

Гидрологические исследования

УДК 556.535.3

В.Г. Калинин, В.В. Чичагов, Д.А. Гырдымов

МНОГОЛЕТНИЕ КОЛЕБАНИЯ ГОДОВОГО СТОКА РЕК ВОДОСБОРА ВЕРХНЕЙ И СРЕДНЕЙ КАМЫ

Проведено исследование многолетней изменчивости годового стока рек, расположенных в разных частях водосбора Верхней и Средней Камы, с наиболее продолжительными периодами наблюдений. Представленные регрессионные модели с линейным трендом свидетельствуют о невысоком их соответствии реальным данным. На основе предложенного методологического подхода ряды наблюдений протестированы с использованием модели двух последовательных повторных выборок. Момент разладки рядов среднегодовых расходов воды определен на основе разностно-интегральных кривых. Отклонение гипотез случайности и однородности для всего периода наблюдений подтверждает наличие статистически значимых изменений в рядах наблюдений, при этом для периода 1978–2021 гг. отмечаются тенденции увеличения годового стока рек в среднем на 19,6 % по сравнению с 1936–1977 гг.

Ключевые слова: годовой сток, многолетняя изменчивость, изменения климата, проверка статистических гипотез.

DOI: 10.35634/2412-9518-2023-33-4-456-466

Исследование многолетних колебаний стока рек в условиях климатических изменений, начавшихся по разным оценкам [1–3] в середине 1970-х годов, крайне важно для получения надежных гидрологических характеристик. Многочисленные работы [4–15] по анализу многолетних колебаний речного стока вплоть до последней четверти XX века посвящены развитию методологических подходов исследования фаз водности, цикличности, синхронности и синфазности колебаний, выявлению связи с антропогенными, климатическими и космо-геофизическими факторами.

Одной из первых работ (1898 г.) по исследованию многолетних колебаний стока рек Европейской части России – является исследование Е.А. Гейнца [16], в которой выявлено чередование групп маловодных и многоводных лет. Позднее (1906–1933 гг.) в работах Е.В. Оппокова [12–14] сделан вывод о связи колебаний стока с климатическими характеристиками, цикличности колебаний стока рек и стационарности его среднемноголетних величин.

Д.Л. Соколовским [17] применены методы математической статистики для анализа рядов максимального стока, в том числе выявлена закономерность снижения коэффициентов вариации по длине водотоков к устьевым участкам. Анализ модульных коэффициентов стока р. Камы и рек бассейнов Волги, Урала, Дона, Иртыша и Тобола позволил Б.Д. Зайкову [18; 19] выделить многоводный (1920–1929 гг.) и маловодный (1930–1939 гг.) периоды.

П.С. Кузиным [20] на основе разностно-интегральных кривых годового стока определена продолжительность фаз различной водности для 42 наиболее крупных рек СССР. Для большинства рек выделены фазы различной водности продолжительностью 6–8, реже 11–15 лет. К.П. Воскресенским [8] выявлены синфазность и отсутствие синхронности колебаний годового стока рек по одному широтному профилю от Балтийского побережья до Восточного Урала. Им отмечено, что границы районов синхронных и синфазных колебаний подвержены ежегодным изменениям.

Пространственно-временные колебания стока рек СССР подробно рассмотрены А.В. Рождественским, В.А. Лобановым и А.Г. Лобановой [21]. На основе применения пространственно-корреляционных функций и критериев однородности установлено, что за период с начала наблюдений по 1975 г. факторы формирования и годовой сток рек стационарны.

Более поздние исследования (И.А. Шикломанов [22], С.Г. Добровольский [23], М.В. Болгов [24; 25], В.Ю. Георгиевский [26; 27], Н.Л. Фролова [28; 29], А.Н. Гельфан [30], Ю.Г. Мотовилов [31], А.Г. Георгиади [32] и др.) при анализе многолетних колебаний рядов, включающих наблюдения после 1970-х годов, свидетельствуют о нарушении стационарности как климатических характеристик, так и речного стока.

В настоящее время для анализа многолетней изменчивости речного стока используется ряд подходов, основанных на оценке статистической значимости линейного тренда, построении разностно-интегральных кривых и выявлении цикличности колебаний, применении статистических критериев оценки однородности. При этом в практике гидрологических расчетов условно принимают допущение о случайном характере величин стока. Кроме того, момент начала выраженных изменений (момент разладки) стока рек определяется на основе анализа данных о температуре воздуха, количестве осадков и типе атмосферной циркуляции [2; 26; 28], а не путем статистической обработки рядов наблюдений за речным стоком. В свою очередь, репрезентативность периода наблюдений годового стока в соответствии с [33] определяется величиной средней квадратической погрешности расчетного значения.

Целью настоящей работы является анализ многолетних колебаний годового стока рек водосбора Верхней и Средней Камы на основе методологического подхода [34], суть которого заключается в последовательном тестировании рядов и их отдельных частей с использованием модели двух последовательных повторных выборок.

Материалы и методы исследования

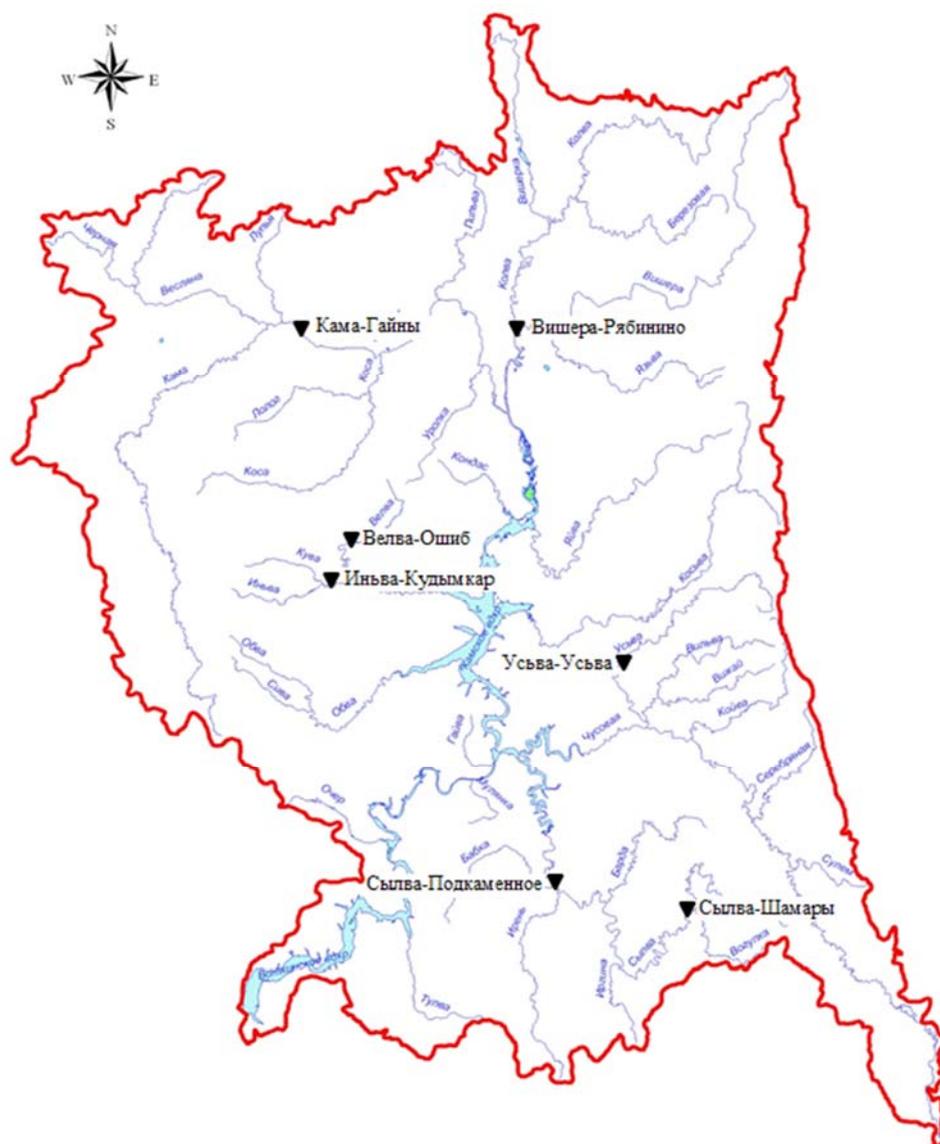


Рис. 1. Местоположение гидрологических постов на реках водосбора Верхней и Средней Камы

Для анализа многолетней изменчивости речного стока использованы данные среднегодовых расходов воды по семи гидрологическим постам (г/п), расположенным в разных частях водосбора Верхней и Средней Камы (рис. 1) с наиболее продолжительными периодами наблюдений: Кама-Гайны (1931–2021 гг.), Вишера-Рябинино (1929–2021 гг.), Велва-Ошиб (1933–2022 гг.), Иньва-Кудымкар (1936–2022 гг.), Усьва-Усьва (1931–2021 гг.), Сылва-Подкаменное (1936–2021 гг.) и Сылва-Шамары (1938–2021 гг.). Для совместного анализа выбран единый период 1936–2021 гг.

Водосбор Верхней и Средней Камы (рис. 1) расположен на северо-востоке Европейской части Российской Федерации, его площадь составляет 184240 км² [35]. Западная часть водосбора расположена на Русской равнине, восточная – в предгорьях и на западном склоне Уральских гор. В северной части водораздел проходит по Северным Увалам. На востоке граница водораздела проходит по горным хребтам Урала – границе Европы и Азии. В пределах Среднего Урала Уральский хребет, по существу, теряет свое водораздельное значение. В южной части водораздел проходит по границе между бассейнами рек Камы и Белой. Западная граница проходит сначала по Оханской возвышенности, затем по Вятско-Пермским увалам и достигает Верхне-Вятской возвышенности [36].

Анализ многолетних колебаний речного стока выполнен на основе методологического подхода [34], включающего в себя следующую последовательность действий:

1. Оценивание линейных трендов многолетних колебаний годового стока на основе регрессионной модели вида:

$$Q_t = at + b + \varepsilon_t, \quad t = T_1, \dots, T_2, \quad (1)$$

где Q_t – среднегодовой расход воды в t -й год, м³/с; T_1, T_2 – начало и конец периода наблюдений, год; a и b – параметры модели, ε_t – случайная ошибка модели.

2. Выявление момента начала выраженных изменений (момента разладки временного ряда) с использованием методов сглаживания рядов наблюдений скользящим средним по 3-, 5-, 7-, 9-, 11-, 13-, 15-летним периодам и построения разностно-интегральных кривых, представляющих собой нарастающую сумму отклонений модульных коэффициентов от среднемноголетней величины.

3. Проверка гипотезы случайности рядов наблюдений и их отдельных частей для оценки возможности описания исходных данных с помощью модели двух последовательных повторных выборок. Т. е. можно ли считать, что данные получены в ходе независимых наблюдений одной и той же случайной величины. Для этого применен критерий инверсий, обладающий наибольшей мощностью при обнаружении монотонного тренда [37] по сравнению с другими критериями.

4. Тестирование рядов годового стока и их частей на нормальность с помощью критериев Шапиро-Уилка и Жарка-Бера наиболее предпочтительных при небольших объемах выборок [38].

5. Оценка принадлежности рядов наблюдений к единой статистической совокупности с помощью параметрических и непараметрических критериев однородности: Стьюдента, Фишера, Левена и Брауна-Форсайта, Вальда-Вольфовица, Колмогорова-Смирнова и Манна-Уитни.

Результаты и их обсуждение

Анализ хронологических графиков многолетних колебаний годового стока рек показал, что в рядах наблюдений выделяются группы лет 1975–1995 гг. и 2011–2021 гг., для которых характерно увеличение максимумов и амплитуды колебаний. В эти периоды на территории водосбора Верхней и Средней Камы отмечены экстремально высокие значения расходов воды весеннего половодья 1979, 1990, 1991, 2016 и 2020 гг., повлекшие затопления населенных пунктов, дорог и мостовых переходов. Следует отметить, что в целом ряды среднегодовых расходов воды за многолетний период синхронны (коэффициенты парной корреляции $r > 0,5$).

Для всех г/п построены регрессионные модели с линейным трендом вида (1) за весь период наблюдений (1936–2021 гг.). Модель линейного тренда позволяет объяснить характер изменений годового стока, выявить тенденции многолетней изменчивости. Построенные модели для шести г/п оказались статистически значимыми с реальными уровнями значимости (p -значения) не более 0,04, за исключением г/п Велва-Ошиб, для которого p -значение составило 0,24 (табл. 1).

Низкие значения коэффициентов детерминации построенных линейных моделей тренда свидетельствуют о невысоком соответствии этих моделей реальным данным. Поэтому предлагается другое объяснение происходящих изменений с помощью модели двух последовательных повторных выбо-

рок. Одну из выборок образуют элементы ряда с начала наблюдений до момента разладки, а другую выборку – оставшаяся часть ряда. Поведение величины стока в этих выборках описывается разными законами распределения, что проявляется, в частности, в изменении таких его характеристик, как среднее и дисперсия.

Таблица 1

Характеристика регрессионных моделей с линейным трендом вида (1) за весь период наблюдений (1936–2021 гг.)

Наименование г/п	Оценка тренда модели (1)	Коэффициент детерминации, R ²	Уровень значимости (p-значение)
Кама-Гайны	$Q = 0,6405 T - 1032$	0,12	0,00
Вишера-Рябинино	$Q = 1,6392 T - 2720$	0,20	0,00
Иньва-Кудымкар	$Q = 0,0721 T - 129$	0,26	0,00
Велва-Ошиб	$Q = 0,0089 T - 11,3$	0,02	0,24
Усьва-Усьва	$Q = 0,099 T - 162$	0,10	0,00
Сылва-Шамары	$Q = 0,1373 T - 239$	0,17	0,00
Сылва-Подкаменное	$Q = 0,3198 T - 479$	0,05	0,04

Для оценки возможности выявления момента начала выраженных изменений многолетних колебаний годового стока выполнено их осреднение по 3-, 5-, 7-, 9-, 11- и 15-летним периодам. В последние десятилетия отчетливо прослеживается увеличение годового стока, однако выявить момент начала выраженных изменений не представляется возможным. В то же время на разностно-интегральных кривых годового стока момент начала выраженных изменений выделяется более четко и соответствует смене маловодной фазы водности на многоводную (рис. 2). Точка минимума приходится в среднем для всех г/п на 1977 г., при этом статистические характеристики (среднее, коэффициенты вариации и асимметрии) выделенных фаз водности значительно отличаются. Для г/п Сылва-Шамары и Сылва-Подкаменное, расположенных на юго-востоке водосбора, смена маловодной фазы на многоводную приходится на 1989 и 1982 гг. соответственно. Затяжной характер маловодной фазы для р. Сылвы может быть обусловлен регулирующим влиянием карста и более продолжительным периодом пополнения запасов подземных вод [39].

Исходя из этого, можно предположить, что ряды наблюдений за периоды до и после 1977 г. принадлежат к разным статистическим совокупностям. Поэтому последующий статистический анализ рядов годового стока выполнен не только для периода 1936–2021 гг. (86 лет), но и для двух его частей: 1936–1977 гг. (42 года) и 1978–2021 гг. (44 года).

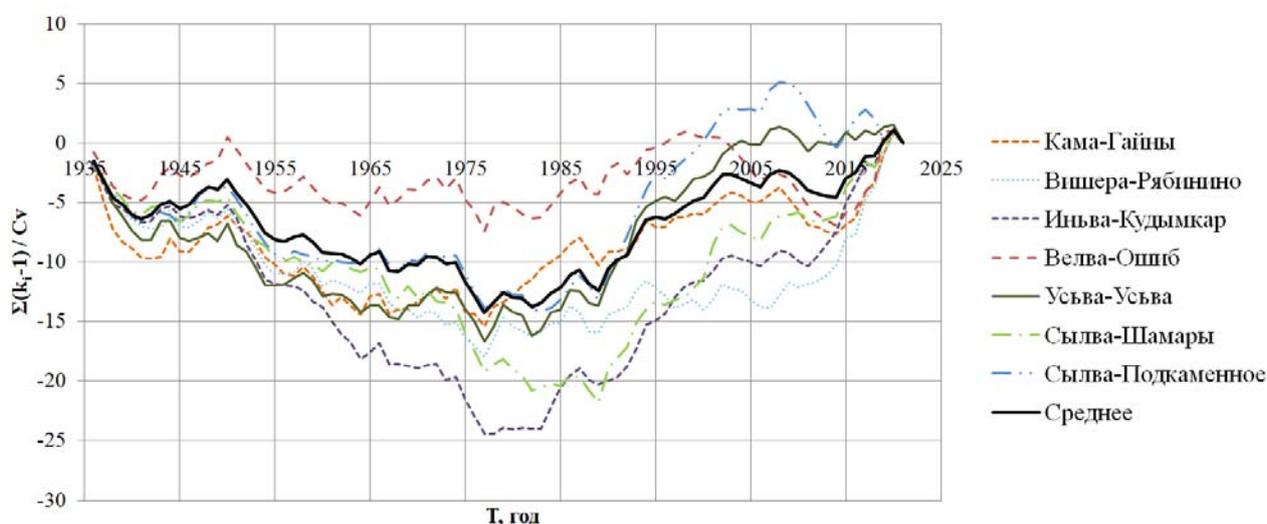


Рис. 2. Разностно-интегральные кривые годового стока рек водосбора Верхней и Средней Камы

По каждому г/п были построены регрессионные модели с линейным трендом вида (1) для периодов наблюдений 1936–1977 гг. и 1978–2021 гг., которые оказались статистически незначимыми с p -значениями от 0,11 до 0,91. Это говорит о непригодности регрессионной модели с линейным трендом для описания имеющихся данных на всем временном промежутке 1936–2021 гг. Оценка возможности использования для этой цели модели двух последовательных повторных выборок была выполнена на основе критерия инверсий (табл. 2).

По данным наблюдений за период 1936–2021 гг. гипотеза случайности при p -значении более 0,05 может быть принята только для г/п Велва-Ошиб 1936–2021 гг. Отклонение гипотезы случайности для оставшихся шести г/п свидетельствует о наличии значимых изменений годового стока рек за весь период наблюдений. В то же время для периодов 1936–1977 гг. и 1978–2021 гг. гипотеза случайности может быть принята для этих г/п на уровне значимости более 0,05, т. е. статистически значимых изменений внутри этих периодов не отмечается. Эти выводы подтверждают целесообразность использования модели двух последовательных повторных выборок.

Таблица 2

**Реальные уровни значимости критерия инверсий рядов годового стока
за разные периоды наблюдений**

Река-пост	Периоды наблюдений, гг.		
	1936–2021	1936–1977	1978–2021
Кама-Гайны	0,01	0,33	0,33
Вишера-Рябинино	0,00	0,62	0,18
Иньва-Кудымкар	0,00	0,90	0,39
Велва-Ошиб	0,40	0,76	0,20
Усьва-Усьва	0,01	0,24	0,08
Сылва-Шамары	0,00	0,97	0,31
Сылва-Подкаменное	0,03	0,48	0,10

Таблица 3

Результаты проверки соответствия рядов годового стока нормальному закону распределения

Река-пост	Период, гг.	Реальные уровни значимости по критериям		Реальные уровни значимости логарифмов по критериям	
		Шапиро-Уилка	Жарка-Бера	Шапиро-Уилка	Жарка-Бера
Кама-Гайны	1936–1977	0,73	0,66	<i>0,04</i>	<i>0,03</i>
	1978–2021	0,83	0,26	0,71	0,18
Вишера-Рябинино	1936–1977	0,45	0,37	0,40	0,30
	1978–2021	0,27	0,35	0,69	0,87
Иньва-Кудымкар	1936–1977	0,28	0,29	0,16	0,07
	1978–2021	0,66	0,87	0,75	0,91
Велва-Ошиб	1936–1977	0,37	0,39	0,31	0,38
	1978–2021	<i>0,00</i>	<i>0,00</i>	0,29	0,60
Усьва-Усьва	1936–1977	0,59	0,60	0,40	0,44
	1978–2021	0,93	0,99	0,18	0,56
Сылва-Шамары	1936–1977	0,60	0,71	0,26	0,23
	1978–2021	0,19	0,17	0,78	0,71
Сылва-Подкаменное	1936–1977	0,66	0,52	0,40	0,30
	1978–2021	0,37	0,43	0,14	0,07

Примечание: p -значения менее 0,05 выделены курсивом.

Следующим шагом выполнена проверка однородности выборок, соответствующих периодам наблюдений 1936–1977 гг. и 1978–2021 гг., с помощью параметрических и непараметрических критериев Стьюдента, Фишера, Левена и Брауна-Форсайта, Вальда-Вольфовица, Колмогорова-Смирнова и Манна-Уитни. Применение параметрических критериев однородности (Стьюдента и Фишера) обу-

славливает необходимость проверки рядов наблюдений на соответствие нормальному закону распределения. Гипотеза нормальности среднегодовых расходов воды принимается для всех рассматриваемых периодов и для всех г/п за исключением г/п Велва-Ошиб, для которого нормальному распределению соответствуют логарифмы наблюдаемых характеристик (табл. 3).

Гипотеза однородности рядов среднегодовых расходов воды за весь период наблюдений отклоняется для шести г/п, за исключением г/п Велва-Ошиб (табл. 4). При этом для периода 1978–2021 гг. наблюдается увеличение годового стока, максимальное для г/п Иньва-Кудымкар (35,0 %), минимальное по г/п Велва-Ошиб (9,88 %). Изменение среднего уровня годового стока в соответствии с моделью двух последовательных повторных выборок показано на рис. 3.

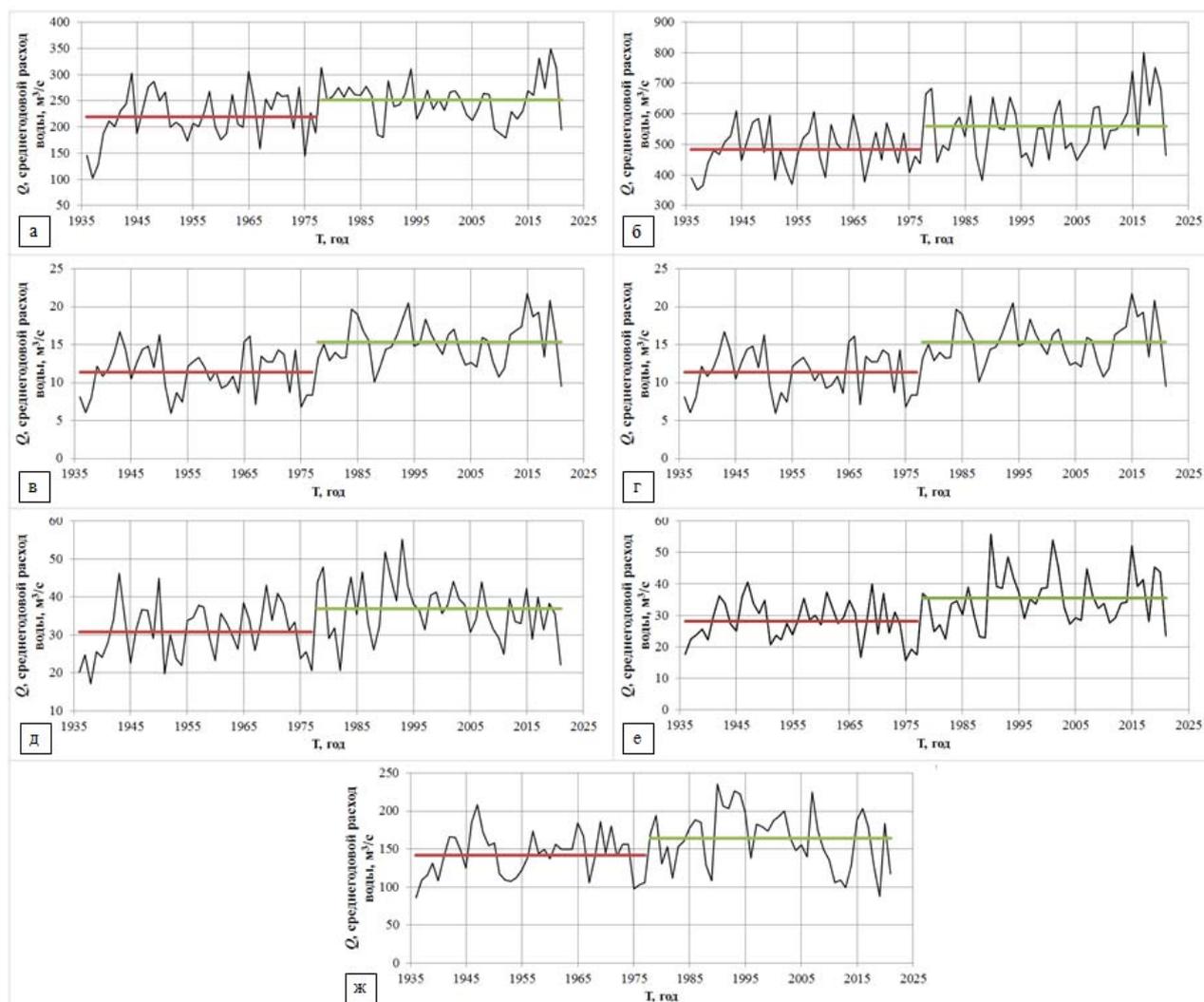


Рис. 3. Изменение среднемноголетней величины годового стока для периодов 1936–1977 гг. и 1978–2021 гг. по г/п: а – Кама-Гайны; б – Вишера-Рябино; в – Иньва-Кудымкар; г – Велва-Ошиб; д – Усьва-Усьва; е – Сылва-Шамары; ж – Сылва-Подкаменное

Заключение

Выполнен анализ многолетних колебаний годового стока рек территории водосбора Верхней и Средней Камы для г/п с наиболее продолжительными рядами наблюдений 1936–2021 гг. Применение разработанного методологического подхода, суть которого заключается в последовательном тестировании рядов и их отдельных частей с использованием модели двух последовательных повторных выборок, дало возможность определить следующее:

Таблица 4

**Характеристика реальных уровней значимости критериев однородности за 1936–2021 гг.
и изменение среднегодового стока рек между периодами наблюдений
1936–1977 гг. и 1978–2021 гг.**

Река-пост	Параметрические критерии однородности			Непараметрические критерии однородности					Средний расход воды, м ³ /с за периоды		Разница между периодами, %
	Стьюдента	Фишера	Тест Левена	Тест Браун-Форсайта	Вальда-Вольфовица	Колмогорова-Смирнова	Манна-Уитни	1936–1977 гг.	1978–2021 гг.		
Кама-Гайны	<i>0,00</i>	0,25	0,13	0,16	<i>0,03</i>	<i><0,005</i>	<i>0,00</i>	219	251	14,9	
Вишера-Рябино	<i>0,00</i>	0,07	0,08	0,10	0,67	<i><0,005</i>	<i>0,00</i>	483	560	15,8	
Иньва-Кудымкар	<i>0,00</i>	0,92	0,63	0,69	0,08	<i><0,001</i>	<i>0,00</i>	11,3	15,3	35,0	
Велва-Ошиб	0,09	0,52	0,25	0,27	0,39	<i>>0,100</i>	0,16	5,95	6,54	9,88	
Усьва-Усьва	<i>0,00</i>	0,83	0,90	0,92	0,38	<i><0,010</i>	<i>0,00</i>	30,8	36,8	19,7	
Сылва-Шамары	<i>0,00</i>	0,11	0,18	0,20	<i>0,00</i>	<i><0,005</i>	<i>0,00</i>	28,1	35,4	26,1	
Сылва-Подкаменное	<i>0,00</i>	0,07	<i>0,03</i>	0,05	0,67	<i><0,005</i>	<i>0,00</i>	142	164	15,9	

Примечание. Значения уровней значимости менее 0,05 выделены курсивом.

– с помощью метода разностно-интегральных кривых выявлен момент начала выраженных изменений (момент разладки) многолетних колебаний годового стока – 1977 г. для всех г/п;

– посредством критерия инверсий установлено наличие значимых изменений годового стока рек за весь период наблюдений для шести из семи г/п.; в то же время для периодов 1936–1977 гг. и 1978–2021 гг. статистически значимых изменений не отмечается;

– в результате проверки гипотезы однородности данных, соответствующих периодам 1936–1977 гг. и 1978–2021 гг., подтверждено наличие статистически значимых изменений, происходящих в рядах наблюдений для всех г/п за исключением г/п Велва-Ошиб;

– для периода 1978–2021 гг. характерно увеличение годового стока по сравнению с предыдущим периодом от 9,88 % до 35,0 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / Гидрометцентр России. URL: <https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/klim-riski-2017.pdf> (дата обращения: 08.10.2023).
2. Магрицкий Д.В. Климатические обусловленные и антропогенные изменения стока воды основных рек Российской Федерации в их низовьях и морских устьях // Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России. Материалы Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2018. С. 285–294.
3. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб.: Научно-технологические институты, 2022. 124 с.
4. Агарков С.Г., Дружинин И.П., Коноваленко З.П. Многолетние колебания рек в Западной Сибири. Циклическая структура многолетних колебаний годового стока рек Казахстана и Средней Азии // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1973. № 6. С. 70–75.
5. Андреев В.Г. Гидрологические расчеты при проектировании малых и средних гидроэлектростанций. Л.: Гидрометеиздат, 1957. 524 с.
6. Андреев В.Г. Циклические колебания годового стока, их изменения по территории и учет при расчетах стока // Труды III Всесоюз. гидрологического съезда. Л.: Гидрометеиздат, 1959. Т. 2. С. 326–335.
7. Афанасьев А.Н. Колебания гидрометеорологического режима на территории СССР. М.: изд. Наука, 1967. 230 с.
8. Воскресенский К.П. Норма и изменчивость годового стока рек Советского Союза. Л.: Гидрометеиздат, 1962. 552 с.
9. Дружинин И.П., Коноваленко З.П., Кукушкина В.П., Хамьянова Н.В. Речной сток и геофизические процессы / Под ред. Золотарева Т.Л. М.: Наука, 1966. 295 с.

10. Кочукова Т.Н. Колебания годового стока рек СССР // Труды ГГИ. Л.: Гидрометеиздат, 1955. Вып. 50. С. 101–114.
11. Кузин П.С. Многолетние колебания водоносности рек СССР // Труды ГГИ. Л.: Гидрометеиздат, 1953. Вып. 38. С. 188–215.
12. Оппоков Е.В. Колебания водоносности рек в историческое время // Исследования рек СССР. Л.: Изд. ГГИ, 1933. Вып. 4. С. 109–128.
13. Оппоков Е.В. Многолетние колебания стока на больших речных бассейнах в связи с колебаниями метеорологических элементов // Главное управление путей сообщения и публичных зданий. СПб.: МПВ, 1906. Кн. 8. 192 с.
14. Оппоков Е.В. О водоносности рек в связи с атмосферными осадками и другими факторами стока // Записки Русского географического общества по общей географии. СПб.: Акад. наук, 1911. С. 234–286.
15. Рождественский А.В., Лобанов В.А., Лобанова А.Г. Пространственно-временные колебания стока рек СССР / Под ред. Рождественского А.В. Л.: Гос. гидрол. ин-т, 1988. 370 с.
16. Гейнц Е.А. Об осадках, количестве снега и об испарении на речных бассейнах Европейской России. СПб.: Имп. Акад. наук, 1898. 54 с.
17. Соколовский Д.Л. Применение кривых распределения в установлении вероятных колебаний годового стока рек Европейской части СССР. Л.: Гостехиздат, 1930. 76 с.
18. Зайков Б.Д. Многолетние колебания стока Верхней Камы // Труды по комплексному изучению Каспийского моря. Л.: Акад. наук СССР, 1940. 56 с.
19. Зайков Б.Д. Водный баланс Каспийского моря в связи с причинами понижения его уровня. Л.: Гидрометеол. изд-во, 1946. 49 с.
20. Кузин П.С. Многолетние колебания водоносности рек СССР // Труды ГГИ. Л.: Гидрометеиздат, 1953. Вып. 38. С. 188–215.
21. Давыдов Л.К. Водоносность рек СССР, ее колебания и влияние на нее физико-географических факторов. Л.: Изд-во и 2-я типолитограф. Гидрометеиздата, 1947. 162 с.
22. Шикломанов И.А. и др. Влияние изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек России // Гидрологические последствия изменения климата. Новосибирск, 2007. С. 143–151.
23. Добровольский С.Г. Глобальные изменения речного стока. М.: ГЕОС, 2011. 660 с.
24. Болгов М.В., Трубецкова М.Д., Филимонова М.К., Филиппова И.А. Современные изменения климатических характеристик и вероятностная оценка изменений минимального стока в бассейне реки Волги // Водное хозяйство России. 2014. № 3. С. 83–99.
25. Болгов М.В., Филиппова И.А. Об определении расчетных характеристик стока в условиях нарушения однородности временных рядов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2022. № 5. С. 7–17.
26. Георгиевский В.Ю., Шалыгин А.Л. Гидрологический режим и водные ресурсы // Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет, 2012. С. 53–86.
27. Георгиевский М.В., Голованов О.Ф. Прогнозные оценки изменений водных ресурсов крупнейших рек Российской Федерации на основе данных по речному стоку проекта CMIP5 // Вестн. СПбГУ. Науки о Земле. 2019. Т. 64., № 2. С. 206–218.
28. Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Харламов М.А., Самсонов Т.Е., Энтин А.Л., Лурье И.К. Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек Европейской территории России // Геодезия и картография. 2020. Т. 81, № 7. С. 14–26.
29. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонов А.А., Шевченко А.И. Сток рек России при происходящих и прогнозируемых изменениях климата: обзор публикаций. 1. Оценка изменений водного режима рек России по данным наблюдений // Водные ресурсы. 2022. Т. 49, № 3. С. 251–269.
30. Гельфан А.Н., Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьев В.Ю., Мотовилов Ю.Г., Гусев Е.М. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Фундаментальная и прикладная климатология. М.: 2022. Т. 7, № 1. С. 36–79.
31. Гельфан А.Н., Калугин А.С., Мотовилов Ю.Г. Влияние изменения климата на годовой и максимальный сток рек России: оценка и прогноз // Водные ресурсы. М.: 2022. Т. 45, № 3. С. 223–234.
32. Георгиади А.Г., Милукова И.П., Кашутина Е.А. Современные и сценарные изменения речного стока в бассейне Дона // Вод. ресурсы. 2020. Т. 47. № 6. С. 651–662.
33. СП «Определение основных расчетных гидрологических характеристик» от 11.09.2023 № 529.1325800 // Приказ Минстроя России. 11.09.2023 г. № 654.
34. Калинин В.Г., Чичагов В.В. Изменения сроков ледообразования на реках и критерии оценки их статистической значимости // Метеорология и гидрология. 2019. № 9. С. 52–64.
35. Калинин В.Г., Пьянков С.В. Применение геоинформационных технологий в гидрологических исследованиях. Пермь: Алекс-Пресс, 2011. 217 с.
36. Гвоздецкий Н.А., Жучкова В.К., Звонкова Т.В. Физико-географическое районирование СССР: Характеристика регион. единиц / Под ред. проф. Н. А. Гвоздецкого. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1968. 576 с.
37. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 540 с.

38. Субботина А.В., Гржибовский А.М. Описательная статистика и проверка нормальности распределения количественных данных // Экология человека. 2014. №2. С. 51–56.
39. Горбунова К.А. Особенности гипсового карста: Путеводитель по Кишертско-Суксунскому карстовому району. Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та, 1965. 120 с.

Поступила в редакцию 03.12.2023

Калинин Виталий Германович, доктор географических наук, доцент,
заведующий кафедрой гидрологии и охраны водных ресурсов
E-mail: vgkalinin@gmail.com

Чичагов Владимир Витальевич, кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры высшей математики
E-mail: chvv50@mail.ru

Гырдымов Дмитрий Андреевич, ассистент кафедры гидрологии и охраны водных ресурсов
E-mail: gyrzymov_da@vk.com

ФГАОУ ВО «Пермский государственный национальный исследовательский университет»
614990, Россия, г. Пермь, ул. Букирева, 15

V.G. Kalinin, V.V. Chichagov, D.A. Gyrzymov

ANNUAL RUNOFF LONG-TERM FLUCTUATIONS IN THE RIVERS OF THE KAMA RESERVOIR CATCHMENT

DOI: 10.35634/2412-9518-2023-33-4-456-466

The long-term variability of the annual runoff of rivers located in different parts of the Upper and Middle Kama catchment, with the longest observation periods (1936–2021) was carried out. The presented regression models with a linear trend indicate their low correspondence to real data. The observation series were tested using a model of two consecutive repeated samples based on the proposed methodological approach. The moment of change in the series of average annual water flows was determined on the basis of difference-integral curves. The rejection of the randomness and homogeneity hypotheses for the entire observation period confirms the presence of statistically significant changes. The annual river flow has increased for 1978–2021 compared to 1936–1977 on average by 19.6%.

Keywords: annual runoff, long-term variability, climate change, statistical hypothesis testing.

REFERENCES

1. *Doklad o klimaticheskikh riskakh na territorii Rossiyskoy Federatsii, Sayt Gidromettsentra Rossii* [Report on climate risks in the territory of the Russian Federation, Website of the Hydrometeorological Center of Russia], Available at: <https://meteoinfo.ru/images/media/books-docs/klim-riski-2017.pdf> (accessed: 08.10.2023) (in Russ.).
2. Magritskiy D.V. *Klimaticheskie obuslovlennyye i antropogennyye izmeneniya stoka vody osnovnykh rek Rossiyskoy Federatsii v ikh nizov'yakh i morskikh ust'yakh* [Climatic conditioned and anthropogenic changes in the water flow of the main rivers of the Russian Federation in their lower reaches and sea mouths], in *Mater. Vseros. nauch.-prakt. konf. "Sovremennyye tendentsii i perspektivy razvitiya gidrometeorologii v Rossii"*. Irkutsk: Irkut. Gos. Univ., 2018, pp. 285-294 (in Russ.).
3. *Tretiy otsenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii. Obshchee rezyume* [The third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation. General summary], St. Petersburg: Naukoemkie tekhnologii Publ., 2022, 124 p. (in Russ.).
4. Agarkov S.G., Druzhinin I.P., Konovalenko Z.P. *Mnogoletnie kolebaniya rek v Zapadnoy Sibiri. Tsiklicheskaya struktura mnogoletnikh kolebaniy godovogo stoka rek Kazakhstana i Sredney Azii* [Long-term fluctuations of rivers in Western Siberia. The cyclic structure of long-term fluctuations in the annual flow of the rivers of Kazakhstan and Central Asia], in *Izvestiya AN SSSR. Ser. geogr.*, 1973, no. 6, pp. 70-75 (in Russ.).
5. Andreyanov V.G. *Gidrologicheskie raschety pri proektirovaniy malykh i srednikh gidroelektrostantsiy* [Hydrological calculations in the design of small and medium-sized hydroelectric power plants], Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1957, 524 p. (in Russ.).
6. Andreyanov V.G. *Tsiklicheskie kolebaniya godovogo stoka, ikh izmeneniya po territorii i uchet pri raschetakh stoka* [Cyclical fluctuations of annual runoff, their changes in the territory and accounting for runoff calculations], in *Trudy III Vsesoyuz. gidrologicheskogo s"ezda*, Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1959, vol. 2, pp. 326-335 (in Russ.).

7. Afanas'ev A.N. *Kolebaniya gidrometeorologicheskogo rezhima na territorii SSSR* [Fluctuations of the hydrometeorological regime on the territory of the USSR], Moscow: Nauka Publ., 1967, 230 p. (in Russ.).
8. Voskresenskiy K.P. *Norma i izmenchivost' godovogo stoka rek Sovetskogo Soyuz* [The norm and variability of the annual flow of rivers of the Soviet Union], Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1962, 552 p. (in Russ.).
9. Druzhinin I.P., Konovalenko Z.P., Kukushkina V.P., Xam'yanova N.V. *Rechnoy stok i geofizicheskie protsessy* [River flow and geophysical processes], Zolotareva T.L. (ed), Moscow: Nauka Publ., 1966, 295 p. (in Russ.).
10. Kochukova T.N. *Kolebaniya godovogo stoka rek SSSR* [Fluctuations in the annual flow of rivers of the USSR], in *Trudy GGI*, Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1955, iss. 50, pp. 101-114 (in Russ.).
11. Kuzin P.S. *Mноголетние колебания водоносности рек SSSR* [Long-term fluctuations in the water content of rivers of the USSR], in *Trudy GGI*, Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1953, iss. 38, pp. 188-215 (in Russ.).
12. Oppokov E.V. *Kolebaniya vodonosnosti rek v istoricheskoe vremya* [Fluctuations in the water content of rivers in historical times], in *Issledovaniya rek SSSR*, Leningrad: GGI Publ., 1933, iss. 4, pp. 109-128 (in Russ.).
13. Oppokov E.V. *Mноголетние колебания стока на бол'ших rechnykh basseynakh v svyazi s kolebaniyami meteorologicheskikh elementov*, Glavnoe upravlenie putey soobshcheniya i publichnykh zdaniy [Long-term fluctuations in runoff in large river basins due to fluctuations in meteorological elements / Main Directorate of railways and public buildings], St. Petersburg: Ministerstvo putey soobshcheniya Publ, 1906, book 8, 192 p. (in Russ.).
14. Oppokov E.V. *O vodonosnosti rek v svyazi s atmosferynymi osadkami i drugimi faktorami stoka* [On the water content of rivers in connection with atmospheric precipitation and other runoff factors], in *Zapiski Russkogo geograficheskogo obshhestva po obshhej geografii*, St. Petersburg: Akad. nauk, 1911, pp. 234-286 (in Russ.).
15. Rozhdestvenskiy A.V., Lobanov V.A., Lobanova A.G. *Prostranstvenno-vremennye kolebaniya stoka rek SSSR* [Spatial and temporal fluctuations of the flow of rivers of the USSR], Rozhdestvenskiy A.V. (ed), Leningrad: Gos. gidrol. in-t, 1988, 370 p. (in Russ.).
16. Geynts E.A. *Ob osadkakh, kolichestve snega i ob isparenii na rechnykh basseynakh Evropeyskoy Rossii* [On precipitation, the amount of snow and evaporation in the river basins of European Russia], St. Petersburg: Imp. Akad. nauk, 1898, 54 p. (in Russ.).
17. Sokolovskiy D.L. *Primenenie krivykh raspredeleniya v ustanovlenii veroyatnykh kolebaniy godovogo stoka rek Evropeyskoy chasti SSSR* [Application of distribution curves in determining probable fluctuations in the annual flow of rivers of the European part of the USSR]. Leningrad: Gostexizdat Publ., 1930, 76 p. (in Russ.).
18. Zaykov B.D. *Mноголетние колебания стока Verkhney Kamy* [Long-term fluctuations in the flow of the Upper Kama River], in *Trudy po kompleksnomu izucheniyu Kaspiyskogo morya*, Leningrad: Akad. nauk SSSR, 1940, 56 p. (in Russ.).
19. Zaykov B.D. *Vodnyy balans Kaspiyskogo morya v svyazi s prichinami ponizheniya ego urovnya* [The water balance of the Caspian Sea in connection with the causes of its level decrease], Leningrad: Gidrometeorol. izd-vo, 1946, 49 p. (in Russ.).
20. Kuzin P.S. *Mноголетние колебания водоносности рек SSSR* [Long-term fluctuations in the water content of rivers of the USSR], in *Trudy GGI*, Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1953, iss. 38, pp. 188-215 (in Russ.).
21. Davydov L.K. *Vodonosnost' rek SSSR, ee kolebaniya i vliyanie na nee fiziko-geograficheskikh faktorov* [The water content of the rivers of the USSR, its fluctuations and the influence of physical and geographical factors on it], Leningrad: Izd-vo i 2-ya tipolitogr. Gidrometeoizdata, 1947. 162 p. (in Russ.).
22. Shiklomanov I.A. i dr. *Vliyanie izmeneniy klimata na gidrologicheskii rezhim i vodnye resursy rek Rossii* [The influence of climate change on the hydrological regime and water resources of Russian rivers], in *Gidrologicheskie posledstviya izmeneniya klimata*, Novosibirsk, 2007, pp. 143-151 (in Russ.).
23. Dobrovol'skiy S.G. *Global'nye izmeneniya rechnogo stoka* [Global changes in river flow], Moscow: GEOS Publ., 2011, 660 p. (in Russ.).
24. Bolgov M.V., Trubetskova M.D., Filimonova M.K., Filippova I.A. *Sovremennye izmeneniya klimaticheskikh kharakteristik i veroyatnostnaya otsenka izmeneniy minimal'nogo stoka v basseyne reki Volgi* [Modern changes in climatic characteristics and probabilistic assessment of changes in minimum flow in the Volga River basin], in *Vodnoe khozyaystvo Rossii*, 2014, no. 3, pp. 83-99 (in Russ.).
25. Bolgov M.V., Filippova I.A. [On the determination of the calculated runoff characteristics in conditions of time series homogeneity violation], in *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management], 2022, no. 5. pp. 7-17 (in Russ.).
26. Georgievskiy V.Yu., Shalygin A.L. *Gidrologicheskii rezhim i vodnye resursy* [Hydrological regime and water resources], in *Metody otsenki posledstviy izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh system*, Moscow: Rosgidromet Publ., 2012, pp. 53-86 (in Russ.).
27. Georgievskiy M.V., Golovanov O.F. [Forecasting changes in river water resources of Russian Federation based on CMIP5 runoff data], in *Vestn. SPbGU. Nauki o Zemle*, 2019, vol. 64, no. 2, pp. 206-218 (in Russ.).
28. Frolova N.L., Kireeva M.B., Xarlamov M.A., Samsonov T.E., Entin A.L., Lure I.K. *Kartografirovanie sovremennogo sostoyaniya i transformatsii vodnogo rezhima rek Evropejskoy territorii Rossii // Geodeziya i kartografiya*. 2020. vol. 81, no. 7. pp. 14-26. (in Russ.).
29. Frolova N.L., Magriczkij D.V., Kireeva M.B., Grigorev 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], in *Vodnye resursy*, 2022, vol. 49, no. 3, pp. 251-269 (in Russ.).
30. Gelfan A.N., Frolova N.L., Magriczkij 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: diagnosis and projections], in *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, Moscow, 2022, vol. 7, no. 1, pp. 36-79 (in Russ.).
 31. Gel'fan A.N., Kalugin A.S., Motovilov Yu.G. *Vliyanie izmeneniya klimata na godovoy i maksimal'nyy stok rek Rossii: otsenka i prognoz* [Climate change impact on annual and maximum runoff of Russian rivers: diagnosis and projections], in *Vodnye resursy* [*Water Resources*], Moscow, 2022, vol. 45, no. 3, pp. 223-234 (in Russ.).
 32. Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. [Contemporary and scenario changes in river runoff in the don basin], in *Vodnye resursy* [*Water Resources*], 2020, vol. 47, no. 6, pp. 651-662 (in Russ.).
 33. *SP «Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik» ot 11.09.2023 № 529.1325800, Prikaz Ministroya Rossii* [Joint venture "Determination of basic calculated hydrological characteristics" dated 09/11/2023 No. 529.1325800 / The order of the Ministry of Construction of Russia. 09/11/2023, No. 654] (in Russ.).
 34. Kalinin V.G., Chichagov V.V. [Changes in river ice formation dates and tests for their statistical significance assessment], in *Meteorologiya i gidrologiya* [*Russian Meteorology and Hydrology*], 2019, no. 9, pp. 52-64 (in Russ.).
 35. Kalinin V.G., P'yankov S.V. *Primenenie geoinformatsionnykh tekhnologiy v gidrologicheskikh issledovaniyakh* [Application of geoinformation technologies in hydrological research], Perm: Aleks-Press Publ., 2011, 217 p. (in Russ.).
 36. Gvozdetskiy N.A., Zhuchkova V.K., Zvonkova T.V. *Fiziko-geograficheskoe rayonirovanie SSSR: Kharakteristika regionnykh edinit* [Physical and geographical zoning of the USSR: Characteristics of regional units], Gvozdetskiy N.A. (ed), Moscow: Mosk. Univ., 1968, 576 p. (in Russ.).
 37. Bendat Dzh., Pirsol A. *Prikladnoy analiz sluchaynykh dannyykh* [Applied analysis of random data], Translated from English, Moscow: Mir Publ., 1989, 540 p. (in Russ.).
 38. Subbotina A.V., Grjibovski A.M. [Descriptive statistics and normality testing for quantitative data], in *Ekologiya cheloveka*, 2014, no. 2, pp. 51-56 (in Russ.).
 39. Gorbunova K.A. *Osobennosti gipsovogo karsta: Putevoditel' po Kishertsko-Suksunskomu karstovomu rayonu* [Features of gypsum karst: A guide to the Kishertsko-Suksunsky karst area], Perm: Perm. Gos. Univ., 1965. 120 p. (in Russ.).

Received 03.12.2023

Kalinin V.G., Doctor of Geography, Associate Professor,
Head of the Department of Hydrology and water resources protection
E-mail: vgkalinin@gmail.com

Chichagov V.V., Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor
of the Department of Mathematics
E-mail: chvv50@mail.ru

Gyrdymov D.A., Assistant of the Department of Hydrology and water resources protection
E-mail: gyrdymov_da@vk.com

Perm State University
Bukireva st., 15, Perm, Russia, 614990