

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-3-93-111>

УДК 991.9

Изменчивость сроков прохождения максимальных уровней воды на реках Северного Кавказа

А.А. Мироненко

*Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
г. Москва, Россия
nastyamir@list.ru*

Исследовано внутригодовое распределение сроков прохождения максимальных уровней воды на реках Северного Кавказа. Использованы данные наблюдений на 54 гидрологических постах за период с 1961 по 2017 год. Выполнена типизация внутригодового распределения этих сроков, согласно которой для каждого сезона года их частота может превышать 80 %, находиться в интервале от 50 до 80 % или не превышать 50 %. На этой основе предложено районирование участков рек Северного Кавказа по характеру изменчивости сроков прохождения максимальных уровней воды. Географическая обоснованность предлагаемого районирования подтверждается его достаточно хорошим соответствием существующим представлениям об особенностях питания исследуемых рек и их водном режиме. Полученные результаты могут быть использованы в целях уточнения вероятности прохождения опасных паводков на реках Северного Кавказа в различные сезоны года.

Ключевые слова: реки Северного Кавказа, максимальные уровни воды, сроки прохождения пиков, типы распределения по сезонам, районирование

The timing variability of maximum water levels in the rivers of the North Caucasus

A.A. Mironenko

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
nastyamir@list.ru*

The intra-annual distribution of the timing of maximum water levels in the rivers of the North Caucasus has been studied. Observation data from 54 hydrological gauges for the period from 1961 to 2017 were used. The intra-annual distribution of these dates was typified, according to which for each season of the year their frequency may exceed 80%, be in the range from 50 to 80% or not exceed 50%. On this basis, the zoning of river sections in the North Caucasus is proposed according to the type of variability in the timing of maximum water levels. The geographical validity of the proposed zoning is confirmed by its good enough correspondence to the existing ideas about the peculiarities of flow formation and water regime of the studied rivers. The obtained results can be used to estimate the probability of dangerous floods in the rivers of the North Caucasus in different seasons of the year.

Keywords: the rivers of the North Caucasus, maximum water levels, timing of water level peaks, types of seasonal distribution, zoning

Введение

Тема наводнений на реках широко освещена в научной литературе [11–13, 16]. Высокий интерес к этому опасному природному явлению в научном сообществе подогревает и увеличение частоты и интенсивности наводнений в последние десятилетия, что подчеркивается в исследованиях [2, 9, 17]. Причины увеличения числа связанных с опасными гидрологическими явлениями катастрофических ситуаций, по мнению [15, 18], кроются в современных изменениях климата.

Изучению рек Северного Кавказа – региона России с высокой степенью природной опасности наводнений [3, 7] – посвящено много научных трудов. Особое внимание уделяется характеристикам максимального стока рек. Так, в [21] показано увеличение максимальных уровней воды практически на всех гидрологических постах в бассейне р. Терек за период 1966–2002 гг. Подобная тенденция, характерная для рядов максимальных срочных годовых уровней воды периода 1961–2017 гг., выявлена и для большинства рек Северного Кавказа в рамках исследования [8]. Показано увеличение числа превышений отметок неблагоприятных и опасных явлений от 1960–1990 к 1991–2017 гг. на реках Черноморского побережья и бассейна Кубани, в то время как в бассейнах Кумы и Терека отмечено уменьшение повторяемости превышений отметок опасных явлений при неизменном числе превышений отметок неблагоприятных явлений. Исследованы связи между максимальными уровнями и расходами воды, обнаружившие заметные вертикальные русловые деформации на отдельных участках рек Северного Кавказа. В [20] рассмотрены различные характеристики стока рек Северного Кавказа и показано, что среднегодовой сток в последние десятилетия возрос до 30 % на реках предгорий и до 70 % на равнинах. Условия формирования максимального стока рек Северо-Западного Кавказа освещены в [6]. Принципы и рекомендации по совершенствованию системы мониторинга опасных паводков на реках Северного Кавказа рассмотрены в [10].

При изучении характеристик паводкового стока и факторов, их формирующих, важным оказывается не только анализ максимальных расходов и уровней воды, но и дат и сезонов их прохождения, реагирующих на изменение климата [14]. Так, в Европе [13] за последние 50 лет изменились сроки прохождения паводков в течение года. Для территории Северного Кавказа в [19] изучено изменение средних дат наступления годовых максимумов расходов воды за период 1981–2016 гг. В качестве одной из возможных причин смещения сроков годового максимума стока с весны на конец весны и начало лета в низменных районах Северного Кавказа и в центральной, относительно низменной части Кубанской впадины указывается рост интенсивности конвективных осадков летнего периода. Показано, что уменьшение весенне-летней волны снеготаяния на Северном Кавказе становится преобладающим фактором в тенденциях максимального

стока, наблюдается незначительное уменьшение среднего значения и стандартного отклонения годовых максимумов расходов воды на реках центральной и восточной части Северного Кавказа.

В рамках данного исследования рассмотрены даты прохождения максимальных срочных годовых уровней воды, выполнен анализ их сезонного распределения, предложена классификация рек Северного Кавказа по сезонам прохождения максимумов уровней воды. На основе полученных данных выполнено районирование исследуемой территории с выделением характерных областей с особенностями распределения максимальных срочных годовых уровней воды.

Материалы и методы

Анализ проведен на основе данных о максимальных срочных годовых уровнях воды (далее – максимальные уровни воды) и датах их прохождения, наблюденных на 54 гидрологических постах на реках Северного Кавказа за период 1961–2017 гг. (далее – рассматриваемый период). Среди них – 26 постов в бассейне Кубани и на реках бассейна Черного моря, 15 – в бассейне Терека, 13 – на других реках бассейна Каспийского моря. Продолжительность рядов дат прохождения максимальных уровней воды в бассейне Кубани в среднем составляет 54 года, на реках Черноморского побережья Кавказа – 44 года, на реках Каспия (без учета Терека) – 42 года, в бассейне Терека – 39 лет.

Для того, чтобы установить характер сезонного распределения максимальных уровней воды рек Северного Кавказа за рассматриваемый период, определены сезоны, в которые наблюдались максимальные уровни воды в створах гидрологических постов. Вычислена повторяемость наступления максимальных уровней воды в каждый из сезонов за рассматриваемый период, построены диаграммы сезонного распределения максимальных уровней воды рек исследуемого региона.

Неоднородность дат прохождения максимальных уровней воды рек Северного Кавказа отражена в классификации, в основу которой легла классификация М.И. Львовича, предусматривающая выделение различных типов водного режима рек земного шара по источнику питания и сезону наибольшего стока [4, 5].

Для выражения максимальных уровней воды в рамках классификации предложен индекс h_{max} . Обозначение сезонов, в которые наблюдались максимумы уровней воды, принято согласно классификации рек М.И. Львовича, где P – весна, E – лето, A – осень, H – зима [4, 5]. Таким образом, комбинации индекса h_{max} с индексами P , E , A и H выражают различные типы распределения максимальных уровней воды по сезонам. Причем индексы P , E , A и H в рамках данной классификации могут иметь как прописное, так и строчное написание в зависимости от величины повторяемости максимальных уровней воды за сезон. Так, если более чем в 80 % случаев за рассматриваемый период максимальные уровни воды наблюдались

в один из сезонов, прохождение таких уровней охарактеризовано как почти исключительное и обозначено как P , E , A и H . Если максимальные уровни воды наблюдались в 50–80 % за один из сезонов, их распределение охарактеризовано как преимущественное в данный сезон – Ph_{max} , Eh_{max} , Ah_{max} и Hh_{max} соответственно. В случае повторяемости максимальных уровней воды менее 50 % за один из сезонов распределение сроков их прохождения охарактеризовано как преобладающее в данный сезон – ph_{max} , eh_{max} , ah_{max} и hh_{max} соответственно.

Таким образом, получено четыре группы рек, объединенных по сезонам прохождения максимальных уровней воды, и 12 теоретически возможных вариантов (типов) сезонного распределения максимальных уровней воды, выраженных индексами.

Анализ сезонного распределения максимальных уровней воды позволил осуществить районирование участков рек Северного Кавказа по географическому признаку с выделением областей с характерным сезонным распределением максимальных уровней воды на основании предложенной классификации. В рамках каждой из таких областей выделены группы рек по принципу их принадлежности к тому или иному крупному бассейну для получения представления о географической неоднородности сроков прохождения максимальных уровней воды.

Результаты

Полученные результаты позволили выполнить классификацию рек Северного Кавказа по преобладающему сезону прохождения максимальных уровней воды.

Согласно предложенной классификации, всего на территории Северного Кавказа встречается 7 типов сезонного распределения максимальных уровней воды из теоретически возможных 12 (см. табл. 1). Самая многочисленная группа – 37 гидрологических постов – группа с наиболее часто встречающимися летними максимумами уровней воды. Данная группа наиболее широко представлена: на 17 гидрологических постах максимальные уровни воды наблюдались летом в 80 % случаев (E), еще на 17 – в 50–80 % случаев (Eh_{max}). На 3 постах зафиксировано менее 50 % случаев в летний сезон (eh_{max}). Участки рек с летними максимумами уровней воды встречаются повсеместно на территории Северного Кавказа.

Наиболее вероятное прохождение максимальных уровней воды в зимний период свойственно участкам рек Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани в створе 9 гидрологических постов. В отличие от группы рек с летними максимумами, к данной группе относятся реки, в створах гидрологических постов которых максимумы уровней воды наблюдались в 50–80 % случаев (Hh_{max}) и менее чем в 50 % случаев (hh_{max}) за период. Причем гидрологических постов с преимущественно зимними максимумами больше, чем постов с преобладающими зимними максимумами в сезонном распределении 7 против 2.

Таблица 1. Классификация сезонного распределения максимальных уровней воды рек Северного Кавказа
Table 1. Classification of seasonal distribution of maximum water levels of the North Caucasian rivers

Сезон	Распределение максимальных срочных годовых уровней воды по сезонам		
	почти исключительное	преимущественное	преобладающее
Весна	P -	Ph_{max} -	ph_{max} Мзымта (область IIa); Фарс, Белая (бассейн Кубани) (область IIb); Кума*
Лето	E Андийское Койсу, Аварское Койсу, Казикумухское койсу, Самур, Терек, Цея, Урух, Малка, Баксан, Чегем (область IV); Кубань**	Eh_{max} Кума, Золка, Сулак, Кара-Самур, Курах, Кубань, Уруп, Боль- шая Лаба, Чамлык, Терек, Фиагдон, Урсдон, Нальчик (область III)	eh_{max} Курджипис, Лаба, Малая Лаба (область IIb)
Осень	A -	Ah_{max} -	ah_{max} Белая (бассейн Кубани), Шахе, Сочи (область IIa)
Зима	H -	Hh_{max} Вулан, Пшиш, Афипс, Убин, Адегой, Адагум (область I)	hh_{max} Куапсе, Пшеха (область IIa)

Примечание. * Участок р. Кума в створе ст. Александрийская не отнесен ни к одной из областей; ** участок р. Кубань в створе ст. Ладожская не отнесен ни к одной из областей.

Повторяемость осенних и весенних максимумов уровней воды на реках Северного Кавказа не превышала 50 % случаев за рассматриваемый период. Преобладание весенних максимумов характерно для участков рек Фарс, Мзымта, Кума и Белая (бассейн Кубани) в створах 4 гидрологических постов, осенних максимумов – для участков рек Сочи, Шахе и Белая (бассейн Кубани) в створах 4 гидрологических постов.

Стоит отметить, что некоторые реки, рассмотренные в данном исследовании, являются полизональными. Это говорит о том, что на формирование их гидрологического режима могут оказывать влияние различные факторы, что в свою очередь определяет тот или иной характер сезонного распределения гидрологических характеристик на конкретном участке реки. Это отражается на повторяемости максимальных уровней воды в рамках одного сезона отдельных рек. Так, например, на р. Кубань

($F=57\,900\text{ км}^2$) обнаружены участки рек, для которых свойственно прохождение максимумов уровней воды преимущественно в летний сезон (в створе г. Армавир – в 77 % случаев за период, в створе с. Успенское – 78 %). Однако ниже по течению р. Кубань, в створе ст. Ладожская, максимумы уровней характеризуются как почти исключительно летние – 82 %. Обратная ситуация на р. Терек ($F=43\,200\text{ км}^2$), где в среднем ее течении наблюдались почти исключительно летние максимумы уровней воды (посты расположены от истока к устью): в створе г. Владикавказ – в 93 % случаев за период, г. Моздок – 89 %, с. Хангиш-Юрт – 100 %, в створе Каргалинского гидроузла – 82 %. В то же время преимущественно летние максимумы характерны для участков р. Терек в створе ст. Котляревская в верхнем течении и с. Аликазган в нижнем течении, повторяемость которых составила 77 и 64 % соответственно. На крупном притоке Кубани – р. Лаба ($F=12\,500\text{ км}^2$) – также заметна неоднородность сезонного распределения максимальных уровней воды за рассматриваемый период. Для ее правого притока – р. Большая Лаба, ниже Азиатского моста – характерны преимущественно летние максимумы уровней воды (Eh_{max}), в то время как для левого притока – р. Малая Лаба, в створе пос. Бурный – свойственно смешанное распределение уровней воды с их преобладанием в летний сезон (eh_{max}).

В бассейне р. Сулак ($F=15\,200\text{ км}^2$) участкам рек в створе 3 гидрологических постов свойственны почти исключительно летние максимумы уровней воды (E), однако на посту в створе пгт Сулак за рассматриваемый период распространены преимущественно летние максимумы (Eh_{max}). Аналогичная ситуация и на р. Самур ($F=7\,330\text{ км}^2$), где на главной реке (с. Лучек, с. Ахты, с. Усучай) зафиксированы почти исключительно летние максимумы уровней воды (E), в то время как данные наблюдений на реках Кара-Самур и Курах указывают на преимущественно летние максимумы (Eh_{max}).

Однако в ходе данного исследования выявлены и реки, отдельным участкам которых свойственна различная степень вклада максимумов в рамках не только одного, но и нескольких сезонов. Так, заметные различия в структуре сезонного распределения максимальных уровней воды свойственны отдельным участкам левого притока Кубани – р. Белой ($F=5\,990\text{ км}^2$). В створе пос. Гузерипль для р. Белая характерно смешанное распределение сроков прохождения уровней воды с преобладанием осенних максимумов, повторяемость которых за рассматриваемый период составляет 38 % (ah_{max}). В 42 км ниже по течению реки, в створе пос. Каменноостский, вклад осенних максимумов уменьшается до 29 % за период и в общей структуре сезонного распределения уже преобладают весенние максимумы уровней воды – 39 % за период (ph_{max}).

Менее пестрая картина сезонного распределения в бассейне Кумы ($F=33\,500\text{ км}^2$). На 3 гидрологических постах – на р. Золка в створе х. Михайловский, на р. Кума в створе г. Зеленокумск и г. Буденновск, расположенных в пределах участка реки протяженностью около 188 км,

за рассматриваемый период максимальные уровни воды наблюдались преимущественно в летний сезон (Eh_{max}). Однако в 64 км выше по течению р. Кума, в створе ст. Александрийская, максимумы уровней воды наблюдались весной в 49 % случаев за период (ph_{max}).

Всего на территории Северного Кавказа выделены четыре области с характерным сезонным распределением максимальных уровней воды (рисунок). Три участка рек не отнесены к той или иной области и рассмотрены отдельно в разделе Обсуждение.

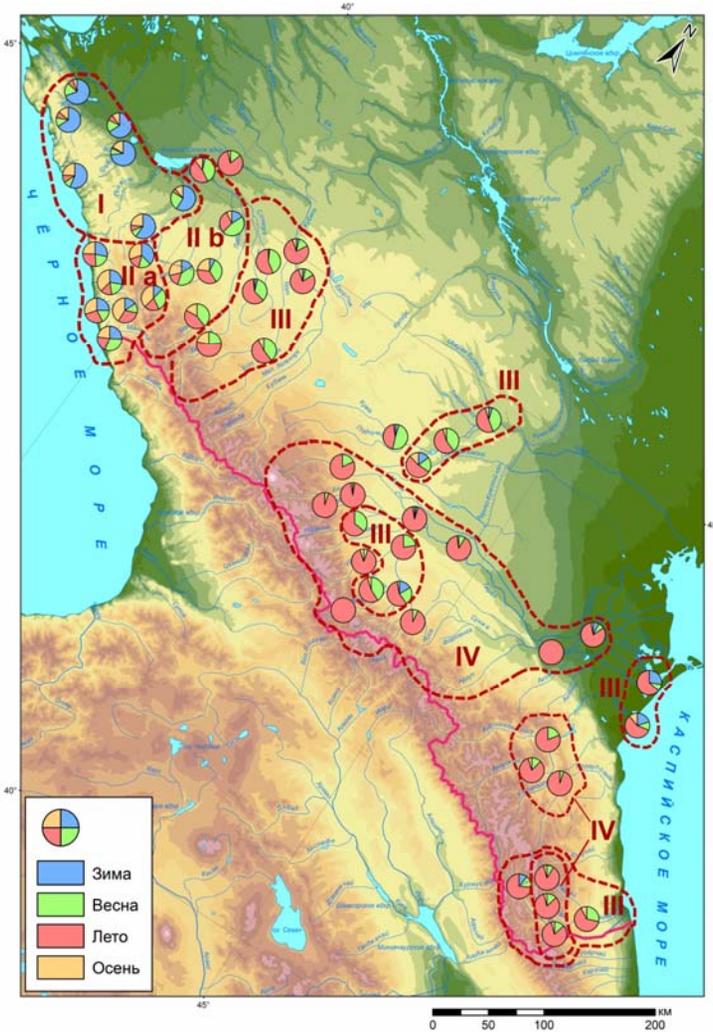


Рис. Распределение дат прохождения максимальных срочных годовых уровней воды на реках Северного Кавказа за период 1961–2017 гг. по сезонам, %.
Fig. Seasonal distribution of maximum urgent annual water levels of the North Caucasian rivers over the period 1961–2017, %.

Для рек **области I** (см. рисунок), к которым относятся левобережные притоки в нижнем течении р. Кубань и некоторые реки северо-западной части Черноморского побережья Кавказа, характерно прохождение максимальных уровней воды преимущественно в зимний период (Hh_{max}): повторяемость зимних дат в среднем здесь составляет 64 %. Повторяемость весенних и осенних максимумов примерно одинакова – в среднем около 15 % случаев. Наименьший процент приходится на летние максимумы уровней воды – в среднем 7 %. Хотя участки рек Пшиш, Афипис, Убин, Адегой, Адагум и Вулан отнесены к одной области, в структуре их сезонного распределения максимальных уровней воды видны различия: для р. Вулан, протекающей по Черноморскому побережью, характерна более низкая доля зимних и весенних максимумов и более высокая доля осенних максимумов уровней воды за рассматриваемый период при сравнении с реками бассейна Кубани (табл. 2).

Таблица 2. Сезонное распределение максимальных срочных годовых уровней воды на реках Северного Кавказа. Область I

Table 2. Seasonal distribution of maximum urgent annual water levels in the rivers of the North Caucasus. Area I

Реки в области	Кол-во г/п	Повторяемость дат, %				Диа- грамма распре- деления
		зимних	весенних	летних	осенних	
Область I						
Hh_{max} Бассейн Кубани (Адагум, Адегой, Афипис, Пшиш, Убин)	6	$\frac{59-74\%}{66\%}$	$\frac{8-25}{14}$	$\frac{2-8}{6}$	$\frac{6-24}{14}$	
Hh_{max} Реки побережья Черного моря (Вулан)	1	57	9	9	25	
В среднем для области I	7	$\frac{57-74}{64}$	$\frac{8-25}{14}$	$\frac{2-9}{7}$	$\frac{6-25}{15}$	

Примечание. В числителе дроби – диапазон значений повторяемости максимальных срочных годовых уровней воды за сезон, %; в знаменателе – средняя повторяемость максимальных срочных годовых уровней воды группы рек за сезон, %; группы рек в рамках одной области расположены в порядке убывания повторяемости максимумов уровней воды преобладающего сезона.

Область Па (см. рисунок) представлена преимущественно реками юга Черноморского побережья Кавказа и отдельных участков рек в бассейне Кубани, где процент прохождения годовых максимумов уровней по различным сезонам за рассматриваемый период примерно одинаков. Среди них – реки Куапсе, Шахе, Сочи и Мзымта, а также отдельные участки р. Белая (бассейн Кубани) и ее притока – р. Куапсе. Распределение максимальных уровней воды по сезонам в среднем по постах здесь можно характеризовать как смешанное с преобладанием осенних дат – около 32 % (ah_{max}). Однако в пределах данной области присутствуют и посты с преобладанием зимних (hh_{max}) и весенних (ph_{max}) максимумов уровней воды (табл. 3). Причем посты с преобладанием зимних максимумов области Па тяготеют к ее северной части, граничащей с областью I (см. рисунок). Таким образом, мы наблюдаем увеличение доли зимних максимумов уровней воды в структуре их сезонного распределения с юга на север Черноморского побережья Кавказа за рассматриваемый период.

В **область Пб** (см. рисунок) входят левые притоки р. Кубань в ее среднем течении – р. Белая и р. Лаба, в том числе реки Курджипис, Фарс и Малая Лаба. Для области Пб характерно преобладание постов с летними (eh_{max}) максимумами уровней воды в структуре их сезонного распределения, повторяемость которых в среднем составляет 41 % за рассматриваемый период. При удалении от побережья Черного моря вглубь материка на реках увеличивается доля весенних дат прохождения максимальных уровней: появляются гидрологические посты с преобладанием весенних максимумов (ph_{max}), заметно сокращается вклад зимних максимумов в их сезонное распределение. Таким образом, область Пб является своего рода переходной зоной между Па и Пв (см. табл. 3).

Если к областям I и II относятся только реки Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани, то в **область Пв** (см. рисунок) входят участки рек пяти крупных бассейнов – Кубани, Терека, Кумы, Сулака и Самура (табл. 4). Данная область является самой многочисленной: к ней отнесены участки рек в створе 17 гидрологических постов с преимущественно летними максимумами уровней воды (eh_{max}). Наибольшая доля летних максимумов уровней воды в среднем по бассейнам свойственна р. Самур (69 %), наименьшая – р. Кума (53 %), в то время как абсолютный максимум повторяемости в летний сезон зафиксирован на р. Кубань в створе с. Успенское – 43 случая, или 78 % за рассматриваемый период. В рамках данной области выделяется бассейн р. Кума, для которого велика доля весенних максимумов уровней воды, в среднем достигающая 33 % за рассматриваемый период. Для 15 из 17 гидрологических постов данной области вторыми по повторяемости являются весенние максимумы, составляющие от 13 % до 42 % в общей структуре сезонного распределения. На двух постах в пределах области Пв, на р. Сулак в створе пгт Сулак и на р. Терек в створе с. Аликазган, вторыми по повторяемости являются зимние максимумы уровней воды, составляющие 20 % и 27 % соответственно.

Таблица 3. Сезонное распределение максимальных срочных годовых уровней воды на реках Северного Кавказа. Область II

Table 3. Seasonal distribution of maximum urgent annual water levels in the rivers of the North Caucasus. Area II

Реки в области	Кол-во г/п	Повторяемость дат, %				Диа- грамма распреде- ления
		зимних	весенних	летних	осенних	
Область IIa						
<i>ah_{max}</i> Реки побережья Черного моря (Сочи, Шахе) Бассейн Кубани (Белая)	4	$\frac{13-28}{20}$	$\frac{13-30}{20}$	$\frac{15-31}{23}$	$\frac{30-41}{37}$	
<i>hh_{max}</i> Реки побережья Черного моря (Купсе) Бассейн Кубани (Гшеха)	2	$\frac{28-38}{33}$	$\frac{16-21}{19}$	$\frac{16-26}{21}$	$\frac{25-30}{27}$	
<i>ph_{max}</i> Реки Черного моря (Мзымта)	1	26	31	20	23	
В среднем для области IIa	7	$\frac{13-38}{25}$	$\frac{13-31}{21}$	$\frac{15-31}{22}$	$\frac{23-41}{32}$	
Область IIb						
<i>eh_{max}</i> Бассейн Кубани (Курджипс, Лаба, Малая Лаба)	3	$\frac{0-7}{4}$	$\frac{34-40}{38}$	$\frac{36-46}{41}$	$\frac{11-23}{17}$	
<i>eh_{max}</i> Бассейн Кубани (Белая, Фарс)	2	16	$\frac{39-46}{43}$	$\frac{16-30}{23}$	$\frac{7-29}{18}$	
В среднем для области IIb	5	$\frac{0-16}{9}$	$\frac{34-46}{40}$	$\frac{16-46}{34}$	$\frac{7-29}{17}$	

Примечание. В числителе дроби – диапазон значений повторяемости максимальных срочных годовых уровней воды за сезон, %; в знаменателе – средняя повторяемость максимальных срочных годовых уровней воды группы рек за сезон, %; группы рек в рамках одной области расположены в порядке убывания повторяемости максимумов уровней воды преобладающего сезона.

Таблица 4. Сезонное распределение максимальных срочных годовых уровней воды на реках Северного Кавказа. Область III

Table 4. Seasonal distribution of maximum urgent annual water levels in the rivers of the North Caucasus. Area III

Реки в области	Кол-во г/п	Повторяемость дат, %				Диа- грамма распреде- ления
		зимних	весенних	летних	осенних	
Область III						
Eh_{max} Бассейн Самура (Кара-Самур, Курах)	2	$\frac{0-11}{6}$	$\frac{15-28}{21}$	$\frac{64-74}{69}$	$\frac{0-8}{4}$	
Eh_{max} Бассейн Кубани (Большая Лаба, Кубань, Уруп, Чамлык)	6	$\frac{0-4}{2}$	$\frac{13-42}{28}$	$\frac{53-78}{63}$	$\frac{0-22}{7}$	
Eh_{max} Бассейн Терека (Нальчик, Терек, Урсдон, Фиагдон)	5	$\frac{0-27}{9}$	$\frac{9-41}{26}$	$\frac{54-77}{63}$	$\frac{0-5}{2}$	
Eh_{max} Бассейн Сулака (Сулак)	1	20	11	58	11	
Eh_{max} Бассейн Кумы (Кума, Золка)	3	$\frac{0-15}{7}$	$\frac{19-40}{33}$	$\frac{15-55}{53}$	$\frac{5-12}{7}$	
В среднем для области III	17	$\frac{0-27}{6}$	$\frac{9-42}{27}$	$\frac{51-78}{62}$	$\frac{0-22}{5}$	

Примечание. В числителе дроби – диапазон значений повторяемости максимальных срочных годовых уровней воды за сезон, %; в знаменателе – средняя повторяемость максимальных срочных годовых уровней воды группы рек за сезон, %; группы рек в рамках одной области расположены в порядке убывания повторяемости максимумов уровней воды преобладающего сезона.

Область IV (см. рисунок) представлена реками бассейнов Терека, Самура и Сулака. К данной области относятся участки рек в створе 16 гидрологических постов, 10 из них – на реках бассейна Терека, 3 – Самура, 3 – Сулака. Здесь доля летних максимумов уровней воды в общей структуре сезонного распределения за период наблюдения наибольшая: в среднем для области она составляет 89 % при наибольшем значении 100 % на р. Цея

в створе пгт Бурон и на р. Терек в створе с. Хангиш-Юрт (табл. 5). Значительные доли летних максимумов – выше 90 % случаев за период – также отмечены на р. Казикумухское Койсу у с. Гергебиль (95 %), на р. Терек в створе г. Владикавказ (93 %), р. Урух в створе с. Хазнидон (90 %), р. Малка в створе ст. Прохладная (93 %), р. Баксан близ с. Заюково (95 %), р. Чегем у с. Нижний Чегем (95 %).

Таблица 5. Сезонное распределение максимальных срочных годовых уровней воды на реках Северного Кавказа. Область IV

Table 5. Seasonal distribution of maximum urgent annual water levels in the rivers of the North Caucasus. Area IV

Реки в области	Кол-во г/п	Повторяемость дат, %				Диа- грамма распреде- ления
		зимних	весенних	летних	осенних	
Область IV						
<i>E</i> Бассейн Терека (Баксан, Малка, Терек, Урух, Цея, Чегем)	10	$\frac{0-8}{1}$	$\frac{0-18}{6}$	$\frac{81-100}{92}$	$\frac{0-5}{1}$	
<i>E</i> Бассейн Сулака (Аварское Койсу, Андийское Койсу, Казикумухское Койсу)	3	0	$\frac{5-19}{12}$	$\frac{81-95}{86}$	$\frac{0-5}{2}$	
<i>E</i> Бассейн Самура (Самур)	3	0	$\frac{9-13}{12}$	$\frac{83-87}{84}$	4	
В среднем для области IV	16	$\frac{0-8}{1}$	$\frac{0-19}{8}$	$\frac{81-100}{89}$	$\frac{0-5}{2}$	

Примечание. В числителе дроби – диапазон значений повторяемости максимальных срочных годовых уровней воды за сезон, %; в знаменателе – средняя повторяемость максимальных срочных годовых уровней воды группы рек за сезон, %; группы рек в рамках одной области расположены в порядке убывания повторяемости максимумов уровней воды преобладающего сезона.

Обсуждение

Классификация рек Северного Кавказа по датам прохождения максимальных уровней воды в пределах тех или иных сезонов, основанная на принципах классификации М.И. Львовича, выполнена впервые. Значимость предложенной классификации заключается в том, что она обобщает

основные закономерности распределения максимальных уровней воды по сезонам в регионе. Преимуществом классификации является ее универсальность: классификация может быть применена к рекам других географических областей. Предложенная классификация также может быть усложнена сведениями о месяцах прохождения максимальных уровней воды на реках, а также информацией о генезисе максимумов уровней воды.

Предложенное районирование рек Северного Кавказа показало свою успешность – области с характерным сезонным распределением максимальных уровней воды географически четко идентифицированы. Это подтверждают и результаты сопоставления предложенной классификации рек Северного Кавказа с картой водного режима рек России и сопредельных территорий [1], отражающей типы водного режима рек, выделенные на основе данных о внутригодовом распределении стока репрезентативных створов. Несмотря на существенные различия между классификациями, их сопоставление выявило схожие очертания областей с характерным типом сезонного распределения максимальных уровней воды и схожими чертами внутригодового распределения стока. Так, например, границы области III в бассейне Кубани, включающей участки рек с преимущественно летними максимумами уровней воды, повторяют очертания области, к которой по [1] отнесены горные реки с весенне-летним половодьем. Аналогичная ситуация наблюдается при рассмотрении области IV, объединяющей участки рек бассейна Терека с почти исключительно летними максимумами уровней воды, очертания которой соответствуют области рек с летним половодьем.

Сопоставление выявило, что на отдельных участках Северного Кавказа одна область с характерным сезонным распределением максимальных уровней воды включает в себе несколько областей с различным типом водного режима рек, при этом, однако, распределение уровней воды по сезонам коррелирует с особенностями распределения наибольшего стока. Так, 6 из 7 створов области IIa с наблюдаемым за рассматриваемый период смешанным сезонным распределением максимальных уровней воды ($ah_{max}-hh_{max}-ph_{max}$) находятся в области, для рек которой, по [1], характерны паводки в течение всего года. Исключение составляет один пост в створе пос. Гузерибль на р. Белая, который отнесен к типу рек с весенним половодьем, в то время как сезонное распределение максимумов уровней воды за период характеризуется как смешанное с преобладанием осенних экстремумов. В область IIb ($eh_{max}-ph_{max}$) предложенной классификации входят реки с дождевыми паводками теплого периода, за исключением участка р. Малая Лаба в створе с. Бурное, который отнесен к типу рек с весенне-летним половодьем, хотя распределение уровней по сезонам определено как смешанное с преобладанием летних максимумов. Сопоставление классификаций в пределах области I (реки с преимущественно зимними максимумами уровней воды) за рассматриваемый период, напротив, выявило существенные их различия. Для участков р. Вулан в с. Архипо-

Осиповка и р. Адегой в ст. Шапсугская по [1] характерны паводки в течение всего года, р. Пшиш в створах г. Хадыженск и ст. Бжедуховская отнесена к типу рек с дождевыми паводками теплого периода. Только три участка на реках Афипс, Убинка и Адагум можно привести в соответствие с [1]: они охарактеризованы как участки рек с паводками преимущественно осенью и зимой.

Показанные различия в районировании рек оправданы, они объясняются тем, что, во-первых, за основу предложенной автором классификации рек Северного Кавказа взяты сведения об уровнях воды, в классификации же [1] рассмотрен сток воды. Во-вторых, в предложенной классификации тип рек определен по одному параметру – сезону прохождения максимального уровня воды, в то время как в [1] районирование рек выполнено с учетом возможных различий стока зимнего и летне-осеннего периодов.

Однако во всякой классификации существуют некоторые исключения и обобщения, в том числе и в предложенном районировании рек Северного Кавказа. Так, в результате анализа сезонного распределения максимальных уровней воды два участка рек не отнесены к одной из областей и выделены отдельно. Для участка р. Кубань в створе ст. Ладожская характерны почти исключительно летние максимальные уровни воды за рассматриваемый период – 82 % (E), в то время как близлежащие посты выше по течению (область III) имеют преимущественно летние максимумы, не превышающие 78 % (р. Кубань – с. Успенское). Однако ввиду того, что значение повторяемости летних дат, по данным поста в ст. Ладожская, приближено к граничному значению существующей классификации – 80 %, с некоторым допущением участок р. Кубань в створе ст. Ладожская можно охарактеризовать тяготеющим к области III, хотя в целом его сезонное распределение свойственно участкам рек области IV.

Несколько иная ситуация сложилась при исследовании сезонного распределения максимумов уровней воды, зафиксированных на р. Кума в створе ст. Александрийская. Доля весенних максимумов за рассматриваемый период здесь составляет 49 % (ph_{max}), что также является практически граничным значением, равным 50 %. Однако другие посты на р. Кума, задействованные в исследовании, расположенные ниже по течению, имеют преимущественно летние максимумы (Eh_{max}). В данном случае участок р. Кума близ ст. Александрийская назвать тяготеющим к группе рек бассейна Кумы области III едва ли допустимо.

Выводы

В рамках данного исследования рассмотрены сроки прохождения максимальных срочных годовых уровней воды на реках Северного Кавказа за период 1961–2017 гг. На основе анализа сезонности их распределения предложена классификация рек Северного Кавказа, выполненная по подобию классификации рек М.И. Львовича. Из 12 теоретически возможных

типов сезонного распределения годовых максимумов уровней воды подробно описаны 7 основных типов, встречающихся на реках Северного Кавказа. Самой многочисленной является группа рек с летними максимумами уровней воды, к наиболее распространенным относятся типы рек с почти исключительно летними максимумами (E , более 80 % случаев за период) и преимущественно летними максимумами (Eh_{max} , 50–80 %).

Выявлены географические закономерности в сезонном распределении максимальных уровней воды, которые легли в основу выделения четырех характерных областей (I–IV) на территории Северного Кавказа. Область I представлена левыми притоками р. Кубань в ее нижнем течении и р. Вулан, для которых свойственно прохождение максимумов уровней воды преимущественно в зимний сезон (Hh_{max}) за рассматриваемый период. К областям IIa и IIb относятся участки рек, имеющие смешанное распределение сроков прохождения максимальных уровней воды с преобладанием осенних дат (ah_{max}) для области IIa и весенних дат (ph_{max}) для области IIb. Причем к области IIa отнесены реки южной части Черноморского побережья Кавказа и левые притоки р. Кубань, к области IIa – левые притоки р. Кубань в ее среднем течении. Область III, наиболее широко представленная на территории Северного Кавказа, включает участки рек с преимущественно летними максимумами за рассматриваемый период (Eh_{max}). В область IV входят участки рек бассейна Терека, Сулака и Самура с почти исключительно летними максимумами (E) в структуре сезонного распределения за рассматриваемый период.

Для рек Северного Кавказа установлены следующие закономерности в сезонном распределении максимальных уровней воды, наблюдаемых за период 1961–2017 гг.:

1. Характерные для северо-восточной части Черноморского побережья Кавказа преимущественно зимние максимальные уровни воды к югу побережья сменяются пестрой картиной сезонного распределения с преобладанием в его структуре осенних максимумов (от области I к области IIa).

2. При удалении от Черного моря к западу, вглубь материковой части, смешанное распределение сроков прохождения максимумов уровней воды сменяется сначала преобладанием весенних максимумов от области IIa к области IIb, а затем переходит в область с преобладанием летних максимумов в структуре сезонного распределения от области IIb к области III (бассейн Кубани). Доля зимних максимумов, напротив, заметно сокращается от области IIa к области III.

3. При движении с северо-запада на юго-восток Северного Кавказа доля зимних максимумов заметно уменьшается, в то же время в структуре сезонного распределения наблюдаются преимущественно летние или почти исключительно летние максимумы уровней воды от области I к областям III и IV (бассейн Самура).

4. Выявлена пространственная неоднородность сезонного распределения максимальных уровней воды в пределах бассейнов крупных рек Северного Кавказа. Различная степень вклада летних максимумов свойственна отдельным участкам рек Кубань, Лаба, Терек, Сулак и Самур (Eh_{max} и E). К рекам с максимумами уровней воды в пределах нескольких сезонов относятся приток р. Кубани, р. Белая (ah_{max} , ph_{max}) и р. Кума (Eh_{max} , ph_{max}).

Таким образом, сведения о сроках прохождения максимальных срочных годовых уровней воды позволили выполнить анализ сезонного распределения, выявить их географические закономерности и установить границы областей с характерным распределением максимальных уровней по сезонам.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-35-90120). The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project № 20-35-90120).

Благодарности. Автор выражает признательность научному руководителю, профессору, д.г.н., зав. кафедрой гидрологии суши Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова Н.Л. Фроловой, к.г.н., с.н.с. Института водных проблем РАН Е.П. Рец и д.г.н., профессору, г.н.с. Гидрометцентра России А.В. Христофорову за ценные рекомендации по улучшению текста рукописи.

Acknowledgements. The author expresses gratitude to the scientific supervisor, Doctor of Geographical Sciences, Professor, the Head of Land Hydrology Department of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University N.L. Frolova, Candidate of Geographical Sciences, Senior researcher of Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences E.P. Rets and Doctor of Geographical Sciences, Professor, Principal researcher of Russian Hydrometeorological Center A.V. Khristoforov for valuable recommendations on preserving the text of the manuscript.

Список литературы

1. Водный режим рек России и сопредельных территорий: Карта для высших учеб. заведений / Геогр. фак. МГУ и др. Новосибирск: Роскартография, 2001.
2. Воробьев Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы. М.: ООО «ДЭК-ПРЕСС», 2003. 352 с.
3. Гладкевич Г.И., Терский П.Н., Фролова Н.Л. Оценка опасности наводнений на территории Российской Федерации // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. № 2. С. 29-46.
4. Львович М.И. Опыт классификации рек СССР // Труды ГГИ. 1938. Вып. 6. С. 58-108.
5. Львович М.И. Элементы режима рек земного шара. М.: Гидрометеиздат, 1945. 126 с.
6. Мельникова Т.Н. Максимальный сток дождевых паводков рек Северо-Западного Кавказа // Вестник Адыг. Гос. Университета. Серия 5: География. 2011. № 3. С. 25.
7. Мироненко А.А., Рец Е.П., Фролова Н.Л. Оценка и картографирование опасности наводнений на Северном Кавказе: обзор и сопоставление существующих подходов // Геориск. 2018. Т. XII, № 2. С. 26-36.

8. Мироненко А.А., Рец Е.П., Фролова Н.Л. Современная динамика показателей опасности наводнений на реках Северного Кавказа России // Водные ресурсы. 2022. Т. 49, № 2. С. 225-237.
9. Фалеев М.И., Черных Г.С., Старостин А.С. Оценка опасностей и угроз, обусловленных катастрофическими наводнениями, и предложения по защите населения и территорий от них // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2014. Т. 4, № 2. С. 18-32.
10. Юмина, Н.М., Рец, Е.П. Совершенствование системы мониторинга опасных паводков на реках Северного Кавказа // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. № 1. С. 47-62.
11. *Apel H., Bruno M., Thielen A.* Quantification of uncertainties in flood risk assessment // *International Journal of River Basin Management*. 2008. Vol. 6. P. 149-162.
12. *Arnell N.W., Gosling S.N.* The impacts of climate change on river flood risk at the global scale // *Climatic Change*. 2016. Vol. 134. P. 387-401.
13. *Blöschl G., Hall J., Parajka J., Perdigão R.A.P et al.* Changing climate shifts timing of European floods // *Science*. 2017. Vol. 357. P. 588-590.
14. *Blöschl G., Hall J., Viglione A., Perdigao R.A.P, et al* Changing climate both increases and decreases European river floods // *Nature*. 2019. Vol. 573. P. 108-111.
15. *Demuth S., Gustard A., Planos E., Scatena F., Servat E.* *Climate Variability and Change – Hydrological Impacts*. Wallingford: IAHS Press, 2006. 308 p.
16. *DeVries B., Huang C., Armston J., Huang W., Jones J.W., Lang M.W.* Rapid and robust monitoring of flood events using Sentinel-1 and Landsat data on the Google Earth Engine // *Remote Sensing of Environment*. 2020, Vol. 240. DOI:10.1016/j.rse.2020.111664
17. *Frolova N.L., Kireeva M.B., Magritskiy D.V., Bolgov M.B., Kopylov V.N., Hall J., Semenov V.A., Kosolapov A.E., Dorozhkin E.V., Korobkina E.A., Rets E.P., Akutina Y., Dzhamalov R.G., Efremova N.A., Sazonov A.A., Agafonova S.A., Belyakova P.A.* Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment // *Natural Hazards*. 2016. Vol. 88, no. 1. P. 103-131.
18. IPCC: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change // *Field C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2012. 582 pp.
19. *Rets E.P., Durmanov I.N., Kireeva M.B.* Peak Runoff in the North Caucasus: Recent Trends in Magnitude, Variation and Timing // *Water Resources*, 2019. Vol. 46. P. S56-S66.
20. *Rets E.P., Dzhamalov R.G., Kireeva M.B., Frolova N.L., Durmanov I.N., Telegina A.A., Telegina E.A., Grigoriev V.Y.* Recent trends of river runoff in the North Caucasus // *Geogr., Environ., Sustain*. 2018. Vol. 11. P. 61-70.
21. *Rets E., Kireeva M.* Hazardous hydrological processes in mountainous areas under the impact of recent climate change: case study of Terek River basin // *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources: proc. of the Sixth World FRIEND Conference, IAHS Publ.*, 2010. Vol. 340. P. 126-134.

References

1. *Vodnyy rezhim rek Rossii i sopedel'nyh territoriy*: Karta dlya vysshih ucheb. zavedeniy [Water regime of rivers of Russia and adjacent territories: Map for higher educational institutions]. Geogr. fak. MGU i dr. Novosibirsk: Roskartografiya publ., 2001 [in Russ.].
2. *Vorob'ev Yu.L., Akimov V.A., Sokolov Yu.I.* *Katastroficheskie navodneniya nachala XXI veka: uroki i vyvody* [Catastrophic floods of the early twenty-first century: lessons and conclusions]. Moscow: OOO «DEKS-PRESS» publ., 2003, 352 p. [in Russ.].
3. *Gladkevich G.I., Terskiy P.N., Frolova N.L.* *Otsenka opasnosti navodneniy na territorii Rossiyskoy Federatsii* [Flood hazard assessment on the territory of the Russian Federation]. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management], 2012, no. 2, pp. 29-46 [in Russ.].

4. L'vovich M.I. Opyt klassifikatsii rek SSSR [Experience in classifying rivers of the USSR]. *Trudy GGI*, 1938, vyp. 6, pp. 58-108 [in Russ.].
5. L'vovich M.I. Elementy rezhima rek zemnogo shara [Elements of the globe's river regime]. Moscow: Gidrometeoizdat publ., 1945, 126 p. [in Russ.].
6. Mel'nikova T.N. Maksimal'nyy stok dozhdevykh pavodkov rek Severo-Zapadnogo Kavkaza [Maximum rainfall flood runoff in rivers of the North-West Caucasus]. *Vestnik Adyg. Gos. Universiteta. Seriya 5: Geografiya*, 2011, no. 3, p. 25 [in Russ.].
7. Mironenko A.A., Rets E.P., Frolova N.L. Otsenka i kartografirovaniye opasnosti navodneniy na Severnom Kavkaze: obzor i sopostavleniye sushchestvuyushchikh podkhodov [Flood hazard evaluation and mapping in the Northern Caucasus: review and comparison of existing approaches]. *Georisk*, 2018, vol. XII, no. 2. pp. 26-36 [in Russ.].
8. Mironenko A.A., Frolova N.L., Rets E.P. Present-day dynamics of flood hazard characteristics in rivers in the North Caucasus, Russia. *Water Resources*. 2022, vol. 49, no. 2, pp. 271-282.
9. Faleev M.I., Chernykh G.S., Starostin A.S. Otsenka opasnostey i ugroz, obuslovlennykh katastroficheskimi navodneniyami, i predlozheniya po zashchite naseleniya i territoriy ot nikh [Assessment of hazards and threats caused by catastrophic floods and proposals for the protection of population and territories from them]. *Strategiya grazhdanskoj zashchity: problemy i issledovaniya*, 2014, vol. 4, no. 2, p. 18-32 [in Russ.].
10. Yumina N.M., Rets Y.P. Sovershenstvovaniye sistemy monitoringa opasnykh pavodkov na rekah Severnogo Kavkaza. *Vodnoe khozyaystvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravleniye* [Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management], 2012, no. 1, pp. 47-62 [in Russ.].
11. Apel H., Bruno M., Thielen, A. Quantification of uncertainties in flood risk assessment. *International Journal of River Basin Management*, 2008, vol. 6, pp. 149-162.
12. Arnell N.W., Gosling S.N. The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*. 2016, vol. 134, pp. 387-401. DOI: 10.1007/s10584-014-1084-5
13. Blöschl G., Hall J., Parajka J., Perdigão R.A.P., Merz B., Arheimer B., Aronica G.T., Bilibashi A., Bonacci O., Borga M., Čanjevac I., Castellarin A., Chirico G.B., Claps P., Fiala K., Frolova N., Gorbachova L., Gül A., Hannaford J., Harrigan S., Kireeva M., Kiss A., Kjeldsen T.R., Kohnová S., Koskela J.J., Ledvinka O., Macdonald N., Mavrova-Guirguinova M., Mediero L., Merz R., Molnar P., Montanari A., Murphy C., Osuch M., Ovcharuk V., Radevski I., Rogger M., Salinas J.L., Sauquet E., Šraj M., Szolgay J., Viglione A., Volpi E., Wilson D., Zaimi K., Živković N. Changing climate shifts timing of European floods». *Science*, 2017, vol. 357, pp. 588-590.
14. Blöschl G., Hall J., Viglione A., Perdigao R.A.P., Parajka J., Merz B., Lun D., Arheimer B., Aronica G.T., Bilibashi A., Bohac M., Bonacci O., Borga M., Canjevac I., Castellarin A., Chirico G.B., Claps P., Frolova N., Ganora D., Gorbachova L., Gul A., Hannaford J., Harrigan S., Kireeva M., Kiss A., Kjeldsen T., Kohnova S., Koskela J.J., Ledvinka O., Macdonald N., Mavrova-Guirguinova M., Mediero L., Merz R., Molnar P., Montanari A., Murphy C., Osuch M., Ovcharuk V., Radevski I., Salinas J.L., Sauquet E., Sraj M., Szolgay J., Volpi E., Wilson D., Zaimi K., Živkovic N. Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*. 2019, vol. 573, pp. 108-111.
15. Demuth S., Gustard A., Planos E., Scatena F., Servat E. Climate Variability and Change – Hydrological Impacts. *Wallingford: IAHS Press*. 2006, 308 p.
16. DeVries B., Huang C., Armston J., Huang W., Jones J.W., Lang M.W. Rapid and robust monitoring of flood events using Sentinel-1 and Landsat data on the Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*. 2020, vol. 240. DOI:10.1016/j.rse.2020.111664
17. Frolova N.L., Kireeva M.B., Magritckiy D.V., Bolgov M.B., Kopylov V.N., Hall J., Semenov V.A., Kosolapov A.E., Dorozhkin E.V., Korobkina E.A., Rets E.P., Akutina Y., Dzhamalov R.G., Efremova N.A., Sazonov A.A., Agafonova S.A., Belyakova P.A. Hydrological hazards in Russia: origin, classification, changes and risk assessment. *Natural Hazards*. 2016, vol. 88, no. 1, pp. 103-131.
18. IPCC: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 2012, 582 pp.

19. Rets E.P., Durmanov I.N., Kireeva M.B. Peak Runoff in the North Caucasus: Recent Trends in Magnitude, Variation and Timing. *Water Resources*. 2019, vol. 46, pp. S56–S66.

20. Rets E.P., Dzhamalov R.G., Kireeva M.B., Frolova N.L., Durmanov I.N., Telegina A.A., Telegina E.A., Grigoriev V.Y. Recent trends of river runoff in the North Caucasus. *Geogr., Environ., Sustain.* 2018, vol. 11, pp. 61-70.

21. Rets E., Kireeva M. Hazardous hydrological processes in mountainous areas under the impact of recent climate change: case study of Terek River basin. *Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources: proc. of the Sixth World FRIEND Conference*, IAHS Publ., 2010, vol. 340, pp. 126-134.

*Поступила 08.09.2023; одобрена после рецензирования 20.09.2023;
принята в печать 06.10.2023.*

*Submitted 08.09.2023; approved after reviewing 20.09.2023;
accepted for publication 06.10.2023.*