

ОСОБЕННОСТИ ЭКСТРЕМАЛЬНО МАЛОВОДНЫХ ЛЕТ НА РЕКАХ РУССКОЙ РАВНИНЫ В ПЕРИОД СОВРЕМЕННОГО ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛЕНИЯ

© 2024 г. А. Г. Георгиади*

Институт географии РАН, Москва, Россия

**e-mail: georgiadi@igras.ru*

Поступила в редакцию 16.10.2023 г.

После доработки 18.01.2024 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

Исследованы маловодья на реках (в годы, сток в которые был равным или меньшим 75 и 90–95% обеспеченности), наблюдавшиеся в бассейнах рек Русской равнины (Волги, Дона, Днепра, Западной Двины, Северной Двины и Урала) в XIX–XXI вв. На основе географо-статистического подхода проведен анализ экстремального маловодья для основных сезонов года (половодья, зимней и летне-осенней межени), а также года в целом. Использованы данные по 35 постам на крупных, средних и малых реках. Показано, что доля общего количества лет, в которые наблюдалось маловодье в одном или нескольких сезонах года или всего года в целом относительно всего периода наблюдений, изменялось на рассмотренных реках в диапазоне от 46 до 57%. Современное глобальное потепление приводит к существенному снижению доли маловодных лет в зимнюю и летне-осеннюю межень, а также в целом за год на всех рассмотренных реках. В то время как доля лет с низким стоком половодья на Дону, на Северной Двине и Западной Двине значительно увеличилась, на Волге и Днепре она изменилась малозаметно. В течение долговременных фаз повышенного/пониженного годового и сезонного стока на реках центральной части Русской равнины, последние из которых наблюдались в период современного глобального потепления, выявлены кардинальные различия в частоте маловодных лет. В годы, в которые происходили наиболее крупные экстремальные засухи на территории всех рассмотренных речных бассейнов, маловодье наблюдалось лишь в 1921 и 1972 гг.

Ключевые слова: маловодье на реках, период инструментальных наблюдений, глобальное потепление, долговременные фазы повышенного/пониженного стока, корреляция экстремальных засух и маловодья

DOI: 10.31857/S2587556624030062 EDN: SOINPG

ВВЕДЕНИЕ

Современное глобальное потепление, начавшееся с 1970–1980-х годов, сопровождалось повышенной температурой воздуха и, в меньшей степени, увеличенными атмосферными осадками по сравнению с предшествующим более холодным периодом, что вызвало долговременные изменения различных составляющих водного цикла, в том числе речного стока. На большинстве рек степной, лесостепной и южной и западной частей лесной зон Русской равнины в границах бассейнов Волги, Дона и Днепра в эту эпоху наблюдалась длительная фаза пониженного стока половодья и повышенного стока летне-осенней и зимней межени (Георгиади и др., 2014; Георгиевский и др.,

2014; Многолетние ..., 2021¹; Georgiadi et al., 2020; Milyukova et al., 2020). Для годового стока характер изменений был более сложен. Отметим, что на многих реках этого региона в середине 2000-х годов наметился переход к противоположной длительной фазе. В этот период в регионе также наблюдалась длительная фаза повышенных влагозапасов почв (Георгиади и др., 2021).

На фоне долговременных изменений годового и сезонного стока на реках Русской равнины формировались маловодья разной интенсивности. Они охватывали не только меженные сезоны года (летне-осенний и зимний), но также и пе-

¹ Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации: Научно-прикладной справочник / под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: ООО "РИАЛ", 2021. 190 с.

риод половодья, а также и год в целом (Georgiadi et al., 2021). Интерес к проблеме маловодий на реках в последние годы существенно повысился (Многолетние ..., 2021²; Nasrul et al., 2019). Основное внимание уделяется исследованию различных аспектов маловодья именно меженных сезонов года (Владимиров, 1976; Семенов и др., 2015³; Филиппова, 1996; Beran and Rodier, 1985), поскольку они выступают в качестве важнейшего фактора, лимитирующего водопотребление (Алексеевский, Фролова, 2011). Маловодья зачастую охватывают значительные территории, особенно в годы с экстремальными засухами. Такие засухи, формируются на обширных территориях в основном в степной, лесостепной и южной части лесной зоны Русской равнины, в других регионах мира (Георгиади и др., 2021; Золотокрылин и др., 2014; Страшная и др., 2011; Georgiadi et al., 2021; Henny et al., 2016; Kireeva et al., 2016; и др.). Наиболее экстремальные [сильные и обширные засухи согласно (Страшная и др., 2011)] из них на территории Русской равнины наблюдались в 1972, 1975, 1981, 1995, 1998, 1999 и 2010 гг., а также в 1891, 1921, 1931, 1946 гг. (Georgiadi and Borodin, 2022; Georgiadi and Kashutina, 2021). В целом географическое положение ареалов распространения экстремальных засух на Русской равнине достаточно устойчиво и привязано к бассейнам Волги, Дона, Днепра и Урала.

Основное внимание в статье уделено анализу характеристик аномально низкого маловодья (с обеспеченностью стока большей или равной 75 и 95 (90)%) годового стока и стока половодья, зимней и летне-осенней межени на наиболее крупных реках Русской равнины (Волга, Дон, Днепр, Северная Двина и Западная Двина), а также на средних и небольших реках различных природных зон, наблюдавшихся в XIX–XXI вв. Рассмотрены маловодья, охватывающие весь регион или его основные части, год в целом и его основные гидрологические сезоны. Анализируется пространственно-временная корреляция маловодий с наиболее экстремальными засухами, а также частота маловодий в период современного глобального потепления и предшествующий ему период с относительно более холодными климатическими условиями. Исследуется также корреляция долговременных фаз повышенного/

пониженного годового и сезонного стока рек с частотой экстремально маловодных лет.

МЕТОДЫ И ДАННЫЕ

Характеристика речных бассейнов. В качестве объектов исследования выбраны речные бассейны, которые охватывают практически всю территорию Русской равнины (табл. 1). Основная часть годового стока на реках формируется в период весенне-летнего половодья (Кузин, Бабкин, 1979). Для рек характерен относительно низкий сток в зимнюю и летне-осеннюю межень. В лесной зоне, а также в лесостепной зоне, особенно на западе региона, наблюдаются летние и осенние паводки, а на юго-западе также и зимние паводки.

Методы и данные. В отличие от экстремальных засух, наблюдавшихся, как правило, в летние месяцы, аномально низкое маловодье в эти годы охватывало как различные гидрологические сезоны года, так и год в целом. В качестве критериев степени экстремальности маловодья служили размеры их ареалов, охват маловодьем различных сезонов года и всего года в целом, а также степень маловодности. К экстремально маловодным относились те годы, в которые средний сезонный (за летне-осеннюю и зимнюю межень и половодье) и средний годовой сток был равен или ниже стока, соответствующего 75% и 95 (90)% обеспеченности. Границы гидрологических сезонов, которые принимались постоянными для всего периода наблюдений, были определены на основе анализа многолетних данных о средних месячных расходах воды, а также о средних многолетних данных о замерзании рек и разрушении ледового покрова. Расчет обеспеченности стока рассмотренных рек (см. табл. 1) проводился по эмпирическим кривым обеспеченности, построенным на основе многолетних рядов средних сезонных (зимних, половодных, летне-осенних) и средних годовых расходов воды рек.

Эмпирические значения обеспеченности были рассчитаны по следующей формуле:

$$Q_i = (m_i / (n + 1)) \times 100\%,$$

где Q_i — средний расход воды за сезон/год i -го года, m_i — порядковый номер расхода воды i -го года в многолетнем ряду расходов воды, распределенных в порядке от максимального до минимального наблюдаемого расхода воды, n — общее число членов многолетнего ряда.

Анализ маловодья Волги у Волгограда, Дона у Раздорской и Днепра у Лоцманской Каменки основывался на многолетних рядах их восстановленного (с исключенными изменениями, вызванными антропогенным воздействием) се-

² Многолетние колебания и изменчивость водных ресурсов и основных характеристик стока рек Российской Федерации: Научно-прикладной справочник / под ред. В.Ю. Георгиевского. СПб.: ООО "РИАЛ", 2021. 190 с.

³ Семенов В.А., Гниломедов В.А., Салугашвили П.С., Голубев В.Н., Фролов Д.М. География распределения и генезис климатообусловленных изменений экстремальных расходов воды, опасных наводнений и маловодий на реках России // Тр. ВНИИГМИ-МЦД. 2015. № 179. <http://meteo.ru/publications> (дата обращения 07.01.2024).

Таблица 1. Характеристика исследуемых рек

№	Река – створ	Площадь бассейна, тыс. км ²	Расчетный период	Природная зона
Бассейн Северной Двины				
1	Северная Двина – Усть-Пинега	348	1881–2016	тайга
Бассейн Западной Двины				
2	Западная Двина – Витебск	27.3	1877–2009	СШЛ*
Бассейн Волги				
3	Волга – Волгоград	1360	1876–2014	тайга, СШЛ, лесостепь, степь
4	Унжа – Макарьев	18.5	1896–2016	тайга
5	Вятка – Киров	48.3	1878–2016	тайга
6	Волга – Старица	21.1	1891–2020	СШЛ
7	Москва – Можайск	1.41	1915–2019	СШЛ
8	Ока – Калуга	54.9	1882–2020	СШЛ
9	Белая – Бирск	121	1881–2016	СШЛ, лесостепь
10	Самара – Елшанка	22.8	1933–2015	степь
11	Дема – Бочкарева	12.5	1934–2015	лесостепь
12	Сок – Сургут	4.73	1934–2014	лесостепь
13	Большой Караман – Советское	3.47	1936–2015	степь
Бассейн Днепра				
14	Днепр – Лоцманская Каменка	459	1851–2009	СШЛ, лесостепь, степь
15	Днепр – Речица	58.2	1895–2015	СШЛ
16	Днепр – Орша	18	1882–2015	СШЛ
17	Припять – Мозырь	97.2	1882–2015	СШЛ
18	Сож – Гомель	38.9	1900–2015	СШЛ
19	Березина – Бобруйск	20.2	1881–2015	СШЛ
20	Сейм – Рыльск	18.1	1935–2015	лесостепь, СШЛ
21	Десна – Брянск	12.4	1895–2016	СШЛ
22	Десна – Чернигов	81.4	1895–2009	СШЛ
Бассейн Дона				
23	Дон – Раздорская	378	1876–2014	СШЛ, лесостепь, степь
24	Дон – Казанская	102	1882–2020	лесостепь, степь
25	Дон – Лиски	69.1	1881–2016	лесостепь
26	Сосна – Елец	16.3	1928–2016	лесостепь, СШЛ
27	Воронеж – Липецк	15.3	1932–2016	лесостепь
28	Ворона – Борисоглебск	13.2	1932–2016	лесостепь
29	Битюг – Бобров	7.65	1933–2016	лесостепь
30	Хопер – Бесплемяновский	44.9	1929–2016	лесостепь
31	Калитва – Погорелов	10.5	1933–2016	степь
32	Медведица – Арчединская	33.7	1927–2016	степь
33	Иловля – Александровка	6.52	1955–2016	степь
34	Чир – Обливская	8.54	1923–2017	степь
Бассейн Урала				
35	Урал – Кизильское	17.2	1936–2015	лесостепь

Примечание: *СШЛ – смешанные и широколиственные леса.

зонного и годового стока, для чего был использован метод рек-индикаторов климатических условий (притоков и верхних частей главных рек), характеризующихся относительно слабыми антропогенными нарушениями водного режима (Георгиади и др., 2014). Был использован также ряд восстановленного стока р. Москвы у Можайска, полученный на основе метода водного баланса.

В качестве границы начала глобального потепления был принят 1980 г., что можно в первом приближении рассматривать в качестве осредненной оценки этой границы для рек Русской равнины, если исходить из анализа наблюдающейся последовательности смены контрастных фаз годового и сезонного стока (Георгиади и др., 2014; Георгиевский и др., 2014). Хотя эти границы в различных регионах могут существенно отличаться (Георгиади и др., 2014; Фролова и др., 2022; Georgiadi et al., 2020). Если же исходить из анализа смены продолжительных фаз температуры воздуха, то указанная граница в основном наблюдается в конце 1980-х годов, а переход контрастных фаз атмосферных осадков наблюдается примерно в середине 1970-х годов (Георгиади и др., 2014).

Границы между длительными фазами пониженных и повышенных значений годового и сезонного стока воды были определены с использованием разностно-интегральных кривых (Андреянов, 1959; Georgiadi and Groisman, 2023) в сочетании с оценкой статистической однородности рядов по средним значениям длительных контрастных фаз на основе параметрических (критерий Стьюдента) и непараметрических (критерий Мана-Уитни-Пети) критериев однородности (Евстигнеев, Магрицкий, 2018; Georgiadi and Groisman, 2023; Pettitt, 1979).

Результаты выявления лет, в которые происходила смена контрастных фаз, определенных на основе указанного выше набора методов, как правило, совпадают (Georgiadi and Groisman, 2023 и др.). Они дают основание сделать два следующих вывода. Во-первых, использование набора таких или аналогичных методов позволяет достаточно надежно выявлять границы смены контрастных фаз и, во-вторых, границы контрастных длительных фаз повышенных/пониженных значений годового и сезонного стока можно также выявлять на основании разностно-интегральных кривых.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБОБЩЕНИЕ

Основные реки Русской равнины

Обобщенная характеристика маловодья на реках по гидрологическим сезонам года и года в целом. Доля общего количества лет, в которые наблюдалось маловодье хотя бы в одном из сезонов года или оно охватывало несколько сезонов года или год в целом, изменялось на рассмотренных реках

по отношению к продолжительности всего периода наблюдений в диапазоне от 46 до 57% (табл. 2). При этом, для каждой из рек характерны свои особенности распределения количества лет, в которые маловодье формируется в различные сезоны года. Общая черта для всех рек — наибольшее число маловодных лет приходится на зиму в те годы, когда зимний сезон является единственным в году маловодным сезоном. Аналогичная картина характерна для других рассматриваемых рек и для двух других сезонов, кроме Дона (см. табл. 2). И все же примерно половину (а на Дону — более 60%) из общего числа лет с маловодьем оно наблюдалось в течение двух или даже трех сезонов года и года в целом. На всех реках (кроме Западной Двины) в довольно большом числе лет маловодье формируется во все сезоны года и год в целом.

В значительном числе лет (более тридцати) маловодье формируется только в одном из бассейнов. Но в большем числе лет (более пятидесяти) оно происходит в нескольких (от двух до пяти) бассейнах одновременно. В конце XIX в., в 1920–1930-е годы, в 1970-е годы в течение семи лет в различные сезоны года и года в целом формировалось маловодье одновременно во всех рассмотренных реках, а в течение девяти лет — в четырех бассейнах. В значительно большем числе лет маловодье наблюдалось одновременно в трех или двух бассейнах.

Наиболее часто (в течение 17–19 лет) маловодье наблюдается одновременно в следующих парах речных бассейнов: Волга–Дон, Дон–Днепр, Волга–Днепр, Западная Двина–Северная Двина, Днепр–Северная Двина, Волга–Западная Двина.

Изменение количества и доли маловодных лет в период современного глобального потепления. Современное глобальное потепление, за начало которого принят 1981 г., на всех рассмотренных реках приводит к существенному снижению количества маловодных лет в зимнюю и летне-осеннюю межень (рис. 1). Наиболее заметно это происходит на Днепре, на Дону, а также на Волге в летне-осеннюю межень, когда маловодье не наблюдалось вовсе. На Западной Двине и Северной Двине доля маловодных лет в меженные сезоны, а на Волге в летне-осеннюю межень также сократилась очень заметно. В то время как доля лет с низким стоком половодья (равным или меньшим стока 75% обеспеченности) на Дону, на Северной Двине и Западной Двине значительно увеличилось. Тогда как на Волге и Днепре она изменилась малозаметно. А вот доля лет с годовым стоком равным или меньшим стоку 75% обеспеченности на всех реках, так же как и низкого стока меженных сезонов, существенно снизилась.

Годовой и сезонный сток в период аномально низкого маловодья в замыкающих створах крупных рек в годы экстремальных засух. Экстремальные

Таблица 2. Характеристика лет с сезонным и годовым стоком обеспеченностью $\geq 75\%$

Река	Волга— Волгоград	Дон— Раздорская	Днепр— Лоцманская Каменка	Северная Двина— Усть-Пинега	Западная Двина— Витебск
Период наблюдений, годы	1876–2014	1876–2014	1851–2009	1881–2016	1877–2009
Типы сочетаний маловодных сезонов года и года в целом	Количество маловодных лет				
З-П-ЛО-Г*	11	10	8	7	2
П-ЛО-Г	4	8	11	5	2
З-ЛО-Г	5	0	3	4	3
З-П-Г	5	0	7	6	7
ЛО-Г	5	0	3	5	9
П-Г	4	2	6	5	6
З-П	1	0	0	2	4
З Г	1	12	1	1	2
П-ЛО	0	10	0	0	1
З-ЛО	0	0	2	0	0
З	12	13	15	13	15
П	9	5	8	8	9
ЛО	11	5	13	12	15
Г	0	3	0	0	1
Суммарное количество лет с сезонным и годовым маловодьем	69	68	77	68	76
Суммарная доля лет с сезонным и годовым маловодьем относительно всего периода наблюдений	46.6**	48.9	48.4	50	57.1

Примечания: * З – зима, П – половодье, ЛО – летне-осенний период, Г – среднегодовой сток; ** доля лет с маловодными сезонами и годовым маловодьем (в %) от числа лет всего периода наблюдений.

засухи на территории Русской равнины, формировавшиеся в летние месяцы и охватывавшие огромные территории, наблюдались на протяжении XIX–XXI вв. регулярно, в том числе в период современного глобального потепления. В эти же годы формировалось маловодье на реках, которое также распространялось на большую территорию (Georgiadi et al., 2021). При этом на территорию всех рассмотренных речных бассейнов маловодье распространялось лишь в 1921 и 1972 гг. (табл. 3).

В 1921 г. оно охватывало практически все сезоны года и год в целом (кроме зимы на Дону и летне-осеннего сезона на Северной Двине). Оно было также наиболее интенсивным. Сезонный и годовое стоки были чрезвычайно низким (равным или меньшим стоку 90% обеспеченности). Лишь на Волге зимний, на Дону годовое и на Северной Двине летне-осенний и годовое стоки были ниже стока 75% и выше стока 90% обеспеченности.

В 1972 г. на всех реках годовое стоки были ниже стока 75% обеспеченности и выше стока 90% обеспеченности. Сезонное маловодье наблюдалось одновременно на трех реках. В период половодья на Дону, Днепре и Западной Двине, а в летне-осенний период на Волге, Дону и Северной Двине. Все сезоны года и год в целом оно охватывало лишь на Дону.

В 1891 г. маловодье охватывало бассейны Волги, Дона, Днепра и Западной Двины, а в 1975 г. бассейны Волги, Дона, Западной Двины и Северной Двины. При этом маловодье 1975 г. на Волге и Дону захватывало как все сезоны года, так и год в целом. На Северной Двине его не было только зимой, а на Западной Двине оно наблюдалось лишь в летне-осенний период. В 1891 г., как и в 1975 г., оно проявилось в наибольшей мере в бассейнах Волги и Дона в сезоны теплого периода года и год в целом и затронуло лишь зимний сезон на Днепре и Западной Двине.

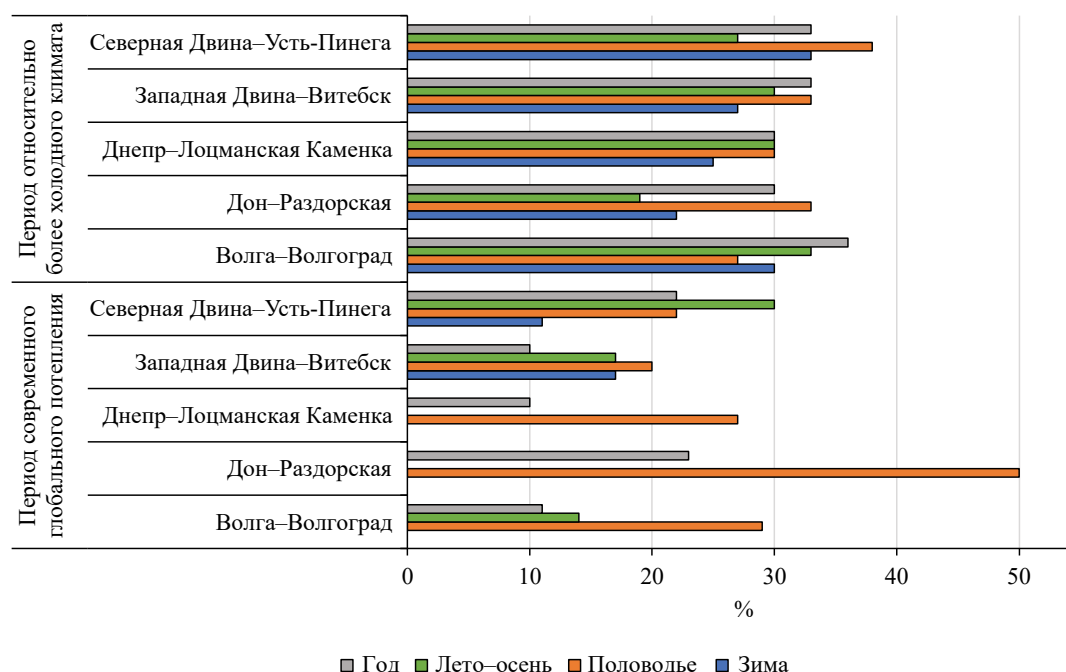


Рис. 1. Изменение доли (%) маловодных лет (со стоком обеспеченностью $\geq 75\%$) в период современного глобального потепления (с 1981 г. до окончания периода наблюдений на реках, приведенного в табл. 1) по сравнению с периодом относительно более холодного климата (1945–1980 гг.).

В другие рассмотренные годы с экстремальными засухами маловодье распространялось лишь на один речной бассейн, но на все сезоны и год в целом (1931 г., бассейн Волги) или на несколько бассейнов, но только на летне-осенний сезон (1946 г., бассейны Дона, Днепра и Северной Двины).

Реки бассейнов Волги, Дона, Днепра и Урала

Особенности маловодья на реках в бассейнах Волги, Дона, Днепра и Урала в годы с экстремальными засухами

Маловодья в периоды половодья, летне-осенней межени и года в целом. Маловодье 1975 г. в летне-осеннюю межень, в период половодья и года в целом было зафиксировано на всех изучаемых реках бассейна Волги (кроме половодья на Волге у Старицы), Дона и Днепра (кроме Бerezины). Средний сток этих периодов на реках в этих крупных бассейнов варьировал, как правило, от 80 до 99% обеспеченности. В 1972 г. на реках в бассейне Дона маловодье наблюдалось на всех реках во все указанные периоды года, а их средний сток в большинстве случаев был ниже стока 90% обеспеченности. В то время как на реках бассейна Волги маловодье наблюдалось в основном в летне-осенний период. Только на Волге у Старицы оно также было в период половодья и года в целом, а на Сургуте его не было вовсе. В бассейне Днепра в этот год реки были маловодными в основном в половодье и год в целом (обеспеченность стока этих периодов

преимущественно была ниже 85%). И лишь на Десне у Брянска маловодье наблюдалось также в летне-осеннюю межень, его средний сток соответствовал 75% обеспеченности. На Урале у Кизильской в 1972 и 1975 гг. маловодье охватывало все рассматриваемые сезоны, а обеспеченность их стока достигала 83–97%.

В 2010 г. маловодье распространялось на все рассмотренные периоды лишь на реках северо-востока и востока бассейна Волги (рр. Вятка и Белая). Обеспеченность их стока находилась в пределах 81–93%. В бассейне Дона оно формировалось на его притоках в его среднем течении (Воронеж, Ворона) в период половодья и года в целом, а на Хопре оно наблюдалось только в период половодья. При этом обеспеченность стока этих периодов составляла 76–85%.

В другие годы с экстремальными засухами маловодье охватывало существенно меньшие территории. Так, например, в бассейне Волги в период экстремальной засухи 1981 г. маловодье наблюдалось лишь в летне-осенний период на таежных (на Унже и Вятке) и степных (на Самаре и Большом Карамане) реках, а обеспеченность их среднего стока составляла 75–79%. В 1991 г. маловодье фиксировалось только на Унже (в летне-осеннюю межень), а в 1995 г. лишь на Волге у Старицы и также в летне-осеннюю межень. В 1999 г. оно наблюдалось на Волге у Старицы (в летне-осеннюю межень) и на Большом Карамане (в период половодья и года в целом). Обеспеченность стока в эти периоды составляла около 75% и лишь в 1999 г. на Большом Карамане она достигала 90%.

Таблица 3. Характеристика маловодных лет со стоком $\geq 75\%$ обеспеченности

Маловодные сезоны и год в целом	Река – створ				
	Волга—Волгоград	Дон—Раздорская	Днепр—Лоцманская Каменка	Западная Двина—Витебск	Северная Двина—Усть-Пинега
1891 г.					
Зима					
Половодье					
Лето—осень					
Год					
1921 г.					
Зима					
Половодье					
Лето—осень					
Год					
1931 г.					
Зима					
Половодье					
Лето—осень					
Год					
1946 г.					
Зима					
Половодье					
Лето—осень					
Год					
1972 г.					
Зима					
Половодье					
Лето—осень					
Год					
1975 г.					
Зима					
Половодье					
Лето—осень					
Год					

Примечание: оранжевые ячейки – речной сток меньше или равен стоку 75% обеспеченности, красные ячейки – речной сток меньше или равен стоку 90% обеспеченности.

На реках в бассейне Дона маловодья в годы с экстремальными засухами регулярно наблюдались (в 1991, 1995, 1998 и 1999 гг.) только на Дону у Лисок и лишь в период половодья. Обеспеченность стока низкого половодья в эти годы составляла около 75%. Маловодье формировалось также в период половодья, а также и года в целом на Сосне в 1991 и 1995 гг., на Медведице в 1995 г. и на Иловле в 1995 и 1998 гг. На Иловле обеспеченность стока этих периодов составляла около 90%, тогда как в остальных случаях она была около 75%. Маловодье в летне-осенний период наблюдалось лишь на двух реках. На Чире в 1995 г. (с обеспеченностью стока 75%) и на Иловле в 1998 г. (обеспеченность стока была более 98%). В бассейне Днепра в 1980–1990-е годы с экстремальными засухами маловодье наблюдалось лишь один раз (в 1991 г.) только на одной реке (Десна у Брянска) в период половодья.

Маловодье в период летней межени. Летом (период наибольшего распространения экстремальных засух) в 1975 г. маловодье наблюдалось в течение всех месяцев практически на всех рассмотренных реках в бассейне Волги, половине рек в бассейне Дона, на двух реках бассейна Днепра (Припять и Десна) и на Урале. Сток этих месяцев был чрезвычайно низким (его обеспеченность варьировала от 90 до 99%). На ряде рек в бассейне Дона маловодье формировалось в июне и июле (Битюг, Иловля) или только в июне (Воронеж), и оно также характеризовалось очень низким стоком с обеспеченностью более 90%. Похожая картина отмечается на ряде рек в бассейне Днепра. Маловодье здесь было сдвинуто во времени и происходило в июле–августе (Сож, Сейм) и в августе (Днепр у Речицы, Березина). При этом обеспеченность среднеме-

Таблица 4. Число случаев (в %) маловодных лет (обеспеченность которых равна или выше 75 и 95%) для основных гидрологических сезонов года и года в целом в долговременные контрастные фазы водности

Гидрологический сезон, год	Долговременные контрастные фазы водности	Число маловодных лет со стоком обеспеченностью	
		≥75%	≥95%
Летне–осенний	ФВС*	0–7	0–2
	ФНС**	35–42	6–8
Зимний	ФВС	0–7	0–7
	ФНС	33–49	6–14
Половодье	ФВС	5–8	0–8
	ФНС	36–66	1–14
Год	ФВС	8–19	0–4
	ФНС	29–43	5–11

Примечания: * – фаза повышенного стока; ** – фаза пониженного стока.

сячного стока на лесных реках была существенно ниже (около 75%), чем на лесостепных реках (Сейм), где она приближалась к 90%.

В 1972 г. маловодье в течение всех летних месяцев наблюдалось практически на всех реках бассейна Дона, а также на Самаре в бассейне Волги. Оно, как и маловодье 1975 г., охватывало в основном лесостепные и степные реки. На других реках этого бассейна маловодье формировалось преимущественно в течение двух месяцев (кроме Вятки, на которой был лишь один маловодный месяц, и р. Сок, на которой маловодья в этот год не фиксировались). Обеспеченность стока маловодных месяцев изменялась в широких пределах (75–90%). В бассейне Днепра маловодье наблюдалось в течение одного–двух летних месяцев (кроме Березины, на которой маловодья не было), обеспеченность стока которых варьировала от 75 (Сож – лесная зона) до 95% (Десна – лесостепь). На Урале маловодье наблюдалось в июле и августе, а обеспеченность стока составляла 78–90% соответственно.

Следующее по охвату территории маловодье в летние месяцы наблюдалось в 2010 г. Но в отличие от маловодий 1975 и 1972 гг. в течение всех трех месяцев оно было зафиксировано только на четырех лесостепных и степных реках, две из которых в бассейне Волги (Белая, Дема) и по одной в бассейнах Днепра (Сейм) и Дона (Медведица). В течение двух месяцев оно наблюдалось на Вятке (бассейн Волги), Хопре (бассейн Дона) и Десне (бассейн Днепра). А один маловодный месяц был зафиксирован на Дону у Лисок и Воронеже (бассейн Дона), р. Сок (бассейн Волги) и на Урале.

В другие годы с экстремальными засухами маловодье в летний период распространялось на существенно меньшие по размеру территории и охватывало отдельные части рассмотренных крупных речных бассейнов и наблюдалось чаще всего в течение одного летнего месяца (1981 г. – на

Унже, Вятке, Сосне, Воронеже, Иловле, 1991 г. – на Белой, 1995 г. – на Березине, 1999 г. – на Вятке) и редко двух (1981 г. – на Самаре, 1991 г. – на Калитве и Медведице, 1995 г. – на Чире) или трех месяцев (1991 г. – на Унже, 1995 и 1998 гг. – на Иловле). Сток таких маловодных месяцев менялся в широких пределах и соответствовал 75–99% обеспеченности. При этом маловодные летние месяцы наблюдались, в основном, на степных и лесостепных реках.

Изменение частоты маловодных лет во время долговременных фаз повышенного/пониженного стока

В многолетних изменениях рассмотренных рек Русской равнины (Волга – Старица, Москва – Можайск, Днепр – Орша, Ока – Калуга, Дон – Казанская, Сейм – Рыльск, табл. 4) за весь более чем вековой период наблюдений (на Сейме более чем 80-летний) выявлены две продолжительные контрастные фазы повышенного и пониженного стока гидрологических сезонов (Georgiadi and Groisman, 2023). При этом, для половодья сначала наблюдалась фаза повышенного стока, которая сменилась в 1960 г. на Днепре, в 1969 г. на Волге, в 1972 г. (на Сейме, Оке и Дону), в 1989 г. (на Москве у Можайска) на фазу пониженного стока. Для меженных периодов, напротив, сначала наблюдались фазы пониженного стока, а затем практически синхронно на всех рассмотренных реках (в 1978–1981 гг.) наступила фаза повышенного стока. При этом границы последних наблюдавшихся фаз, как правило, близки к границам периода современного глобального потепления. Характер же фаз годового стока существенно отличается между реками. Продолжительность долговременных фаз находится в пределах 28–99 лет. Разница в стоке контрастных фаз составляет (в процентах от стока в фазу его пониженных значений) от 18

до 144%. При этом наибольших значений разницы в стоке, как правило, достигает в меженные сезоны года, а наименьших для годового стока.

Были выявлены очень значительные различия в частоте маловодных лет (обеспеченность стока которых ≥ 75 и $\geq 95\%$) в фазы повышенного/пониженного стока всех рассмотренных рек как для годового стока, так и для стока основных гидрологических сезонов года (половодье, летне-осенний и зимний периоды). В табл. 4 указаны наибольшие и наименьшие доли маловодных лет (в процентах от продолжительности всего периода наблюдений) по данным для всех рассмотренных рек. Для летне-осеннего и зимнего сезонов на рр. Ока, Дон, Москва в фазы их повышенного стока вовсе не наблюдалось экстремальное маловодье. При этом в эти же сезоны в контрастные фазы наблюдались более значительные различия в частоте маловодных лет по сравнению с периодом половодья и годовым стоком. Для фаз повышенного стока диапазон изменений частоты маловодных лет (сток которых был ниже стока 75 и 95% обеспеченности) составлял для летне-осеннего стока соответственно 0–7 и 0–2, для зимы 0–7 и 0–7, для половодья 5–18 и 0–8, для годового стока 8–19 и 0–4). Для фазы пониженного стока картина разительно отличалась и выглядела следующим образом. Для летне-осеннего периода 35–42 и 6–8, зимнего периода 33–49 и 6–14, для половодья 36–66 и 1–14, для годового стока 29–43 и 5–11.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На фоне долговременных изменений стока, на реках Русской равнины формировались маловодья разной интенсивности, которые охватывали как год в целом, так и его основные сезоны. В период с конца XIX до начала XXI в. доля общего количества лет, в которые наблюдалось маловодье (когда сток был равен или ниже стока 75% обеспеченности) хотя бы в одном из сезонов года или в нескольких сезонах года, или год в целом, изменялось на рассмотренных реках Русской равнины (Волга, Дон, Днепр, Западная Двина и Северная Двина) по отношению к продолжительности всего периода наблюдений в диапазоне от 46 до 57%.

В большом числе лет (более тридцати) маловодье формируется только в одном из указанных выше бассейнов. Но в значительном числе лет (более 50) оно происходит в нескольких (от двух до пяти) бассейнах одновременно. В конце XIX в., в 1920–1930-е годы, в 1970-е годы в течение семи лет в различные сезоны года и года в целом маловодье формировалось одновременно на всех рассмотренных реках, а в девяти случаях в четырех бассейнах. В значительно большем числе лет маловодье формировалось одновременно в трех или двух бассейнах.

Современное глобальное потепление привело к существенному снижению доли маловодных лет в зимнюю и летне-осеннюю межень и года в целом на всех рассмотренных реках. В то время как доля лет с низким стоком половодья (равным или меньшим 75% обеспеченности) на Дону, на Северной Двине и Западной Двине напротив значительно увеличилось. Тогда как на Волге и Днепре она изменилось малозаметно.

В годы, в которые наблюдались наиболее крупные из экстремальных засух (1891, 1921, 1931, 1946, 1972 и 1975 гг.), территорию всех рассмотренных речных бассейнов маловодье охватывало лишь в 1921 и 1972 гг. В 1921 г. экстремальное маловодье наблюдалось практически во все сезоны года (кроме зимы на Дону и летне-осеннего сезона на Северной Двине). Оно было также наиболее интенсивным. Сезонный и годовой сток был чрезвычайно низким (равным или меньшим стоку 90% обеспеченности).

Маловодья на реках степной, лесостепной, южной и западной частей лесной зон тесно коррелированы с наиболее экстремальными засухами, наблюдавшимися на Русской равнине в период современного глобального потепления в 1970–2000-е годы.

Большую территорию экстремальное маловодье охватывало во время экстремальных засух 1975, 1972 и 2010 гг., наблюдавшихся в период глобального потепления. В 1975 г. ареал маловодья включал в себя бассейны крупнейших рек (Волги, Дона и Днепра, а также Урала), которое проявлялось даже в их замыкающих створах. В 1972 г. маловодье наблюдалось в замыкающем створе Дона, а также на Днепре и Урале, а в 2010 г. только в низовье Волги. При этом в 1975, 1972 и 2010 гг. в замыкающих створах этих рек оно наблюдалось не только в летне-осеннюю межень (период, когда встречаются экстремальные засухи), но также в период половодья и года в целом. Сток в эти периоды годового цикла был чрезвычайно низким и его обеспеченность варьировала, как правило, в диапазоне от 80 до 99%.

В другие годы с экстремальными засухами маловодье охватывало существенно меньшие территории, отдельные периоды года, а в летний период только его отдельные месяцы.

Для рек центральной части Русской равнины выявлено кардинальное изменение частоты маловодных лет в контрастные долговременные фазы речного стока, как в основные гидрологические сезоны года, так и за год в целом.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Института географии РАН FMWS-2024-0007 (№ 1021051703468-8).

FUNDING

Study completed according to the state assignment for the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences FMWS-2024-0007 (no. 1021051703468-8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевский Н.И., Фролова Н.В.* Безопасность водопользования в условиях маловодий // Водное хозяйство России. 2011. № 6. С. 6–17.
- Андреянов В.Г.* Циклические колебания годового стока, их изменения по территории и учет при расчетах стока // Тр. III Всесоюз. гидрологического съезда. Ленинград: Гидрометеиздат, 1959. Т. II. С. 3–49.
- Владимиров А.М.* Сток рек в маловодный период года. Л.: Гидрометеиздат, 1976. 295 с.
- Георгиади А.Г., Кашутина Е.А., Бородин О.О.* Динамика гидроклиматических характеристик в период экстремальных засух, наблюдавшихся на Русской равнине с 1970-х годов // Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство). Национальный докл. Т. 3. М.: МБА, 2021. С. 141–150.
- Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Милукова И.П., Кашутина Е.А., Барабанова Е.А.* Современные и сценарные изменения речного стока в бассейнах крупнейших рек России. Ч. 2. Бассейны рек Волги и Дона. М.: Издательство “Макс Пресс”, 2014. 214 с.
- Георгиевский В.Ю., Голованов О.Ф., Шалыгин А.Л.* Водные системы суши // Второй оценочный докл. Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. С. 350–361.
- Евстигнеев В.М., Магрицкий Д.В.* Речной сток и гидрологические расчеты. Курс лекций: учеб. пособие. М.: Триумф, 2018. 272 с.
- Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В., Мецкерская А.В., Страшная А.И., Черенкова Е.А.* Засухи и опустынивание // Второй оценочный докл. Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. С. 551–587.
- Кузин П.С., Бабкин В.И.* Географические закономерности гидрологического режима рек. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 200 с.
- Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В.* Агрометеорологические особенности засухи 2010 года в России по сравнению с засухами прошлых лет // Тр. Гидрометцентра. 2011. Вып. 345. С. 171–188.
- Филиппова И.А.* О вероятностных закономерностях колебаний минимального стока (на примере рек Центрально-Черноземной области) // Водные ресурсы. 1996. Т. 23. № 4. С. 389–395.
- Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Григорьева В.Ю., Гельфан А.Н., Сазонова 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.
<https://doi.org/10.31857/S032105962203004X>
- Beran M.A., Rodier J.A.* Hydrological aspects of drought. A contribution to the International Hydrological Programme. UNESCO-WMO. Vendôme. Presses Universitaires de France, 1985. 149 p.
- Georgiadi A.G., Borodin O.O.* Extreme Low Flows in Rivers of the East European Plain in the 19th–21st Centuries // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2022. Vol. 1023. P. 012011.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1023/1/012011>
- Georgiadi A.G., Groisman P.Y.* Extreme Low Flow during Long-Lasting Phases of River Runoff in the Central Part of the East European Plain // Water. 2023. № 15. P. 2146.
<https://doi.org/10.3390/w15122146>
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A.* Hydroclimate Characteristics of Extreme Droughts Observed on the Russian Plain since the 1970s // Arid Ecosyst. 2021. № 11. P. 117–123.
<https://doi.org/10.1134/S2079096121020050>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Borodin O.O.* Spatial and temporal correlation between severe droughts and extreme low flow on rivers in the Russian Plain // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2021. Vol. 817. P. 012034.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/817/1/012034>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A.* Contemporary and Scenario Changes in River Runoff in the Don Basin // Water Res. 2020. Vol. 47. № 6. P. 651–662.
<https://doi.org/10.1134/S0097807820060068>
- Hasrul H.H., Siti F.M.R., Nur S.M., Asmadi A.* Research Trends of Hydrological Drought: A Systematic Review // Water. 2019. № 11. P. 2252.
<https://doi.org/10.3390/w11112252>
- Kireeva M.B., Frolova N.L., Winde F., Dzhamalov R.G., Rets E.P., Povalishnikova E.S., Pakhomova O.M.* Low flow on the rivers of the European part of Russia and its hazards // Geography, Environment, Sustainability. 2016. Vol. 9. № 4. P. 33–47.
https://doi.org/10.15356/2071-9388_04v09_2016_03
- Milyukova I., Georgiadi A., Borodin O.* Long-term changes in water flow of the Volga basin rivers // E3S Web Conf. 2020. Vol. 163. P. 05008.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016305008>
- Pettitt A.N.* A non-parametric approach to the change-point problem // J. of the Royal Statistical Society. Ser. C (Applied Statistics). 1979. Vol. 28. № 2. P. 126–135.

Features of Extremely Low Water Years on the Rivers of the Russian Plain during the Period of the Modern Global Warming

A. G. Georgiadi*

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**e-mail: georgiadi@igras.ru*

Extreme low water years on rivers (in years in which the runoff was equal to or less than 75 and 90–95% of the probability exceedance) observed in the river basins of the Russian Plain (Volga, Don, Dnieper, Western Dvina and Northern Dvina) in the 19th–21st centuries were studied. It is shown that the proportion of the total number of years in which low water was observed in one or several seasons of the year or the whole year varied on the rivers considered in relation to the duration of the entire observation period in the range from 46 to 57%. In the 1930s, low water years occurred in only one of the basins considered, and in the 1950s in several (from two to five) basins in the same year. At the end of the 19th century, in the 1920s and 1930s, and in the 1970s, there were seven years when low water occurred simultaneously in different seasons and in the whole year in all the rivers considered, and in nine cases in four basins. Modern global warming leads to a significant decrease in the number of low water years in the winter and summer-autumn low flow seasons and the year as a whole on all the rivers considered. While the number of years with low flood runoff on the Don, on the Northern and Western Dvina has increased significantly, and on the Volga and Dnieper it has changed little. During the long-term phases of increased/decreased annual and seasonal runoff on the rivers of the central part of the Russian Plain, cardinal differences in the frequency of low water years were revealed. In the years when the most extreme droughts were observed on the territory of all river basins considered, low water was observed only in 1921 and 1972.

Keywords: extreme low water on rivers, period of instrumental observations, global warming, long-term phases of increased/decreased runoff, correlation of extreme droughts and low water

REFERENCES

- Alekseevskii N.I., Frolova N.V. Water use safety in the conditions of water scarcity. *Vodn. Khoz. Ross.*, 2011, no. 6, pp. 6–17. (In Russ.).
- Andreyanov V.G. Cyclic fluctuations of annual runoff, their changes over the territory and accounting for runoff calculations. In *Trudy III Vsesoyuznogo gidrologicheskogo s'ezda. T. II* [Proceedings of the 3 All-Union Hydrological Congress. Vol. 2]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1959, pp. 3–49. (In Russ.).
- Beran M.A., Rodier J.A. *Hydrological aspects of drought. A contribution to the International Hydrological Programme. UNESCO-WMO*. Vendôme: Presses Universitaires de France, 1985. 149 p.
- Evstigneev V.M., Magritskii D.V. *Rechnoi stok i gidrologicheskie raschety. Kurs lektsii: uchebnoe posobie* [River Flow and Hydrological Calculations. Course of Lectures: Textbook]. Moscow: Triumf Publ., 2018. 272 p.
- Filippova I.A. On the probabilistic patterns of fluctuations in minimum flow (using the example of rivers in the Central Black Earth Region). *Vodn. Resur.*, 1996, vol. 23, no. 4, pp. 389–395. (In Russ.).
- Frolova N.L., Magritskii D.V., Kireeva M.B., et al. Streamflow of Russian rivers under current and forecasted climate changes: A review of publications. 1. Assessment of changes in the water regime of Russian rivers by observation data. *Water Resour.*, 2022, vol. 49, pp. 333–350.
<https://doi.org/10.1134/S0097807822030046>
- Georgiadi A.G., Borodin O.O. Extreme low flows in rivers of the East European Plain in the 19th–21st Centuries. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2022, vol. 1023, art. 012011.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1023/1/012011>
- Georgiadi A.G., Groisman P.Y. Extreme low flow during long-lasting phases of river Runoff in the central part of the East European Plain. *Water*, 2023, no. 15, art. 2146.
<https://doi.org/10.3390/w15122146>
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A. Hydroclimate characteristics of extreme droughts observed on the Russian Plain since the 1970s. *Arid Ecosyst.*, 2021, no. 11, pp. 117–123.
<https://doi.org/10.1134/S2079096121020050>
- Georgiadi A.G., Kashutina E.A., Borodin O.O. Dynamics of hydroclimatic characteristics during the period of extreme droughts observed on the Russian Plain since the 1970s. In *Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: proyavleniya zasukhi, mery preduprezhdeniya, bor'by, likvidatsiya posledstviy i adaptatsionnye meropriyatiya (sel'skoe i lesnoe khozyaistvo). Natsional'nyi doklad. Tom 3* [Global Climate and Soil Cover in Russia: Manifestations of Drought, Prevention and Control Measures, Mitigation of Consequences and Adaptation Measures (Agriculture and Forestry). National report. Vol. 3]. Moscow: MBA, 2021, pp. 141–150. (In Russ.).
- Georgiadi A.G., Koronkevich N.I., Milyukova I.P., Kashutina E.A., Barabanova E.A. *Sovremennye i stsennarnye izmeneniya rechnogo stoka v basseynakh krupneishikh rek Rossii. Chast' 2. Basseiny rek Volgi i Dona* [Modern and Scenario Changes in River Flow

- in the Basins of the Largest Rivers in Russia. Part 2. Basins of the Volga and Don Rivers]. Moscow: "Max Press" Publ., 2014. 214 p.
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Borodin O.O. Spatial and temporal correlation between severe droughts and extreme low flow on rivers in the Russian Plain. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, 2021, vol. 817, art. 012034. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/817/1/012034>
- Georgiadi A.G., Milyukova I.P., Kashutina E.A. Contemporary and Scenario Changes in River Runoff in the Don Basin. *Water Resour.*, 2020, vol. 47, no. 6, pp. 651–662. <https://doi.org/10.1134/S0097807820060068>
- Georgievskii V.Yu., Golovanov O.F., Shalygin A.L. Land water systems. In *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [The Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014, pp. 350–361. (In Russ.).
- Hasrul H.H., Siti F.M.R., Nur S.M., Asmadi A. Research trends of hydrological drought: A systematic review. *Water*, 2019, no. 11, art. 2252. <https://doi.org/10.3390/w11112252>
- Kireeva M.B., Frolova N.L., Winde F., Dzhamalov R.G., Rets E.P., Povalishnikova E.S., Pakhomova O.M. Low flow on the rivers of the European part of Russia and its hazards. *Geogr., Environ., Sustain.*, 2016, vol. 9, no. 4, pp. 33–47. https://doi.org/10.15356/2071-9388_04v09_2016_03
- Kuzin P.S., Babkin V.I. *Geograficheskie zakonomernosti gidrologicheskogo rezhima rek* [Geographical Patterns of the Hydrological Regime of Rivers]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1979. 200 p.
- Milyukova I., Georgiadi A., Borodin O. Long-term changes in water flow of the Volga basin rivers. *E3S Web Conf.*, 2020, vol. 163, art. 05008. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016305008>
- Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change-point problem. *J. R. Stat. Soc., C: Appl. Stat.*, 1979, vol. 28, no. 2, pp. 126–135.
- Strashnaya A.I., Maksimenkova T.A., Chub O.V. Agrometeorological features of the 2010 drought in Russia compared to droughts of previous years. *Tr. Gidromettsentra*, 2011, no. 345, pp. 171–188. (In Russ.).
- Vladimirov A.M. *Stok rek v malovodnyi period goda* [River Flow During Low-Water Periods of the Year]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1976. 295 p.
- Zolotokrylin A.N., Vinogradova V.V., Meshcherskaya A.V., Strashnaya A.I., Cherenkova E.A. Droughts and desertification. In *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [The Second Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014, pp. 551–587. (In Russ.).