

УДК 556.5

ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ОСАДКИ И НАВОДНЕНИЯ В БАССЕЙНЕ РЕКИ АБАКАН

© 2024 г. Ю. Н. Курочкин^{а, *}, К. В. Чистяков^{а, **}, М. В. Сыромятина^{а, ***}

^аСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: y.kurochkin@spbu.ru

**E-mail: k.chistyakov@spbu.ru

***E-mail: m.syromyatina@spbu.ru

Поступила в редакцию 21.12.2023 г.

После доработки 05.11.2024 г.

Принята к публикации 03.12.2024 г.

В статье проводится статистический анализ динамики максимальных расходов воды на реке Абакан и экстремальных по интенсивности осадков в бассейне этой реки с целью выявления решающей роли последних в формировании высоких и катастрофических наводнений. Анализируется детальный характер взаимосвязей таких наводнений с экстремальными осадками на конкретных примерах 2014 и 2021 гг.. Наводнения в классах от высоких до катастрофических в подавляющем количестве случаев происходят по схеме наложения паводков на половодье. Выявлена особая роль пентадных (5-суточных) максимальных по интенсивности осадков в возникновении именно катастрофических наводнений. Также приводится разработанная множественная регрессионная модель зависимости максимального расхода воды от трех (из 12) статистически значимых климатических предикторов имеющая вполне приемлемые характеристики достоверности и точности.

Ключевые слова: экстремальные осадки, интенсивность осадков, максимальные расходы воды, катастрофические наводнения, река Абакан

DOI: 10.31857/S0869607124040031, EDN: MOUVKF

ВВЕДЕНИЕ

Общеизвестно, что основным стокообразующим фактором являются осадки и, вероятно, из них именно экстремальные способны играть главную роль в формировании максимальных расходов воды с высокой вероятностью наводнений. Для проверки этого предположения был выбран бассейн реки Абакан с имеющимися у авторов данными по ежегодному максимальному расходу воды этой реки, расположенной в центре Алтае-Саянской горной страны и определена пространственно-временная структура осадков в этом бассейне, особенно частоты и интенсивности их экстремальных проявлений (рис. 1). Существует вероятность увеличения частоты опасных гидрологических явлений (ОГЯ) в южной части Сибирского ФО и, в частности, в бассейне р. Абакан [6]. Здесь наиболее опасными, по ряду признаков, относящихся к классу катастрофических, на данный момент времени можно считать наводнения 1969 и 2014 гг. [7]. Кроме того, в 2021 г. зарегистрировано наводнение, очень близкое по своим характеристикам к катастрофическому, относящееся к классу выдающихся (по классификации МЧС). Во всяком случае, режим ЧС в 2021 г. местные власти вводили и ущерб был нанесен значительный. При этом все

указанные выше наводнения происходили в мае. Характер этих наводнений предположительно связан с явлением наложения экстремальных паводковых вод на уже сформированное большое половодье.

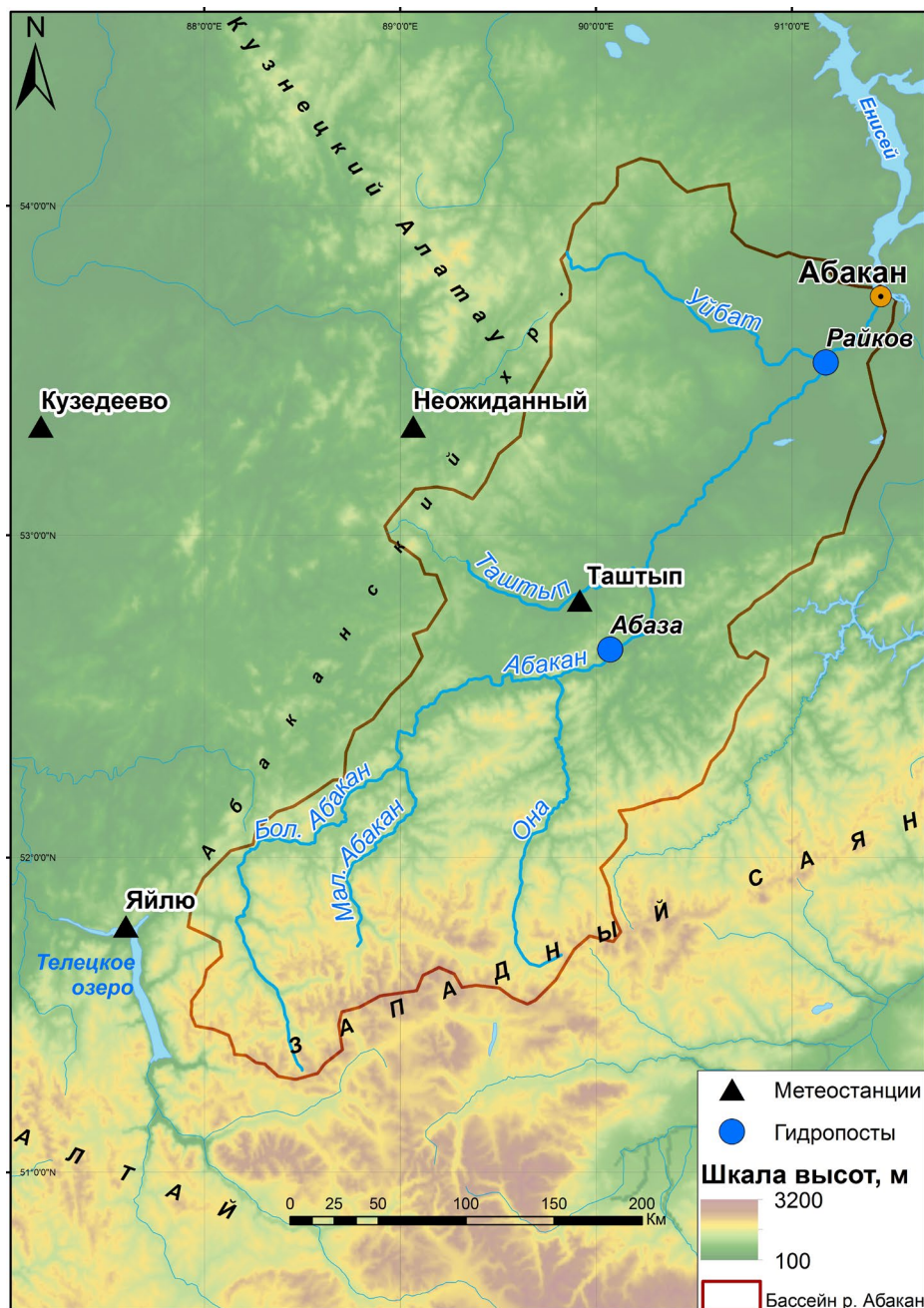


Рис. 1. Район исследования.

Fig. 1. Study area.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При очень низкой плотности метеостанций в данном регионе встал вопрос о выборе наиболее репрезентативной для последующего включения ее данных в схему “экстремальные осадки — экстремальный расход воды — ОГЯ (опасные гидрологические явления)” [2]. В качестве основных рассматривались метеостанции (м/с), расположенные на пути влагонесущих потоков и находящиеся на достаточно близком расстоянии от территории бассейна, особенно его горной части и на самой территории. Исходя из этого, были выбраны следующие м/с: Неожданный, Кузедеево, Яйлю и Таштып (рис. 1). Последняя расположена непосредственно в бассейне реки Абакан, но не может считаться репрезентативной для объективной оценки суммарных осадков, особенно выпадающих в горной части бассейна, в силу нахождения достаточно далеко от нее в орографической тени и общего относительно малого количества регистрируемых осадков (в 2–2.5 раза меньше, чем на остальных м/с). Тем не менее для оценки степени взаимосвязи между всеми задействованными м/с был проведен корреляционный анализ рядов месячных и годовых сумм осадков за период 1961–2021 гг., выявивший наиболее тесную связь между м/с Яйлю и м/с Таштып. Учитывая эту связь, а также весьма близкое расположение м/с Яйлю к верхней части бассейна р. Абакан и ее удачное нахождение по направлению основного вектора влагопереноса, данная метеостанция была выбрана опорной в дальнейших расчетах. Климатические данные взяты из архива ВНИИГМИ-МЦД.

Кроме того, было выдвинуто предположение, что при учете осадков наиболее важным показателем является их интенсивность. Причем она во времени сильно изменяется: осадки нередко начинаются в виде мороси, переходят в ливень, наконец, ослабевают и прекращаются и сразу снова начинаются. В таких случаях определить интенсивность и продолжительность отдельного дождя очень трудно [8]. При максимальных интенсивностях за 20 мин может выпасть почти половина месячной нормы осадков, а слой воды при этом составит около 30 мм, что и было зарегистрировано в мае 2014 г. на м/с Яйлю. Для более объективного подхода и с учетом доступности гидрометеорологической информации в данном исследовании для начальной проверки были выбраны осредненные характеристики максимальной непрерывной 1-, 2-, 3-, 4- и 5-суточной интенсивности майских осадков за весь период наблюдений 1961–2021 гг. и современный 30-летний (1991–2021 гг.) на м/с Яйлю, представленные ниже в табл. 1 и их хронологический ход с 1961 по 2021 гг. на рис. 2.

Таблица 1. Основные статистические показатели непрерывной 1-, 2-, 3-, 4- и 5-ти суточной интенсивности майских осадков на м/с Яйлю за весь и современный период наблюдений

Table 1. Main statistical indicators of continuous 1-, 2-, 3-, 4- and 5-day intensity of May precipitation at the Yailyu weather station for the entire and current observation period

	1 сутки	2 суток	3 суток	4 суток	5 суток
САЗ 1961–2021 (мм)	23.2	32.5	36.9	41.4	44.4
САЗ 1991–2021 (мм)	25.8	34.7	39.8	46.1	50.8
Кт 1961–2021(мм/10 лет)	0.1	0.1	0.6	1.6	2.2
Кт 1991–2021 (мм/10 лет)	2.4	2.5	3.9	5.5	7.4

Кт — коэффициенты линейного тренда.

Курсивом показаны статистически незначимые Кт на уровне $\alpha = 0.05$.

САЗ — среднее арифметическое значение максимальной интенсивности.

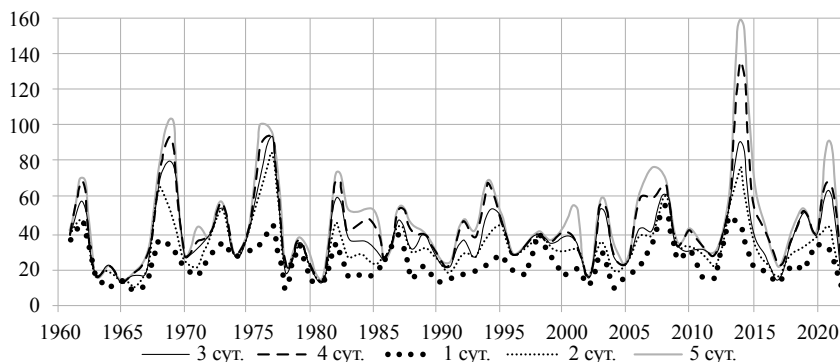


Рис. 2. Хронологический ход интенсивности майских осадков различной длительности (мм) на м/станции Яйлю.

Fig. 2. The intensity of May precipitation of various durations (mm) at the Yailu weather station.

Показатели интенсивности майских осадков также стремятся к общему увеличению и в абсолютном исчислении, и по скорости роста, причем наиболее впечатляющими являются 5-суточные (пентадные) показатели со скоростью роста более 7 мм/10 лет, средним значением на современном этапе в 51 мм.

Внутренняя взаимосвязь осадков различной интенсивности и продолжительности характеризуется предварительно рассчитанными весьма высокими коэффициентами парной корреляции от 0.83 до 0.94. Причем на графике отчетливо видны четыре пиковые составляющие 5-суточных майских осадков более 90 мм, приуроченные к известным наводнениям на Абакане 1969, 1976, 2014 и 2021 гг.. Для дальнейших исследований были выбраны осадки с 1-, 2-, 5-суточной интенсивностью, как наиболее характерные и уменьшающие объемы расчетов.

При анализе структуры осадков для удобства анализа и восприятия производилось условное разделение характеристик интенсивности осадков на аномальные и экстремальные по следующим принципам. Аномальные по интенсивности показатели осадков определялись абсолютной частотой их проявлений по трем основным градациям: 1-суточные более 30 мм, 2-суточные более 40 мм и 5-суточные более 60 мм и по двум основным 30-летним периодам: 1961–1990 гг. и 1991–2021 гг. За каждый месяц текущего года выбирался максимум по этим градациям, из которых, в свою очередь, выбирался годовой максимум с помощью программы ClimPACT. Годовые максимумы в подавляющем количестве случаев (около 95%) приходились на весенне-летний сезон (апрель–июнь). Для экстремальных по интенсивности показателей осадков, уже представляющих собой опасное природное явление и достаточно часто приводящих к катастрофическим процессам, была определена абсолютная частота их проявлений по следующим градациям: 1-суточные более 50 мм, 2-суточные более 60 мм и 5-суточные более 100 мм за те же два 30-летних периода и по той же методике, представленной выше.

Также был проведен анализ межгодовой изменчивости средних годовых и средних месячных расходов воды на гидропостях (г/п) Абаза и Райков, как фоновых характеристик динамики стока реки Абакан, и максимальных расходов воды.

Материалами для исследования послужили данные метеорологических и гидрологических станций и постов (рис. 1), данные ежегодных докладов и другие лите-

ратурные источники, результаты экспертных интервью, проведенных во время полевых работ, а также данные СМИ. Климатические данные взяты из архива ВНИ-ИГМИ-МЦД.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Общая картина временной изменчивости поверхностного стока в бассейне реки Абакан почти аналогична всему бассейну Верхнего Енисея [3]. Тенденция к некоторому увеличению его среднего годового значения имеется, но выражена очень слабо (коэффициенты тренда статистически незначимы на уровне $\alpha = 0.05$). Тем не менее за весь период наблюдений (90 лет) общая прибавка в значениях среднего годового расхода на замыкающем створе Райков при коэффициенте линейной аппроксимации (тренда) $5.7 \text{ м}^3/10 \text{ лет}$ достигла $50 \text{ м}^3/\text{с}$, что составляет почти 13% от среднего многолетнего значения и заставляет предполагать дальнейшее его увеличение. На г/п Абаза эта прибавка составила $39 \text{ м}^3/\text{с}$ при доле в 12%. На этом же г/п для выявления внутригодовой структуры динамики изменений средних расходов воды были рассчитаны средние месячные расходы, коэффициенты тренда (КТ), общий прирост (убыль) в процентах и в абсолютном измерении в $\text{м}^3/\text{с}$ по двум периодам 1932–2021 гг. и за последние 30 лет 1991–2021 гг., что позволило косвенно определить явные вклады некоторых месяцев в общую картину изменения расходов (табл. 2).

Анализ таблицы показывает, что за оба периода основной вклад в увеличение годовых расходов вносит апрель, особенно в последние 30 лет, когда прирост в $232 \text{ м}^3/\text{с}$ (80%) апрельского расхода почти сопоставим с его средним месячным значением, и май с его максимальными объемами переносимой воды. При этом следует отметить существенную роль и осенних месяцев, в частности октября с абсолютным приростом в $101 \text{ м}^3/\text{с}$ за весь период наблюдений. А вот летний сезон показывает убыль в величинах расходов, причем, если за весь период отличился июнь с потерей в $131 \text{ м}^3/\text{с}$ (14%), то на современном отрезке такие же потери наблюдаются уже в июле с относительной величиной в 26% и добавлением в отрицательный баланс показателей августа и сентября.

Для дальнейшего анализа частоты проявления различных по водности лет реки Абакан были использованы данные длинного ряда средних годовых расходов воды на г/п Абаза. Границы для выявления степени водности были определены по среднеквадратическому отклонению ($\sigma = 54 \text{ м}^3/\text{с}$) от многолетней нормы среднегодового расхода в $313 \text{ м}^3/\text{с}$. При значении отклонения более 1σ данный год в зависимости от знака отклонения считался или многоводным или маловодным. При этом годы с отклонением более 2σ отнесены к аномальным многоводным, более 1.5σ , но менее 2σ — к средним многоводным и более 1σ , но менее 1.5σ — к ординарным многоводным. Аналогичная разбивка сделана и для маловодных лет с учетом знака (табл. 3). В разряд средневодных попали годы со значениями отклонений не более $\pm 1\sigma$. С точки зрения оценки максимальных положительных (аномальных) значений среднего годового расхода следует обратить внимание на его значение в 1941 г. в $493 \text{ м}^3/\text{с}$ с превышением среднего годового за весь период на 3σ и этот год можно считать аномально многоводным с обеспеченностью близкой к 1%. В 1969 г. наблюдалось превышение среднего значения на 2σ и составляло $437 \text{ м}^3/\text{с}$ и этот год также можно отнести к аномально многоводным. В свою очередь к аномально маловодным годам причисляются 1945 и 1963 гг. со средними годовыми расходами $191 \text{ м}^3/\text{с}$ и $200 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно.

Таблица 2. Основные статистические показатели межгодовой и внутригодовой изменчивости средних месячных расходов воды на г/п Абаза
Table 2. Main statistical indicators of interannual and annual variability of average monthly water discharge at the Abaza hydrological station

Весь период 1932–2021 гг. (90 лет)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
Ср. расход	46.3	38.7	36.6	218.4	919.2	907.7	494.8	392	318.4	220.6	106.1	59.3	313.2
Кг м³/1 год	0.22	0.13	0.17	1.67	0.82	–1.52	0.19	0.94	0.52	1.18	0.75	0.38	0.45
Прирост (убыль) в %	41	29	40	66	8	–14	3	21	14	46	61	55	12
Прирост (убыль) в м³/с	19	11	15	144	71	–131	16	81	45	101	65	33	39
Период 1991–2021 гг. (30 лет)													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Год
Ср. расход	54.1	44.5	42.9	293	958	864	509	411.6	333.5	248.8	130.5	70	329.6
КТ м³/1 год	–0.12	–0.05	–0.12	7.74	2.81	1.81	–4.37	–2.33	–3.17	1.55	1.52	0.21	0.46
Прирост (убыль) в %	–7	–3	–8	80	9	6	–26	–17	–29	19	35	9	4
Прирост (убыль) в м³/с	–4	–2	–4	232	84	54	–131	–70	–95	47	46	6	14

Таблица 3. Многоводные и маловодные годы по данным г/п Абаза (классификация авторов)**Table 3.** High-water and low-water years according to data at the Abaza hydrological station (classification by the authors)

	Многоводные			Маловодные		
	Аномальные	Средние	Ординарные	Аномальные	Средние	Ординарные
Годы	1941, 1969	1938, 1942, 1995, 2006, 2010, 2013	1958, 1961, 1966, 1984, 1990, 2004, 2009	1945, 1963	1933, 1934, 1974, 2012	1939, 1940, 1951, 1955, 1965, 1968, 1971, 1998
Кол-во	2	6	7	2	4	8

Но особый интерес представляют сезонные и кратковременные периоды с резким повышением расходов воды, вызванным сочетанием различных гидрометеорологических параметров и приводящим к опасным гидрологическим явлениям [1]. Как отмечают авторы в своей работе [7, с. 59], “большая водность половодья ($Q_{ср. V-VI} \geq 980 \text{ м}^3/\text{с}$ в створе р. Абакан — г. Абаза, по данным многолетних гидрологических наблюдений) — это первый сигнал к формированию экстремально высоких среднесуточных расходов воды и, соответственно, наводнения в черте населенных пунктов по берегам р. Абакан, от г. Абаза и далее, вниз по течению до г. Абакан. В качестве граничного (критического) среднесуточного расхода, превышение которого и переводит расходы в разряд экстремальных, принят расход $2380 \text{ м}^3/\text{с}$, соответствующий уровню 490 см — высотной отметке неблагоприятного гидрологического явления, при достижении которого начинается подтопление части г. Абаза и полотно ж/д Абаза — Абакан (по данным Среднесибирского УГМС)”.

Поэтому, кроме осредненных годовых и суточных характеристик, весьма серьезный интерес при оценке динамики расходов представляет выявление особенностей пространственно-временного распределения критических значений расхода воды, и особенно его максимальной величины, зафиксированной в течение конкретного гидрологического года. Такой подход позволяет выявить даже краткосрочные (не более суток), но очень опасные подъемы воды. На г/п Абаза такое критическое значение, после которого, как правило, начинается затопление, выше среднесуточного и составляет $2640 \text{ м}^3/\text{с}$. Эта характеристика тесно связана с опасными явлениями наводнений на исследуемой территории. Для ее анализа были использованы данные из работы [9] за период с 1932 по 2018 гг., дополненные современными данными до 2021 г. [10] включительно по г/п Абаза. Временное распределение этих расходов представлено на рис. 3.

Анализ графика указывает на наличие двух катастрофических наводнений в 1969, 2014 гг. и выдающегося в 2021 г., что подтверждается и оперативной информацией [4, 5]. Значения максимального расхода в 6700 , 7100 и $5200 \text{ м}^3/\text{с}$ соответственно превышают отклонение от среднего многолетнего более чем на 2σ . При этом все три наводнения регистрировались именно во второй половине мая и провоцировались аномальными по интенсивности осадками. При максимальных значениях расхода более 1σ ($\sim 3500 \text{ м}^3/\text{с}$) и до 2σ наблюдались высокие наводнения, к которым можно отнести 1941, 1954, 1962, 2001, 2003, и 2006 гг. [4, 5, 6]. Основная доля высоких наводнений также происходила по схеме наложения паводковых вод на половодье, за исключением 2004 и 2011 гг., когда наводнения зафиксированы в середине апреля и были связаны с заторными явлениями. В остальные годы превышения критиче-

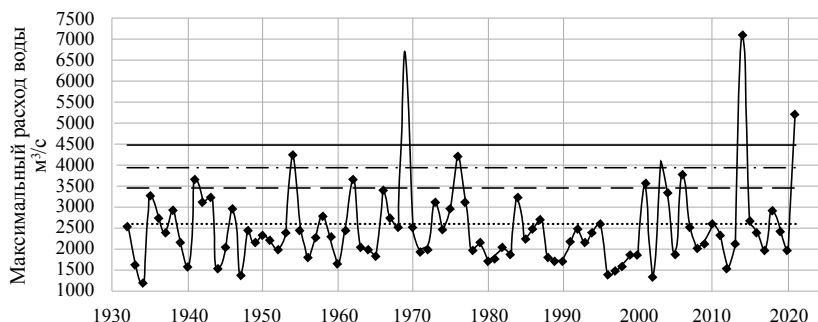


Рис. 3. Хронологический ход максимальных (зарегистрированных по одному наблюдению в год) расходов воды на г/п Абаза. Точечной линией указаны значения больше $2640 \text{ м}^3/\text{с}$ (критическое), при превышении которого начинается процесс затопления дачного и жилого сектора, не защищенного дамбами. Прерывистыми линиями указываются значения расхода более 16 , 156 , приводящие к высоким наводнениям и сплошной линией 26 — к выдающимся и катастрофическим.

Fig. 3. Maximum water discharge (recorded by one observation per year) at the Abaza hydrological station. The dotted line indicates values greater than $2640 \text{ м}^3/\text{с}$ (critical), when exceeded, the process of flooding of the dacha and residential sector not protected by dams begins. Broken lines indicate discharge values of more than 16 , 156 , leading to high floods, and a solid line 26 — to outstanding and catastrophic ones.

ского уровня определялись низкие наводнения с затоплением некоторых участков. Таких лет насчитывается 13. Всего за период в 89 лет зарегистрировано 27 превышений критической величины расхода воды, т.е. практически в среднем 1 раз в 3 года наблюдались по меньшей мере затопления селитбы. При этом следует отметить, что весьма спокойный период с 1978 по 2000 гг. всего с одним небольшим превышением, сменился периодом с 2001 по 2021 гг. обильным на наводнения, в том числе и катастрофическим 2014 г., хотя общая степень водности именно за этот год была низкой со средним годовым расходом всего $367 \text{ м}^3/\text{с}$ (средневодный год). Сравнение показателей среднего годового расхода воды и максимального расхода, зарегистрированного не менее 1 раза в год, показывает, что не всегда в многоводный год наблюдаются наводнения и наоборот — крупное наводнение может проявиться в средневодный год. Например, кроме 2014 г., такая же картина наблюдалась в 1954 г. (средневодный год — $343 \text{ м}^3/\text{с}$), а максимальный расход в $4230 \text{ м}^3/\text{с}$ привел к серьезному наводнению.

Далее приводятся результаты анализа частоты проявлений аномальных и экстремальных по интенсивности осадков по данным репрезентативной метеостанции (табл. 4).

Анализ табличных данных указывает на достаточно ошутимое увеличение частоты выпадения осадков и в аномальных и в экстремальных диапазонах интенсивности, причем в относительном измерении наибольший эффект наблюдается у пентадных осадков более 100 мм — около 60% .

Особый интерес представляют временные тенденции в изменчивости максимальных по интенсивности осадков. Их определение производилось по трем периодам: общему с 1961 по 2021 гг., “климатической нормы” с 1961 по 1990 гг. и современный 30-летний “новой климатической нормы” с 1991 по 2021 гг. Результаты расчетов представлены в табл. 5.

Таблица 4. Количество случаев с аномальными и экстремальными по интенсивности осадками за различные периоды**Table 4.** Number of cases with anomalous and extreme precipitation intensity for different periods

М\станция	1-суточные максимумы более 30 мм		2-суточные максимумы более 40 мм		5-суточные максимумы более 60 мм	
	1961–1990	1991–2021	1961–1990	1991–2021	1961–1990	1991–2021
Яйлю	27	28	27	27	27	29
	1-суточные максимумы более 50 мм		2-суточные максимумы более 60 мм		5-суточные максимумы более 100 мм	
	1961–1990	1991–2021	1961–1990	1991–2021	1961–1990	1991–2021
Яйлю	5	6	11	12	5	8

Таблица 5. Коэффициенты тренда (Кт) максимальных осадков 1-, 2-, и 5-суточной интенсивности (мм/10 лет) за различные периоды**Table 5.** Trend coefficients (Kt) of maximum precipitation of 1-, 2-, and 5-day intensity (mm/10 years) for various periods

М/станция	Длительность	1961–2021 гг.	1961–1990 гг.	1991–2021 гг.
Яйлю	1-суточные	–0.3	0.9	2.9
	2-суточные	1.7	1.0	5.9
	5-суточные	2.7	4.7	6.6

Курсивом показаны статистически незначимые Кт на уровне значимости $\alpha = 0.05$

Наибольший интерес в этой таблице представляет значение коэффициента тренда 5-суточных максимальных по интенсивности осадков за последние 30 лет, составляющий почти 7 мм прироста за 10 лет. Этот факт позволяет сделать предварительный вывод об увеличении роли такого типа осадков в образовании крупных наводнений.

Соотношение майских осадков и уровней воды реки Абакан (г/п Абаза) в 2014 и 2021 г. хорошо иллюстрируется ниже на рис. 4, 5. Можно отчетливо заметить, что при непрерывном нарастании интенсивности суточных осадков на м/с Яйлю (естественно, их основная масса выпадает в верхней части бассейна р. Абакан), стоковая волна из двух составляющих, половодья и паводка, достигает г/п Абаза приблизительно за 1 сутки после пикового значения осадков и создает реальную угрозу затопления практически всех населенных пунктов ниже по течению. Также хорошо заметны две предварительные волны половодья при наводнении 2014 г., в большей мере связанные с резким потеплением и таянием снега в горах. Первая волна определяется исключительно аномальной температурой 1-й декады мая, когда среднедекадная температура на м/с Яйлю достигала 11.5°C, средняя максимальная 20.2°C, а 9 мая был зарегистрирован максимум в 25.2°C, что вызвало интенсивное таяние снега в горах и предгорьях бассейна Абакана при его небольшой средней сезонной мощности в 18 см (на м/с Яйлю). Вторая волна уже имеет сочетанный характер: на развивающееся половодье накладывается паводок. Таким образом половодье с наложенным паводком продолжалось с 9 мая и по 2 июня 2014 г. В 2021 г. первая волна половодья также вызвана в основном термическими причинами: пентада с 5 по 9 мая отличилась средней суточной температурой 14.5°C, средней макси-

мальной 21.9°C, а максимум был зарегистрирован 7 мая и достигал 24.1°C, причем по сравнению с 2014 г. снега было накоплено в 2 раза больше — 39 см. А начиная с 18 мая наблюдается и увеличение количества осадков, и 5-суточный максимум в 75 мм привел к опасному подъему воды, хотя и с меньшим уровнем и ущербом, в сравнении с 2014 г.

Приблизительно такая же ситуация наблюдалась и при наводнениях 1969 и 1976 гг., но со своими особенностями внутримесячного распределения осадков.

Исходя из вышеизложенного материала, была разработана расчетная множественная регрессионная модель зависимости максимального расхода воды на г/п Абаза от ряда предикторов. Для этой модели рассматривалось 12 параметров: суммы осадков за весенние месяцы и отдельно за апрель и май, максимальная высота снежного покрова за сезон и максимальное содержание воды в снежном покрове, суммы твердых осадков за зимний сезон, средние месячные температуры за весенние месяцы и максимальные температуры за каждый весенний месяц. Расчеты производились только для тех лет, в которые регистрировались более чем средние наводнения.

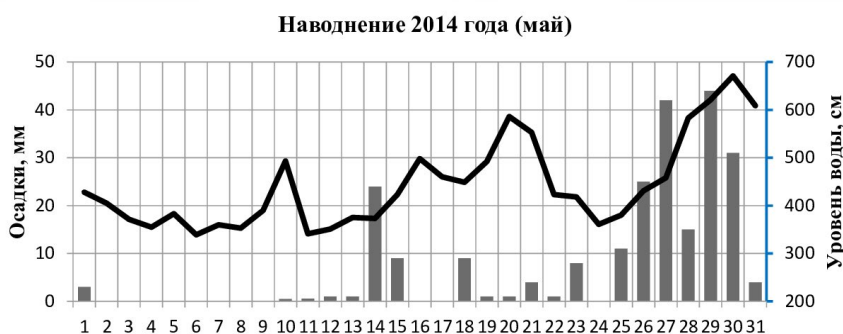


Рис. 4. Соотношение хода осадков на м/с Яйлю и уровней воды на г/п Абаза в мае 2014 г.

Fig. 4. The relationship between precipitation at the Yailyu weather station and the water levels at the Abaza hydrological station in May 2014.



Рис. 5. Соотношение хода осадков на м/с Яйлю и уровней воды на г/п Абаза в мае 2021 г.

Fig. 5. The relationship between the precipitation at the Yailyu weather station and the water levels at the Abaza hydrological station in May 2021.

Всего было задействовано 12 лет, отранжированных по убыванию максимального расхода (2014, 1969, 1941, 1976, 1954, 2003, 1962, 2001, 1966, 2006, 2007, 1984). Наилучший результат на начальный момент расчета (2020 г., без данных за 2021 г.) был получен при использовании 3-предикторов: сумма осадков за май, средняя температура апреля и количество твердых осадков за зимний сезон:

$$Y = 1376.4 + 16.14X_1 + 171.85X_2 + 0.98X_3, \quad (1)$$

где Y — максимальный расход воды в м³/с на г/п Абазы;

X_1 — сумма осадков в мае на м/с Яйлю (фактор паводка);

X_2 — средняя температура в апреле на м/с Яйлю (фактор половодья);

X_3 — сумма твердых осадков за зимний период на м/с Яйлю (фактор половодья).

Статистические характеристики модели:

- уравнение регрессии в целом статистически надежно (проверено F-статистикой по критерию Фишера);
- все коэффициенты регрессии в уравнении статистически значимы (по частным коэффициентам эластичности) за исключением последнего;
- стандартная ошибка предиктанта $S = 522.3$ м³/с;
- средняя ошибка аппроксимации $\delta A = 8.2\%$.

Рассчитанный по представленной модели максимальный расход воды в 2021 г. составил 5060 м³/с при фактическом в 5200 м³/с. Расхождение составило всего 140 м³/с, а после введения в модель фактических данных за 2021 год, ее аналитическое выражение незначительно изменилось с дополнительным улучшением качества:

$$Y = 1419.1 + 16.24X_1 + 171.27X_2 + 0.83X_3. \quad (2)$$

Статистические характеристики модели:

- уравнение регрессии в целом статистически надежно (проверка F-статистикой по критерию Фишера);
- все коэффициенты регрессии в уравнении статистически значимы (по частным коэффициентам эластичности) за исключением последнего;
- стандартная ошибка предиктанта $S = 480.4$ м³/с;
- средняя ошибка аппроксимации $\delta A = 7.3\%$.

Проверка уточненной модели на нескольких предыдущих годах, использованных в исходной модели, также показала удовлетворительный результат со следующими вариациями основного показателя, представленными в таб. 6.

Таблица 6. Разности между наблюдаемыми максимальными расходами воды и рассчитанными по уточненной модели

Table 6. Differences between observed maximum water discharges and those calculated using the revised model

	1969	1941	1976	1954	2003	1962	2001
Макс. расход (м ³ /с) наблюдаемый	6700	4550	4230	4130	4030	3900	3500
Макс. расход (м ³ /с) рассчитанный	6590	4790	4680	3690	3840	4170	3450
Разность в м ³ /с	110	−240	−450	440	190	−270	50
Разность в %	2	−5	−11	11	5	−7	1

Таким образом, уточненную модель можно считать вполне приемлемой для использования в определении предварительных оценок максимального расхода путем введения в уравнение накопительной суммы майских осадков с шагом в одни сутки в конкретный сезон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В бассейне реки Абакан наблюдается изменение внутригодовой временной структуры осадков и максимального расхода в сторону совместного статистически значимого увеличения обоих параметров именно весной, в частности, в мае. Наводнения не всегда наблюдаются в многоводный год и, наоборот, крупное наводнение может проявиться и в средневодный год. Наводнения в классах от высоких до катастрофических в большинстве случаев происходят по схеме наложения паводков на половодье. При этом паводки в основном вызываются экстремальными майскими осадками с пентадной (5-суточной) интенсивностью от 60 до 100 мм, что подтверждается и большим весом майских осадков во множественной регрессионной модели расчета максимального расхода воды.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Русского географического общества, проект № 45/2022-И “Климатические аномалии и опасные природные явления в Южной Сибири”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов В.А., Лесных В.В., Соколов Ю.И. Риски катастрофических наводнений на территории России в начале XXI века: анализ и управление // Оценка и управление природными рисками. Том 1. М.: Изд-во РУДН, 2013. С. 293–297.
2. Бузин В.А. Опасные гидрологические явления. Учебное пособие. СПб.: РГГМУ, 2008. 228 с.
3. Галахов В.П., Легачева Н.М., Рудыка И.Ю. Оценка осадков половодья с помощью орфографической добавки к скорости вертикальных движений (на примере реки Абакан) // Изв. АО РГО. 2017. № 1 (44). С. 60–66.
4. Государственный доклад “О состоянии окружающей среды Республики Хакасия в 2014 г.”. Абакан, 2015. 201 с. URL: <https://minprom19.ru/dokumenty/otchety-i-doklady/> (дата обращения 01.06.2023).
5. Государственный доклад “О состоянии окружающей среды Республики Хакасия в 2021 г.”. Абакан, 2022. 211 с.
6. Кичигина Н.В. Наводнения Сибири: географический и статистический анализ за период климатических изменений // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2021. Т. 66. № 1. С. 41–61.
7. Паромов В.В., Шумилова К.А., Гордеев И.Н. Условия формирования половодья большой водности и прогноз наводнения на реке Абакан // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327. № 11. С. 57–67.
8. Федоровский, А.С. Бортин Н.Н., Горчаков А.М., Милаев В.М. Ливневые дожди как фактор наводнений в Приморском крае // Водное хозяйство России. 2019. № 4. С. 144–168.
9. Шиянов В.А. Максимальный сток весеннего половодья реки Абакан и ее притоков: выпускная бакалаврская работа по направлению подготовки: 05.03.04 — Гидрометеология. Томск, 2016. URL: <https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vital:3048> (дата обращения 10.07.2023)
10. Уровень воды онлайн. URL: <https://allrivers.info/> (дата обращения 15.09.2022).

Extreme Precipitation and Floods in the Abakan River Basin

Yu. N. Kurochkin^{1, *}, K. V. Chistyakov^{1, **}, M. V. Syromyatina^{1, ***}

¹St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

*E-mail: y.kurochkin@spbu.ru

**E-mail: k.chistyakov@spbu.ru

***E-mail: m.syromyatina@spbu.ru

Abstract – The paper provides a statistical analysis of the dynamics of maximum water discharge on the Abakan River and extreme precipitation in the basin of this river in order to identify the main role of the latter in the formation of high and catastrophic floods. The detailed relationships between such floods and extreme precipitation are analyzed using specific examples from 2014 and 2021. Floods in the classes from high to catastrophic mostly occur according to the superimposition of high water on flash floods. The special role of pentad (5-day) maximum precipitation intensity in the occurrence of catastrophic floods has been revealed. Also, a multiple regression model of the dependence of maximum water discharge on three (out of 12) statistically significant climatic predictors, which has quite acceptable reliability and accuracy characteristics, is presented.

Keywords: extreme precipitation, maximum water discharge, catastrophic floods, the Abakan River

REFERENCES

1. Akimov V.A., Lesnyh V.V., Sokolov YU.I. Riski katastroficheskikh navodnenij na territorii Rossii v nachale XXI veka: analiz i upravlenie // Ocenka i upravlenie prirodnymi riskami. Tom 1. M.: Izd-vo RUDN, 2013. S. 293–297.
2. Buzin V.A. Opasnye gidrologicheskie yavleniya. Uchebnoe posobie. SPb.: RGGMU, 2008. 228 s.
3. Galahov V.P., Legacheva N.M., Rudyka I.YU. Ocenka osadkov polovod'ya s pomoshch'yu orograficheskoy dobavki k skorosti vertikal'nyh dvizhenij (na primere reki Abakan) // Izv. AO RGO. 2017. № 1 (44). S. 60–66.
4. Gosudarstvennyj doklad “O sostoyanii okruzhayushchej sredy Respubliki Hakasiya v 2014 g.” Abakan, 2015. 201 s. URL: [https://minprom19.ru/dokumenty/otchety-i-doklady/\(data obrashcheniya 01.06.2023\)](https://minprom19.ru/dokumenty/otchety-i-doklady/(data obrashcheniya 01.06.2023)).
5. Gosudarstvennyj doklad “O sostoyanii okruzhayushchej sredy Respubliki Hakasiya v 2021 g.”. Abakan, 2022. 211 s.
6. Kichigina N.V. Navodneniya Sibiri: geograficheskij i statisticheskij analiz za period klimaticheskikh izmenenij // Vestnik SPbGU. Nauki o Zemle. 2021. T. 66. № 1. S. 41–61.
7. Paromov V.V., Shumilova K.A., Gordeev I.N. Usloviya formirovaniya polovod'ya bol'shoj vodnosti i prognoz navodneniya na reke Abakan // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. 2016. T. 327. № 11. S. 57–67.
8. Fedorovskij, A. S. Bortin N. N., Gorchakov A. M., Milaev V. M. Livnevye dozhdii kak faktor navodnenij v Primorskom krae // Vodnoe hozyajstvo Rossii. 2019. № 4. S. 144–168.
9. Shiyanov V.A. Maksimal'nyj stok vesennego polovod'ya reki Abakan i ee pritokov: vypusknaya bakalavrskaya rabota po napravleniyu podgotovki: 05.03.04 — Gidrometeorologiya. Tomsk, 2016. URL: [https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vital:3048 \(data obrashcheniya 10.07.2023\)](https://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Repository/vital:3048 (data obrashcheniya 10.07.2023))
10. Uroven' vody onlajn. URL: [https://allrivers.info/ \(data obrashcheniya 15.09.2022\)](https://allrivers.info/ (data obrashcheniya 15.09.2022)).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Курочкин Юрий Николаевич

Старший преподаватель. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Санкт-Петербургский государственный университет”

e-mail: y.kurochkin@spbu.ru

Kurochkin Yuriy Nikolaevich

Senior Lecturer. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Saint Petersburg State University”

e-mail: y.kurochkin@spbu.ru

Чистяков Кирилл Валентинович

Директор Института наук о Земле, доктор географических наук. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Санкт-Петербургский государственный университет”

e-mail: k.chistyakov@spbu.ru

Chistyakov Kirill Valentinovich

Director of the Institute of Earth Sciences, Doctor of Sciences (Geography). Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Saint Petersburg State University”

e-mail: k.chistyakov@spbu.ru

Сыромятина Маргарита Владимировна

Доцент, кандидат географических наук. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Санкт-Петербургский государственный университет”

e-mail: m.syromyatina@spbu.ru

tel.: +7 921 328-27-25

Syromyatina Margarita Vladimirovna

Associate Professor, Candidate of Sciences (Geography). Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Saint Petersburg State University”

e-mail: m.syromyatina@spbu.ru

tel.: +7 921 328-27-25