	<b>2004</b>	<b>2004</b>	<b>2004</b>	<b>2004</b>	<b>2004</b>	<b>2004</b>	<b>2004</b>	–	–
	r	<b>0,49</b>	<b>0,49</b>	<b>0,53</b>	<b>0,54</b>	<b>0,52</b>	<b>0,5</b>	<b>0,48</b>	<b>0,51</b>	0,07	–0,61
3222	$\Delta_{TP}$	5,4	5,4	8,3	6,1	7,9	2,7	2,6	1	–	–
	$\Delta_{CT}$	9,6	9,6	<b>11,1</b>	<b>10,2</b>	<b>11,2</b>	7,8	8,7	3,8	–	–
	T <sub>ст</sub>	<b>1997</b>	<b>1997</b>	<b>1997</b>	<b>1997</b>	<b>1997</b>	<b>1997</b>	<b>1997</b>	<b>1997</b>	–	–
	r	<b>0,32</b>	<b>0,32</b>	<b>0,4</b>	<b>0,34</b>	<b>0,39</b>	0,23	0,23	0,14	0,03	–0,27
3293	$\Delta_{TP}$	<b>11,7</b>	<b>11,7</b>	<b>12,3</b>	9,3	8,6	6,4	4,5	8,3	–	–

Гидрология  
Лобанов В.А., Григорьева А.А.

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	$\Delta_{\text{стр}}$	13,7	13,7	13,7	13,1	12,8	11,6	10,1	13,3	–	–
	$T_{\text{стр}}$	2005	2005	2005	2005	2005	2005	2005	2005	–	–
	r	0,47	0,47	0,48	0,42	0,4	0,35	0,3	0,4	0,28	–0,35
3443	$\Delta_{\text{гр}}$	12,6	12,6	12,6	15,5	15,5	19,3	12,5	3,8	–	–
	$\Delta_{\text{стр}}$	21,9	21,9	21,9	22,5	22,5	23,9	18,2	9,5	–	–
	$T_{\text{стр}}$	1996	1996	1996	1996	1996	1996	1996	1996	–	–
	r	0,49	0,49	0,49	0,53	0,53	0,59	0,48	0,27	–0,07	–0,07
3445	$\Delta_{\text{гр}}$	11	11	10,3	10,2	8,9	10,8	4,5	0,3	–	–
	$\Delta_{\text{стр}}$	17,2	17,2	16,7	16,6	15,9	18,6	9	2,7	–	–
	$T_{\text{стр}}$	1988	1988	1988	1988	1996	1996	1996	1996	–	–
	r	0,46	0,46	0,44	0,44	0,41	0,45	0,40	–0,08	–0,03	–0,08
3507	$\Delta_{\text{гр}}$	4,7	4,7	4,7	4	3,8	8,8	5,9	3,6	–	–
	$\Delta_{\text{стр}}$	9,6	9,6	9,6	9,3	9,8	13,9	11,6	10,3	–	–
	$T_{\text{стр}}$	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	–	–
	r	0,3	0,3	0,3	0,28	0,27	0,41	0,34	0,27	–0,03	–0,2
3881	$\Delta_{\text{гр}}$	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7	15,1	11,2	0,7	–	–
	$\Delta_{\text{стр}}$	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6	16,8	14,6	1,9	–	–
	$T_{\text{стр}}$	1996	1996	1996	1996	1996	1996	1996	1996	–	–
	r	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,53	0,46	0,12	0,17	–0,07

### Пространственные изменения и их обсуждение

Главным результатом моделирования временных рядов является установление вида модели временного ряда, которая в основном соответствует ступенчатому росту среднего значения в 1990-х – начале 2000-х и переходу от одного стационарного режима к другому в год  $T_{\text{стр}}$ . При этом «быстрые» характеристики стока, такие как максимальные в году расходы воды, максимальные расходы весеннего половодья и дождевых паводков, пока остаются стационарными, а изменяются в основном «медленные» характеристики: годовой, минимальный зимний и минимальный летний стоки и в меньшей степени слой стока весеннего половодья. В связи с тем, что атмосферные осадки практически остаются стационарными [7], то слой стока половодья, от них зависящий, также мало изменяется. Поэтому изменение годового стока связано в основном с ростом минимального летнего и зимнего стоков, а причиной дополнительного притока воды в реки в меженный период можно считать таяние многолетней мерзлоты. Подтверждение этому дано, например, в работах [7; 24], где показан ступенчатый рост температуры почвы на разных глубинах и построена карта зон оттаивания многолетней мерзлоты для территории Якутии.

Количественная оценка роста минимальных летних, зимних и среднегодовых расходов воды была получена на основе расчета разности между двумя средними значениями  $Q_{\text{ср1}}$  и  $Q_{\text{ср2}}$ , полученными по частям ряда до и после  $T_{\text{стр}}$ . Для пространственной интерполяции результатов эти разности были нормированы по отношению к  $Q_{\text{ср1}}$  и  $\sigma_y$  (СКО):  $\Delta q = (Q_{\text{ср2}} - Q_{\text{ср1}}) / Q_{\text{ср1}} (\%)$  и  $k = (Q_{\text{ср2}} - Q_{\text{ср1}}) / \sigma_y$ . Результаты расчетов  $\Delta q$  и  $k$  и оценки стационарности дисперсий и средних значений за периоды до и после  $T_{\text{стр}}$  по критериям Фишера ( $F$ ) и Стьюдента ( $St$ ) приведены в табл. 4, где знаки «+» или «–» свидетельствуют о принятии или отклонении гипотезы стационарности при  $\alpha = 5\%$ , а рядом указан уровень значимости, соответствующий расчетному значению статистики критерия ( $\alpha_p$ ), если он находится в диапазоне  $\alpha_p$  от 1 до 10%. Это важно если, например,  $\alpha_p$  несколько меньше заданного  $\alpha = 5\%$ , и тогда гипотеза может быть условно принята. По предложению Макнимара [16], следует воздерживаться от принятия гипотезы, если  $\alpha_p$  в диапазоне от 10 до 1%, и отклонять гипотезу при  $\alpha_p < 1\%$  и принимать ее при  $\alpha_p > 10\%$ . Жирным шрифтом в табл. 4 выделены значения, соответствующие статистически значимым нестационарным средним значениям.

Гидрология  
Лобанов В.А., Григорьева А.А.

Таблица 4

Результаты оценки различий средних значений и дисперсий двух частей временного ряда до и после  $T_{стр}$ .  
The results of estimation of the differences in the average values and variances of the two parts of the time series before and after  $T_{стр}$ .

Код	Оmin лет				Оmin зим				Огод			
	$\Phi$	$Сm$	$\Delta q\%$	$k$	$\Phi$	$Сm$	$\Delta q\%$	$k$	$\Phi$	$Сm$	$\Delta q\%$	$k$
3036	+	+5,4	12,6	0,62	+	–	<b>24,5</b>	<b>1,00</b>	–	+	5,8	0,29
3042	+	+6,7	12,6	0,60	+	–	<b>41,1</b>	<b>1,54</b>	+	+	8,0	0,46
3156	+	–	<b>56,3</b>	<b>0,95</b>	–	–	<b>90,8</b>	<b>1,27</b>	–	–	<b>40,1</b>	<b>1,04</b>
3180	–	–	<b>104</b>	<b>1,79</b>	–1,4	–2,8	<b>56,6</b>	<b>1,02</b>	–	–2,3	<b>54,2</b>	<b>1,54</b>
3222	+	–	<b>24,5</b>	<b>0,75</b>	+	–	<b>51,2</b>	<b>1,24</b>	+7,8	–	<b>18,8</b>	<b>0,95</b>
3225	+	–	<b>20,6</b>	<b>0,68</b>	+	–1,4	<b>36,5</b>	<b>0,96</b>	+	+6,3	9,3	0,19
3229	–3,8	+	13,4	0,42	+5,5	–	<b>83,0</b>	<b>1,43</b>	+8,5	+6,8	7,7	0,46
3246	–3,6	+5,4	10,4	0,16	перемерзание				+	+	–6,1	–0,21
3291	–4,9	–	<b>42,8</b>	<b>0,82</b>	+	–	<b>55,6</b>	<b>0,98</b>	–	+	12,5	0,40
3293	+	–	<b>61,6</b>	<b>1,25</b>	+7,3	–	<b>95,7</b>	<b>1,31</b>	+5,1	–	<b>52,1</b>	<b>1,28</b>
3367	–4,6	+	26,5	0,34	–	+	перемерзание		+	+7,5	15,1	0,49
3405	+	+5,7	27,4	0,52	–	–	перемерзание		+	+	11,6	0,43
3414	+	–	<b>39,8</b>	<b>1,02</b>	–	–	перемерзание		+	+9,4	14,9	0,38
3443	–	–	<b>73,0</b>	<b>1,18</b>	перемерзание				+	–	<b>39,3</b>	<b>1,26</b>
3445	+	–	<b>108</b>	<b>1,67</b>	перемерзание				–4,7	–	<b>33,4</b>	<b>1,13</b>
3483	+	+5,6	23,7	0,59	перемерзание				+	+	5,3	0,16
3507	–3,2	+	16,4	0,33	–	–	<b>116</b>	<b>0,80</b>	+	–3,2	<b>25,3</b>	<b>0,60</b>
3518	+7,6	+	2,8	0,07	перемерзание				–	+	5,1	0,18
3801	–	–	<b>87,4</b>	<b>0,81</b>	перемерзание				–2,6	+	7,7	0,31
3821	+	+7,8	16,1	0,60	–1,8	–	<b>92,7</b>	<b>1,62</b>	+	+	2,1	0,18
3881	–	–	<b>153</b>	<b>1,07</b>	–	–3,5	<b>478</b>	<b>1,35</b>	–3,6	–	<b>90,5</b>	<b>1,26</b>

Из результатов табл. 4 следуют несколько выводов:

– статистически значимое при оценке по критерию Стьюдента увеличение среднегодовых расходов воды отмечается в 38% случаях, минимальных летних – в 52% случаях и минимальных зимних – в 100% случаях для неперемежающихся рек;

– увеличение средних значений в трети случаев сопровождается изменением дисперсии (в основном ростом) при оценке ее стационарности по критерию Фишера, причем рост дисперсии, особенно в рядах минимальных зимних расходов воды, обусловлен влиянием отдельных экстремумов;

– статистически значимое различие средних значений имеет место, если  $\Delta q > 20\%$ , и поэтому любые изменения характеристик стока и осадков менее 20% вряд ли можно считать значимыми;

– в %-ном отношении наибольшее увеличение наблюдается для минимальных зимних расходов воды до 100% (за исключением аномального изменения в пункте 3881 р. Алазея – с. Аргахта), затем – для минимальных летних расходов воды до 70–80% и для среднегодовых расходов воды до 40–50%;

– для некоторых северных рек с перемерзанием (3405 р. Оленек – с. Оленек, 3414 р. Яна – г. Верхоянск) наметилась тенденция появления зимнего стока в последний период с конца XX в.;

– сравнение увеличения стока с естественной изменчивостью показывает, что коэффициент  $k$  в лучшем случае превышает 1, но никогда не достигает 2, который соответствует 95%-ному доверительному интервалу.

Пространственные распределения  $\Delta q$  и  $k$  для среднегодовых и минимальных расходов воды приведены на рис. 3.

Из пространственных распределений (рис. 3) следует их подобие для  $\Delta q$  и  $k$ , т.е. там, где имеются большие относительные разности средних значений, и отмечается более высокое отношение этой разности к естественной изменчивости. Общим для разных гидрологических характеристик является то, что на севере–востоке Якутии рост расходов

## Гидрология

Лобанов В.А., Григорьева А.А.

воды наибольший. Наибольший рост как по величине, так и по территории характерен для минимальных зимних расходов воды, а изменение в среднегодовых расходах наблюдается в виде изолированных районов на востоке и юге республики Саха (Якутия).

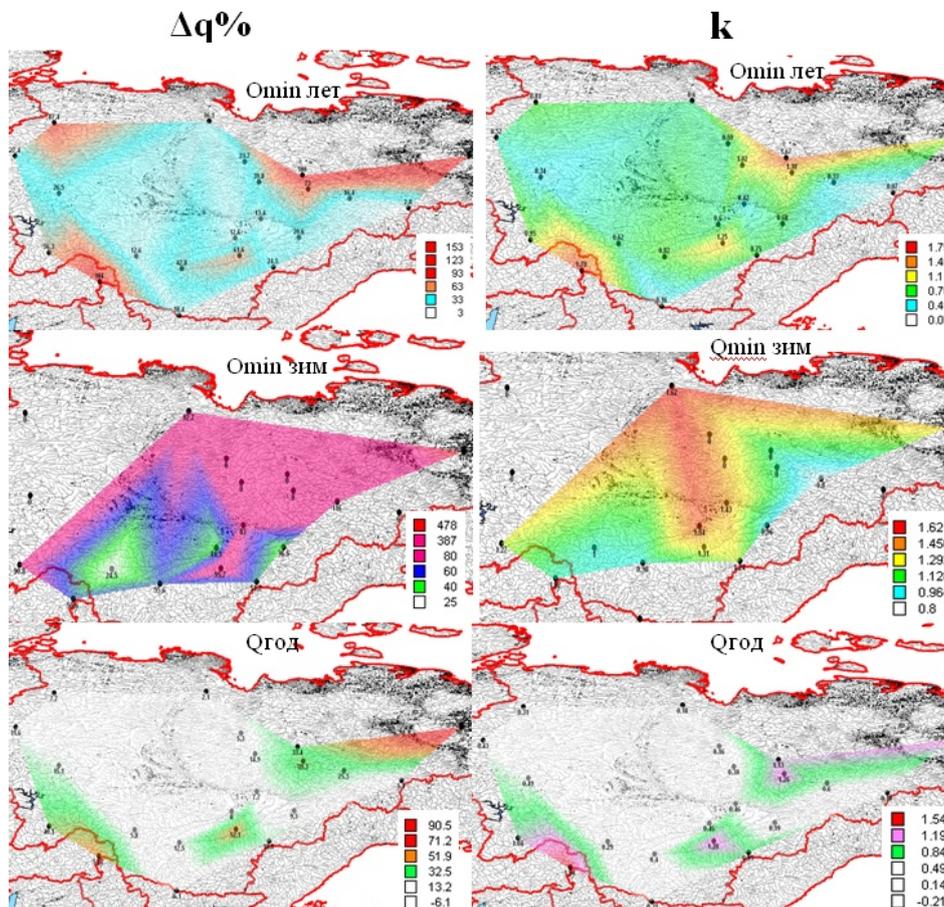


Рис. 3. Пространственные распределения  $\Delta q\%$  и  $k$  минимальных ( $Q_{\min}$  лет,  $Q_{\min}$  зим) и среднегодовых ( $Q_{\text{год}}$ ) расходов воды

Fig. 3. Spatial distributions  $\Delta q\%$  and  $k$  of the minimum ( $Q_{\min}$  лет,  $Q_{\min}$  зим) and average annual ( $Q_{\text{год}}$ ) water discharges

## Заключение

В результате выполненного исследования по моделированию наиболее продолжительных рядов наблюдений различных гидрологических характеристик на территории республика Саха (Якутия) получены следующие основные выводы.

1. Многолетние ряды максимальных расходов воды (максимальных в году, максимумов весеннего половодья и дождевых паводков) пока еще остаются стационарными, для которых соответствует методология определения расчетных гидрологических характеристик на основе стационарной выборки [25].

2. Для других гидрологических характеристик число эффективных моделей нестационарного среднего увеличивается от 30% всех случаев для слоев половодья до 50–60% для среднегодовых и минимальных летних расходов воды и практически до 100% для минимальных зимних расходов воды.

3. Модель ступенчатых изменений среднего значения является эффективнее модели линейного тренда при аппроксимации нестационарных рядов, а год ступенчатых изменений относится к концу XX – началу XXI вв., а модели каждой из двух частей ряда до и после этого года являются практически всегда стационарными.

## Гидрология

Лобанов В.А., Григорьева А.А.

4. Оценка стационарности средних значений и дисперсий по статистическим критериям при разделении ряда по году ступенчатых изменений подтвердила нестационарность средних значений для всех априори установленных нестационарных моделей и в ряде случаев – нестационарность дисперсий.

5. В процентном отношении наибольший рост средних значений до 100% имеет место в минимальных зимних расходах воды, до 70–80% – в минимальных летних расходах воды и до 40–50% – в среднегодовых расходах воды, причем изменение средних значений до 20% нельзя считать статистически значимым и надежно определенным. Относительно естественной изменчивости превышение составляет до 1,5–1,6 СКО, но не более.

6. Территориально наибольший рост минимальных зимних расходов воды отмечается в северной части Якутии, и даже на реках с перемерзанием в последние годы наблюдаются расходы воды, а для минимальных летних и среднегодовых расходов воды наибольшее увеличение зафиксировано на северо-востоке и востоке.

7. Предполагаемой причиной увеличения зимнего (до 100%) и летнего минимального стоков (до 70–80%) и исходя из этого среднегодовых расходов воды до 30% на юге и до 50% на северо-востоке является приток дополнительной воды от таяния многолетней мерзлоты, что подтверждено предыдущими исследованиями.

## Список источников

1. Воейков А.И. Климаты земного шара, в особенности России. СПб., 1884. 640с.
2. Анализ изменения природно-климатических условий Якутии по начало следующего столетия // Природные условия осваиваемых регионов Сибири. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1987. С. 146–159.
3. Боякова С.И., Винокурова Л.И., Игнатьева В.Б., Филиппова В.В. Якутия в условиях глобальных климатических изменений: уязвимость, риски, социальная адаптация // Северо-Восточный гуманитарный вестник. 2010. № 1. С. 22–25.
4. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). М., 2014. 60 с.
5. Григорьев М.Н. Обзор современных изменений климата и природной среды в Республике Саха (Якутия). Якутск: Изд-во «Хамелеон», 2010. 18 с.
6. Изменения климата и их последствия // География в Якутии: наука и образование: мат. II Форума географов Якутии к 70-летию со дня рождения С.Е. Мостахова. Якутск: Изд-во ЯГУ и Института повышения квалификации работников образования, 2005. С. 43–46.
7. Лобанов В.А., Кириллина К.С. Современные и будущие изменения климата Республики Саха (Якутия): монография. СПб.: Изд-во РГГМУ, 2019. 157 с.
8. Кириллина К.С. Тенденции изменения климата Республики Саха (Якутия). Влияние изменений климата на природные процессы криолитозоны // Вопросы географии Якутии. Вып. 11 Якутск: Издание «СМИК-Мастер», 2013. С. 115–121.
9. Кириллина К.С., Лобанов В.А. Оценка современных климатических изменений температуры воздуха на территории Республики Саха (Якутия): уч. зап. Рос. гос. гидромет. ун-та. №38 // Научно-теоретический журнал. СПб.: РГГМУ, 2015. С. 137–151.
10. Кириллина К.С., Лобанов В.А. Оценка современной изменчивости атмосферных осадков на территории Республики Саха (Якутия): уч. зап. Рос. гос. гидромет. ун-та. № 39 // Научно-теоретический журнал. СПб.: РГГМУ, 2015. С. 74–86.
11. Обзор состояния и тенденция изменения климата Якутии / В.Т. Балобаев, М.К. Гаврилова, Ю.Б. Скачков, П.П. Гаврильев и др. Якутск: ЯФ Изд-ва СО РАН, 2003. 52 с.
12. Скачков Ю.Б. Современная изменчивость климата Якутии // Девятое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу: мат. рос. конф. Томск: Изд-во Аграф-Пресс, 2011. С. 66–68.
13. Шерстюков А.Б. Изменения климата и их последствия в зоне многолетней мерзлоты России. Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2009. 127 с.
14. Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю. Изменение стока рек России при глобальном потеплении климата: тр. VI Всес. гидролог. съезда. Секция 3 «Водный баланс, ресурсы поверхностных и подземных вод, гидрологические последствия хозяйственной деятельности и изменений климата: уязвимость и адаптация социально-экономической сферы». М.: Метеоагентство Росгидромета, 2007. С. 159–163.
15. Лобанов В.А., Горошкова Н.И. Характеристики ледового режима рек Республики Саха (Якутия) и их климатические изменения // Уч. зап. РГГМУ. 2019. № 55. С. 86–98.
16. Закс Л. Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.
17. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 78 с.
18. Малинин В.Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.

## Гидрология

Лобанов В.А., Григорьева А.А.

19. Лобанов В.А. Лекции по климатологии. Ч. 2 Динамика климата. Кн. 1: в 2 кн.: учебник. СПб.: РГГМУ. 2016. 332 с.
20. Лобанов В.А. Лекции по климатологии. Ч. 2 Динамика климата. Кн. 2: в 2 кн.: учебник. СПб.: РГГМУ. 2018. 377 с.
21. Шукри О.А.А., Лобанов В.А., Хамид М.С. Современный и будущий климат Аравийского полуострова: монография. СПб.: Изд-во РГГМУ. 2018. 190 с.
22. Лобанов В.А., Тоцакова Г.Г. Проявление современных изменений климата на территории Костромской области: монография // ФГБУ «Костромской центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды». Кострома, 2013. 171 с.
23. Дрейнер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Статистика, 1973. 392 с.
24. Lobanov V.A., Grigorjeva A.A., Goroshkova N.I. Impact of climate change on different types of cryosphere in the Republic of Sakha (Yakutia). PEEH Newsletter, Helsinki, June 2021, p. 20–21. URL: <https://peexhq.home.blog/2021/06/14/impact-of-climate-change-on-different-types-of-cryosphere-in-the-republic-of-sakha-yakutia/>.
25. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. СП 33–101–2003. М.: Госстрой России, 2004. 73 с.

## References

1. Voeikov, A.I. (1884), *Klimaty zemnogo shara, v osobennosti Rossii*. Climates of the globe, especially Russia. St. Petersburg, Russia.
2. Analiz izmeneniya prirodno-klimaticheskikh usloviy Yakutii po nachalo sleduyushchego stoletiya (1987) [Analysis of changes in the natural and climatic conditions of Yakutia at the beginning of the next century], *Prirodnyye usloviya osvayemykh regionov Sibiri*, IMZ SO AN SSSR, Yakutsk, Russia, pp. 146–159.
3. Boyakova, S.I., Vinokurova, L.I., Ignatieva, V.B., Filippova, V.V. (2010), Yakutiya v usloviyakh global'nykh klimaticheskikh izmeneniy: uyazvимость, riski, sotsial'naya adaptatsiya [Yakutia in the context of global climate change: vulnerability, risks, social adaptation], *Severo-Vostochnyy gumanitarnyy vestnik*, no. 1, pp. 22–25.
4. *Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii* (2014) [The second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation], Moscow, Russia.
5. Grigoriev, M.N. (2010), *Obzor sovremennykh izmeneniy klimata i prirodnoy sredy v Respublike Sakha (Yakutiya)* [Review of modern climate and environmental changes in the Republic of Sakha (Yakutia)], Chameleon Publishing House, Yakutsk, Russia.
6. *Izmeneniya klimata i ikh posledstviya* (2005), *Geografiya v Yakutii: nauka i obrazovaniye*. Climate change and its consequences Materials of the II Forum of Yakutian geographers on the occasion of the 70th anniversary of the birth of S.E. Mostakhov, Publishing House of YSU and the Institute for Advanced Studies of Educators, Yakutsk, pp. 43–46 [In Russian].
7. Lobanov, V.A., Kirilina, K.S. (2019), *Sovremennyye i budushie izmeneniya klimata Respubliki Sakha (Yakutiya)* [Current and future climate changes in the Republic of Sakha (Yakutia)], RSHU, St. Petersburg, Russia.
8. Kirillina, K.S. (2013), *Tendentsii izmeneniya klimata Respubliki Sakha (Yakutiya). Vliyaniye izmeneniy klimata na prirodnyye protsessy kriolitozony* [Climate change trends in the Republic of Sakha (Yakutia). Influence of climate change on the natural processes of the permafrost], *Questions of the geography of Yakutia. Issue 11*, Edition "SMIK–Master", Yakutsk, Russia, pp. 115–121 [In Russian].
9. Kirillina, K.S., Lobanov, V.A. (2015), *Otsenka sovremennykh klimaticheskikh izmeneniy temperatury vozdukh na territorii Respubliki Sakha (Yakutiya)*, Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University No. 38, *Scientific and theoretical journal*, RSHU, St. Petersburg, Russia, pp. 137–151 [In Russian].
10. Kirillina, K.S., Lobanov, V.A. (2015), *Otsenka sovremennoy izmenchivosti atmosferykh osadkov na territorii Respubliki Sakha (Yakutiya)* [Evaluation of the modern variability of atmospheric precipitation on the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)], Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University No. 39, *Scientific and theoretical journal*, RSHU, St. Petersburg, Russia, pp. 74–86.
11. *Obzor sostoyaniya i tendentsiya izmeneniya klimata Yakutii* (2003) [Review of the state and trend of climate change in Yakutia], V.T. Balobaev, M.K. Gavrilova, Yu.B. Skachkov, P.P. Gavriliev et al., YA F Izd-va SO RAN, Yakutsk, Russia, 52 p.
12. Skachkov, Yu.B. (2011), *Sovremennaya izmenchivost klimata Yakutii* [Modern climate variability in Yakutia], *Ninth Siberian meeting on climate and environmental monitoring: Materials of the Russian. conf*, Agraf–Press, Tomsk, Russia. pp. 66–68.
13. Sherstyukov, A.B. (2009), *Izmeneniya klimata i ikh posledstviya v zone mnogoletney merzloty Rossii* [Climate change and its consequences in the permafrost zone of Russia], GU "VNIIGMI–MTsD", Obninsk, Russia.
14. Shiklomanov, I.A., Georgiyevskiy, V.Yu. (2007), *Izmeneniye stoka rek Rossii pri global'nom potepnenii klimata. Trudy VI Vsesoyuznogo gidrologicheskogo s"yezda. Sektsiya 3 «Vodnyy balans, resursy poverkhnostnykh i podzemnykh vod, gidrologicheskiye posledstviya khozyaystvennoy deyatel'nosti i izmeneniy klimata: uyazvимость i adaptatsiya sotsial'no-ekonomicheskoy sfery»*, *Meteorological Agency of Roshydromet*, pp. 159–163 [In Russian].
15. Lobanov, V.A., Goroshkova, N.I. (2019), *Kharakteristiki ledovogo rezhima rek Respubliki Sakha (Yakutiya) i ikh klimaticheskkiye izmeneniya* [Characteristics of the ice regime of the rivers of the Republic of Sakha (Yakutia) and their climatic changes], *Scientific notes of the Russian State Humanitarian University*, no. 55, pp. 86–98.
16. Zaks, L. (1976), *Statisticheskoe otcenivanie. Statistical Evaluation*, Statistica, Moscow, Russia [In Russian].
17. *Rekomendatsii po statisticheskim metodam analiza odnorodnosti prostranstvenno-vremennykh kolebaniy rechnogo stoka* (1984) [Recommendations on statistical methods for analyzing the homogeneity of spatial and temporal fluctuations in river runoff], *Gidrometeoizdat*, Leningrad, Russia.
18. Malinin, V.N. (2008), *Statisticheskyye metody analiza gidrometeorologicheskoy informatsii* [Statistical methods for the analysis of hydrometeorological information], RSHU, St-Petersburg, Russia.

## Гидрология

Лобанов В.А., Григорьева А.А.

19. Lobanov, V.A. (2016), *Leksii po klimatologii. Chastj 2 Dinamika klimata. Kn.1. V 2 kn.* [Lectures on climatology. Part 2 Climate dynamics. Book 1. In 2 books], RGGMU, St-Petersburg, Russia.
20. Lobanov, V.A. (2018), *Leksii po klimatologii. Chastj 2 Dinamika klimata. Kn.1. V 2 kn.* [Lectures on climatology. Part 2 Climate dynamics. Book 2. In 2 books], RGGMU, St.-Petersburg, Russia.
21. Shukri, O.A.A., Lobanov, V.A., Khamid, M.S. (2018), *Sovremennyyi i budushiy klimat Araviyskogo poluostrova* [The current and future climate of the Arabian Peninsula], RSHU, St.-Petersburg, Russia.
22. Lobanov V.A., Toshchakova G.G. (2013), *Proyavleniye sovremennykh izmeneniy klimata na territorii Kostromskoy oblasti. Monografiya* [The manifestation of modern climate change in the Kostroma region. Monograph], FSBI "Kostroma Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring", Kostroma, Russia.
23. Draper, N., Smith, G. (1973), *Prikladnoy regressionnyy analiz* [Applied regression analysis], Statistics, Moscow, Russia.
24. Lobanov, V.A., Grigorjeva, A.A., Goroshkova, N.I. (2021), *Impact of climate change on different types of cryosphere in the Republic of Sakha (Yakutia)*, PEEH Newsletter, Helsinki, June 2021, pp. 20–21, available at: <https://peehq.home.blog/2021/06/14/impact-of-climate-change-on-different-types-of-cryosphere-in-the-republic-of-sakha-yakutia/>.
25. Svod pravil po proyektirovaniyu i stroitel'stvu. Opredeleniye osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik. SP 33–101–2003 (2004) [A set of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics], Gosstroy Rossii, Moscow, Russia.

Статья поступила в редакцию: 22.08.2022; одобрена после рецензирования: 18.11.2022; принята к опубликованию: 06.03.2023.

The article was submitted: 22 August 2022; approved after review: 18 November 2022; accepted for publication: 6 March 2023.

## Информация об авторах

## Information about the authors

**Владимир Алексеевич Лобанов**

доктор технических наук, профессор кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета; 195196, Россия, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, д. 98

**Vladimir A. Lobanov**

Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Meteorology, Climatology and Atmospheric Protection, Russian State Hydrometeorological University; 98, Malookhtinsky prospekt, St. Petersburg, 195196, Russia

e-mail: lobanov@EL6309.spb.edu

**Алёна Андреевна Григорьева**

старший инженер Якутского Управления гидрометеорологической службы, аспирант Российского государственного гидрометеорологического университета; 677010, Россия, г. Якутск, ул. Якова Потапова, д. 8

**Alena A. Grigorieva**

Senior Engineer, Yakutsk Department of Hydrometeorological Service; Postgraduate Student, Russian State Hydrometeorological University; 8, Yakova Potapova st., Yakutsk, 677010, Russia

e-mail: alngrgrva@mail.ru

**Вклад авторов**

Лобанов В. А. – идея, написание статьи, научное редактирование текста.

Григорьева А.А. – сбор материала, обработка материала, написание статьи, редактирование карт.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Contribution of the authors**

Vladimir A. Lobanov – the idea; writing the article; scientific editing of the text.

Alena A. Grigorieva – collecting of materials; data processing; writing of the article; maps editing

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.