

Н.В. КИЧИГИНА*, М.Ю. ОПЕКУНОВА*,**

*Институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1, Россия, nkichigina@mail.ru, opek@mail.ru

**Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия, opek@mail.ru

АНАЛИЗ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ НА ВОСТОЧНОСАЯНСКИХ ПРИТОКАХ АНГАРЫ ПО ДАННЫМ ВЫСОКОДЕТАЛЬНОГО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

Рассмотрена специфика формирования дождевых паводков в речных бассейнах горной территории. Изучены особенности формирования опасных гидрологических событий, таких как наводнения и сели. На основе данных высокодетального мониторинга параметров речного стока и атмосферных осадков с использованием современных приборных комплексов выполнен анализ характеристик дождевых паводков на реках Восточного Саяна. Измерения уровня воды производились с периодичностью 1 раз в 15/30 мин, осадков — 1 раз в час. Дана характеристика паводков за паводочный сезон 2022 г. на восьми реках с определением сроков прохождения, продолжительности, высоты подъема уровня и его амплитуды, скорости подъема и спада и др., а также паводков на реках Белой и Кынгарге с 2019 по 2022 г., экстремальных паводков, которые могут стать причиной наводнений с оценкой паводкообразующих осадков. Установлено, что всего за паводочный сезон на реках проходило до 10 дождевых паводков разной величины. Прослеживается синхронность в прохождении высоких паводков на левых притоках р. Ангары. Чаще всего максимальные в году паводки происходили в июле. Продолжительность подъема паводка в среднем в 2–3 раза меньше, чем спада, а средняя скорость подъема уровня в три раза выше, чем скорость спада. Продолжительность стояния наивысших уровней во время паводков измеряется несколькими часами. Для небольших паводков, происходящих в середине лета, она составляет 15–30 мин и равна заданному шагу измерений на постах. Паводкообразующие осадки при экстремальных паводках могут быть продолжительными и повсеместными или интенсивными и кратковременными. Общее количество выпавших осадков до пика паводка изменялось от 31,4 до 122,6 мм, средняя интенсивность осадков — от 0,10 до 1,95 мм/ч.

Ключевые слова: уровень воды, мониторинг, автоматические приборные комплексы, атмосферные осадки, левые притоки Ангары.

N.V. KICHIGINA, M.YU. OPEKUNOVA

*V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Ulan-Batorskaya, 1, Russia, nkichigina@mail.ru, opek@mail.ru

**Irkutsk National Research Technical University,
664074, Irkutsk, ul. Lermontova, 83, Russia, opek@mail.ru

ANALYSIS OF RAIN FLOODS ON THE LEFT TRIBUTARIES OF THE ANGARA USING HIGHLY DETAILED HYDROMETEOROLOGICAL MONITORING DATA

The results from studying the specifics of the formation of rain floods in river basins of mountainous areas are presented. The features in the formation of dangerous hydrological events, such as floods and mudflows, are considered. An analysis of the rain floods characteristics on the rivers of the Eastern Sayan mountains was carried out, based on data from highly detailed monitoring of river flow parameters and atmospheric precipitation using automatic measuring devices. Water level measurements are carried out once every 15/30 minutes, and precipitation once per hour. The characteristics of floods for the flood season of 2022 on eight rivers are given as well as floods on the Belaya and Kyngarga Rivers from 2019 to 2022. For extreme floods that can cause significant damage, an assessment of flood-forming precipitation is made. The timing of passage, duration, height of the level rise and its amplitude, the rate of rise and fall, etc. are determined. It was established that during flood season, up to 10 rain floods of different sizes occurred on the rivers. There is a synchronicity in the high floods passage on the left tributaries of the Angara river. Most often, the maximum floods of the year occurred in July. The duration of a flood rise is on average 2–3 times less than its reduction, and the average rate of level rise is three times higher than the rate of reduction. The duration of the highest levels during floods is several hours. For small floods occurring in mid-summer, it is 15–30 minutes and is equal to the measurement step of the devices. Flood-forming precipitation during extreme floods can be long-lasting and widespread or

intense and short-lived. The total amount of precipitation before the peak of the flood varied from 31,4 to 122,6 mm, and the average intensity of precipitation varied from 0,10 to 1,95 mm/h.

Keywords: *water level, monitoring, automatic measuring device, atmospheric precipitation, left tributaries of the Angara.*

ВВЕДЕНИЕ

Гидроклиматические экстремумы являются причиной опасных природных событий и чрезвычайных ситуаций. В последние годы участились катастрофические дождевые паводки и возросли размеры причиняемого ими ущерба. В Прибайкалье самая высокая опасность паводочных наводнений существует в бассейнах левых притоков Ангары: Иркут, Китой, Белая, Ока, Ия, Уда, Бирюса, берущих начало на хребтах и в предгорьях Восточного Саяна. Ущерб населенным пунктам, сельскохозяйственным и промышленным предприятиям на этих плотно заселенных и хорошо освоенных территориях может быть очень значительным [1, 2]. Дождевые паводки, сформированные в горных районах, обладают особенно большой опасностью из-за высокой скорости их формирования, а также из-за сложности прогнозирования осадков в горах.

Прогнозирование паводочных наводнений связано со многими проблемами. Зона формирования стока указанных рек изучена слабо. Развитие дождевых паводков в основном зависит от характера и интенсивности дождей, которые определяются синоптическими условиями летнего сезона. Большинство существующих метеостанций расположены на равнинных территориях в зоне транзита и аккумуляции речного стока и не могут характеризовать осадки в горах. Рассмотрение характеристик временного распределения экстремальных осадков и реакции дождевого стока имеет важное значение для точного понимания специфики формирования наводнений в горных бассейнах [3].

Определение взаимосвязи между характеристиками дождевого паводка и сформировавших его осадков является актуальной задачей современной гидрологии [4–6]. Для выявления таких взаимосвязей в горных районах необходимы высокодетальные данные с высоким временным разрешением. Существующие данные Росгидромета не обладают достаточной детальностью и имеют слабое пространственное покрытие, особенно в горных районах (где в первую очередь и происходит формирование дождевых паводков). Данные высокодетального мониторинга характеристик стока и осадков могут стать основой при изучении неопределенностей, связанных с формированием экстремальных дождевых паводков.

Для этого на реках Прибайкалья сотрудниками Института географии им. В.Б. Сочавы (ИГ) СО РАН проводятся работы по оборудованию постов, на которых осуществляется высокодетальный мониторинг характеристик речного стока и атмосферных осадков с использованием современных приборных комплексов. Цель исследования — на основе данных такого мониторинга выполнить анализ характеристик дождевых паводков на реках Восточного Саяна. Измерения уровней воды производятся с периодичностью один раз в 15/30 мин, осадков — один раз в час.

Анализ специфики формирования дождевых паводков в речных бассейнах горной территории с таким высоким временным разрешением представляет интерес для раскрытия особенностей формирования опасных гидрологических событий, таких как наводнения и сели.

ОБЪЕКТЫ МОНИТОРИНГА И ОБОРУДОВАНИЕ

С 2013 г. в ИГ СО РАН начались работы по созданию сети мониторинга характеристик речного стока и атмосферных осадков. В 2022 г. в рамках проекта Российского научного фонда (№ 22-27-00326) сеть была существенно расширена.

В соответствии с задачами комплексной характеристики дождевых паводков на горных реках за паводочный сезон 2022 г. на основе данных измерений уровней воды на восьми пунктах мониторинга были выделены все паводки на реках и определены их параметры: сроки прохождения, продолжительность, высота подъема уровня и его амплитуда, скорость подъема и спада и др. По данным мониторинга, проведенного в 2019–2022 гг., дана характеристика паводков для четырех паводочных сезонов на реках Белой и Кынгарге, а также экстремальных паводков, зафиксированных на обследуемых реках с 2019 г. по настоящее время. Оценены характеристики паводкообразующих осадков — их количество, интенсивность, особенности отклика речного стока.

Для оборудования мониторинговой сети на водных объектах использованы современные автоматические приборные комплексы САМ-ГПР, САМ-ГО (Институт мониторинга климатических и экологи-

Таблица 1

Состав сети мониторинга характеристик речного стока и атмосферных осадков

№ прибора	Место установки приборов	Местоположение	Высота над ур. моря, м	Период действия	Примечание
Посты мониторинга жидких атмосферных осадков, температуры воздуха и поверхности почвы					
149	пос. Новостройка	Иркутская область, Черемховский район	576	Июнь 2022 г. — н. в.	Передача данных по GSM
150	с. Тальники	Черемховский район, Иркутская область	450	Июнь 2022 г. — н. в.	»
151	с. Хайта	Иркутская область, Черемховский район	415	Июнь 2023 — н. в.	»
152	пос. Раздолье	Иркутская область, Черемховский район	721	Июнь 2022 г. — н. в.	»
153	исток р. Китой	Республика Бурятия, Окинский район	1924	Июль 2022 г. — н. в.	»
154	дер. Быстрая	Иркутская область, Слюдянский район	680	Июнь 2022 г. — н. в.	»
17	Сарминский голец	Иркутская область, Ольхонский район	1658	Июнь 2019 г. — н. в.	»
18	пик Любви	Республика Бурятия, Тункинский район	1892	Июнь 2019 г. — н. в.	»
53	пос. Аршан (на р. Ие)	Иркутская область, Тулунский район	600	Июль 2020 г. — н. в.	»
Посты мониторинга характеристик речного стока: уровня, температуры и удельной электропроводности воды					
155	р. Китой — пос. Большая Черемшанка	Иркутская область, Черемховский район	508	Июнь 2022 г. — н. в.	»
156	р. Иркут — с. Зактуй	Республика Бурятия, Тункинский район	760	Май 2022 г. — октябрь 2022 г., июль 2023 — н. в.	»
157	р. Иркут — руч. Аерхан	Республика Бурятия, Тункинский район	1370	Июль 2022 г. — н. в.	»
158	р. Китой — исток	Республика Бурятия, Окинский район	1800	Июль 2022 г. — н. в.	»
159	р. Малая Белая — пос. Юлиnsk	Иркутская область, Черемховский район	510	Июнь 2022 г. — н. в.	»
54	р. Ия — дер. Владимировка	Иркутская область, Тулунский район	573	Июль 2020 г. — н. в.	»
270	р. Кынгарга — пос. Аршан	Республика Бурятия, Тункинский район	980	Июнь 2019 г. — н. в.	Без удаленной передачи данных
104	руч. Икубур — пос. Еловка	Республика Бурятия, Тункинский район	950	Июнь 2013 г. — н. в.	»
195	руч. Кар № 2 — пос. Аршан	Республика Бурятия, Тункинский район	980	Июнь 2016 г. — июль 2017 г.	»
82	руч. Ланинский — дер. Сарма	Иркутская область, Ольхонский район	620	Июнь 2013 г. — н. в.	»
195	руч. Ятор — мыс Улан-Хан	Иркутская область, Ольхонский район	500	Сентябрь 2018 г. — н. в.	»
231	р. Белая — пос. Мишелёвка	Иркутская область, Усольский район	450	Октябрь 2018 г. — н. в.	»

Примечание. н. в. — настоящее время.

ческих систем СО РАН, Томск), аналоги которых хорошо зарекомендовали себя в ходе предыдущих исследований [7–12]. Преимущества данных измерительных комплексов заключаются в сочетании низкого энергопотребления, широкого набора подключаемых датчиков, необслуживаемого режима работы, работоспособности в широком диапазоне условий эксплуатации. Программное обеспечение позволяет задавать режимы работы, считывать накопленную информацию и обновлять программу микроконтроллера. Накопленные данные считываются как непосредственно с измерителя через USB-интерфейс, так и через сотовый канал связи (при использовании комплектации GSM) [13]. Характеристики комплекса позволяют создавать сети необслуживаемых станций, способных работать в удаленных и труднодоступных местах. Автоматический приборный комплекс САМ-ГПР оснащен датчиками для измерения уровня, температуры и удельной электропроводности воды, САМ-ГО — осадкомером Davis Rain Collector II для измерения жидких атмосферных осадков и датчиками для измерения температуры воздуха и поверхности почвы. Устанавливаемый период измерения — от 5 с до 12 ч.

В настоящее время в горных районах на реках функционирует 12 постов мониторинга характеристик стока (уровень, температура и удельная электропроводность воды) и девять постов для мониторинга жидких атмосферных осадков, температуры воздуха и поверхности почвы (табл. 1, рис. 1). На реках ведется непрерывная запись уровня, температуры воды и удельной электропроводности в створе наблюдений с интервалом 15 или 30 мин (96 или 48 измерений в сутки). Измерение жидких атмосферных осадков, температуры воздуха и поверхности почвы выполняется с 1-часовым интервалом (24 измерения в сутки). Данные измерений передаются в непрерывном режиме по GSM. При необходимости возможно удаленно изменять частоту измерений и передачи данных.

На сегодня получен массив уникальных высокоточных данных, произведенных с высоким временным разрешением. Результаты измерений в виде графиков размещаются в открытом доступе и непрерывно обновляются в режиме онлайн на сайте <http://apik.imces.ru> в разделе «Прибайкалье. Проект «Гидрология». Институт географии СО РАН им. В.Б. Сочавы».

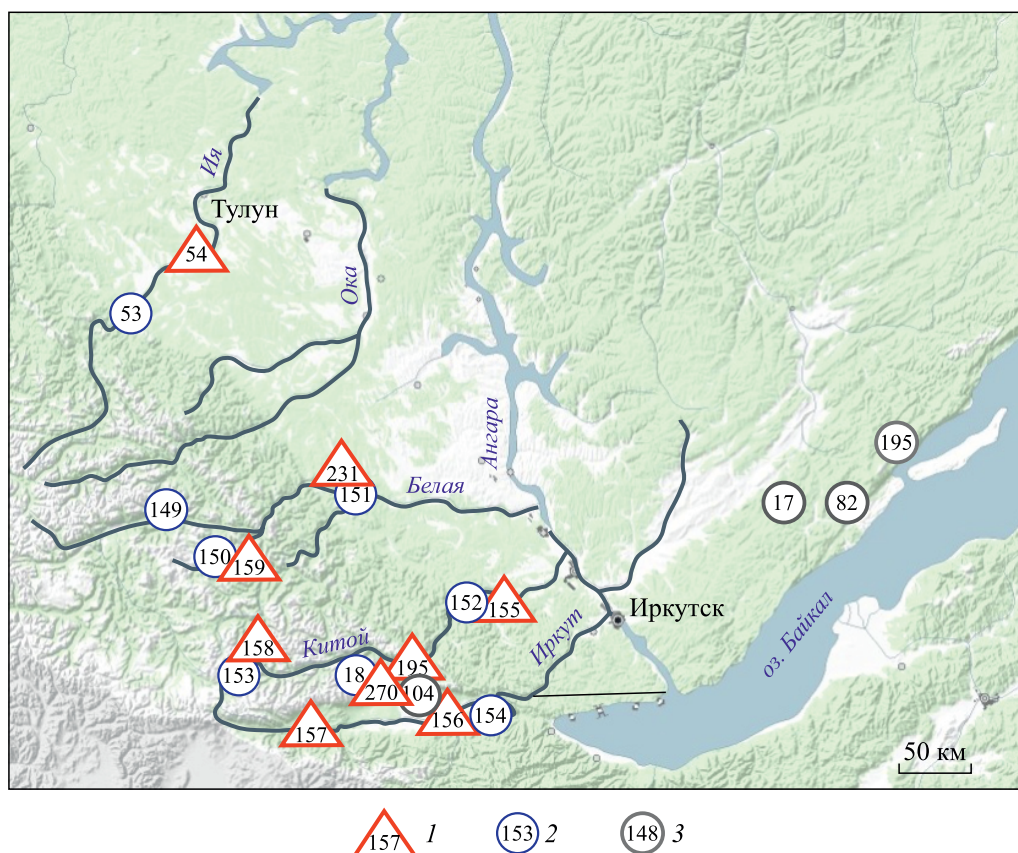


Рис. 1. Расположение постов мониторинга.

Посты: 1 — гидрологические, 2 — метеорологические, 3 — в данной статье не рассматриваются. Номера постов — см. табл. 1.

В статье обобщаются данные измерений за 2022 г. на реках Иркут, Китой, Белая, Ия, берущих начало на хребтах Восточного Саяна, и за весь период мониторинга — на реках Кынгарге и Ие.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Самая высокая опасность экстремальных паводков в Прибайкалье наблюдается в бассейнах левых притоков Ангары. Формирование стока этих рек характеризуется специфическими условиями, такими как горный характер рельефа и сейсмичность, определяющими высокую вероятность наводнений и селевых потоков. Основная доля годового стока проходит в теплый период. По режиму питания реки характеризуются весенне-летним половодьем и паводками, тесно примыкающими к половодью и систематически его превышающими. За три летних месяца выпадает более половины от годового количества осадков. Максимум осадков приходится на конец июля—начало августа. Количество осадков в теплый период в долинах достигает 300 мм, а в горных районах — более 500 мм [14].

В пределах бассейна р. Ангары наиболее распространены многодневные дожди, связанные с развитием циклонов на юге Красноярского края или в Монголии, медленным их смещением на север и северо-восток. При стационарировании циклона в южных районах выпадают многодневные дожди, которые вызывают паводки на реках. Высокая вероятность повторения дождей большой интенсивности — на реках, берущих начало в Восточном Саяне и на Хамар-Дабане. В платформенной части территории паводкообразующими являются продолжительные дожди или отдельные ливни, связанные с циклонами и воздействием холодных воздушных фронтов.

Общая характеристика паводков на реках в 2022 г. По данным Росгидромета (<https://www.meteorf.gov.ru>), гидрометеорологические условия лета 2022 г. на территории Сибири характеризовались преобладанием северо-западного переноса воздушных масс. В начале июля высотная ложбина распространялась практически на всю территорию, постепенно смещаясь на восток Сибири, в результате чего восточные территории находились в юго-западных потоках, а западные — в северо-западных, в тылу ложбины. Май был теплым и аномально сухим, с частыми сильными ветрами и заморозками, осадки выпадали редко и были слабоинтенсивными. 7 и 10 июня в горах Хамар-Дабана прошли очень сильные дожди (40 мм в течение полусуток); 18 июня в горах Восточного Саяна (селеопасные районы) выпало до 43 мм, в Нижнеилимском районе — до 51 мм; 29 июня в районе с. Дабады — до 31 мм.

В Иркутской области третий квартал 2022 г. отличался выпадением обильных осадков в июле, во второй половине августа и третьей декаде сентября. В первой и второй декадах июля наблюдался комплекс метеорологических явлений с сильными дождями, грозой, градом, в селеопасных районах прошли очень сильные дожди, в Черемховском районе — сильный ливень интенсивностью 54 мм за 30 мин. В шести районах области произошло отключение электроснабжения, повреждены кровли зданий, пострадали посевы. На территории Черемховского района вводился режим «чрезвычайной ситуации». В течение июля на реках Иркутской области отмечались дождевые паводки, достижения критериев опасных гидрологических явлений не зафиксировано [15, 16].

Рассмотрим паводочный период с июня по сентябрь 2022 г. по данным наблюдений на восьми постах, оборудованных в бассейнах левых притоков Ангары — на реках Китой, Иркут, Кынгарга, Белая, Ия. Для двух постов, где оборудование установлено раньше (р. Кынгарга — пос. Аршан и р. Белая — пос. Мишелёвка), такой анализ выполнен за четыре паводочных сезона — с 2019 по 2022 г. По данным измерений уровней воды с периодичностью 1 раз в 15 или 30 мин определены сроки паводков, их количество, дана их общая характеристика. Проанализированы продолжительность паводков, максимальные значения и амплитуды подъема уровня (табл. 2), а также продолжительность и скорость подъема и спада паводков, длительность стояния максимального уровня.

Основные геоморфологические характеристики мест установки приборов представлены в табл. 3. Параметры паводка зависят от площади водосбора реки, а также от формы русла, высоты берегов в месте установки, рельефа и уклонов русла, наличия крупных притоков выше по течению. Влияние оказывает и характер (интенсивность, площадь охвата, продолжительность) дождей.

Если рассматривать наводнение как превышение критических отметок уровня, при которых начинается выход воды на пойму и затопление прибрежных территорий [17], то имеет значение как уровень, при котором стартовал паводок, так и амплитуда его подъема. Паводок с достаточно высокой амплитудой, произошедший при низких предшествующих уровнях, не всегда приводит к наводнению. В то же время если предшествующий началу паводка уровень был уже достаточно высокий, то даже паводок с относительно небольшой амплитудой подъема уровня может вызвать превышение крити-

Таблица 2

Параметры паводков за паводочный сезон 2022 г.

Река – пост	Количество паводков	Уровень, мм			Продолжительность паводков, часы			Скорость, мм/ч	
		максимальный (дата)	средний за все паводки	амплитуда подъема – средняя/макс./мин.	всего паводка – средняя/макс./мин.	подъема – средняя/макс./мин.	спада – средняя/макс./мин.	подъема уровня	спада уровня
Иркут – руч. Аерхан	5	862 (15.07)	234	329/691/88	163/226,5/67,5	50,2/76/12	113/201,5/55,5	6,66/25,6/2,15	2,11/3,21/1,69
Иркут – с. Зактуй	8	3135 (14.07)	741	840/1984/164	190/353/101	63,7/113/32	126,5/246/40,5	14,3/42,0/2,72	5,36/8,53/2,76
Кынгарга – пос. Аршан	4	740,5 (17.06)	391	230/456/147	85,0/95,25/65,8	31,7/60,75/9,75	53,3/81,75/23,0	14,24/33,8/2,42	3,52/4,70/1,53
Китой – исток	8	855 (14.07)	273	225/630/29	137,5/248/53	25,5/53,0/11,5	112/195/41,5	12,8/52,5/1,40	2,10/4,80/0,51
Китой – пос. Большая Черемшанка	10	1719 (18.06)	810	434/1266/137	206,8/536/49,5	82,8/290,5/24,0	124/245,5/25,5	6,66/15,3/1,88	3,60/5,42/2,13
Малая Белая – пос. Юлинок	9	506 (13.07)	570	162/506/55	132,2/237/48	40,2/134/12,0	92/193,5/36	7,02/15,7/0,53	1,76/3,45/1,14
Белая – пос. Мишелёвка	10	2872 (15.06)	1419	518/1802/152	113/190/45,5	39,2/90,8/13,0	73,8/109/23,5	13,8/27,5/2,44	6,08/14,2/2,0
Ия – дер. Владимировка	9	1203 (13.07)	541	414/930/199	256,5/476/72,5	74,5/140,5/22,25	182/394,5/41,25	6,13/11,8/2,92	2,38/4,40/0,85

ческих отметок и затопление. Поэтому величина паводка, характеризующая относительную водность, определялась по совокупности двух составляющих — по максимальному значению уровня и амплитуде его подъема.

Все паводки разделены на три категории по их величине. К средним отнесены паводки со средними за год ($\pm 25\%$) значениями максимальных уровней и амплитуды, выше этого значения — к высоким, ниже — к небольшим паводкам. При выборе категории предпочтение отдавалось величине максимального уровня.

Всего за паводочный период 2022 г. на реках проходило от 4 до 10 дождевых паводков разной величины. Из них высоких — один, реже два (см. табл. 2). Прослеживается некоторая синхронность в прохождении высоких паводков на реках (рис. 2), что, по всей видимости, обусловлено влиянием крупномасштабных атмосферных процессов. Довольно часто паводки накладываются друг на друга, тогда происходят многовершинные паводки, состоящие из двух-трех пиков. Во время таких многовершинных паводков водность рек остается высокой продолжительное время. На спад высокого паводка часто накладываются небольшие паводки, не оказывающие существенного влияния на траекторию его спада и водность рек. Например, на р. Белой (пос. Мишелёвка) с 29 июля по 13 августа 2022 г. прошли три значительных паводка один за другим, водность в течение этого периода была высокая. Трехвершинный паводок наблюдался на р. Ие (дер. Владимировка) с 13 июля по 2 августа, на р. Малой Белой (пос. Юлинок) — с 13 по 23 июля. Там же 20–28 августа 2022 г. имел место двухвершинный паводок, после него до 5 сентября прошло несколько небольших паводков с постепенным понижением водности. Двухвершинные паводки на р. Кынгарге (пос. Аршан) сформировались 17–24 августа 2021 г., на р. Иркут (с. Зактуй) — 6–15 июня и 14–25 июля 2022 г. с постепенным понижением водности.

Величина паводка тесно связана с его продолжительностью (см. табл. 2). Средняя продолжительность на реках в 2022 г. составила 7,3 сут. Самым длительным стал паводок на р. Китой (пос. Большая Черемшанка): в течение 22 сут (536 ч) — с 6 по 29 июня — продолжалось развитие многовершинного паводка с затяжным подъемом (295,5 ч), что свидетельствовало о его смешанном генезисе.

Таблица 3

Геоморфологическая характеристика мест установки приборов

Река — пост	Площадь водосбора, км ²	Место установки, характер рельефа	Тип русла, русловые отложения, высота берега
Иркут — руч. Аерхан	1200	Выше устья р. Аерхан. Горно-котловинная часть бассейна р. Иркут. Днище Мондинской котловины. Долина р. Иркут, террасово-пойменный комплекс	Долина р. Иркут, террасово-пойменный комплекс. Широкопойменное разветвлено-извилистое русло, вершина излучины динамической оси. Пойма высотой 2 м сложена валунно-галечниковым материалом в песчаном заполнителе
Иркут — с. Зактуй	6560	Ниже с. Зактуй. Горно-котловинная часть бассейна р. Иркут. Восточная оконечность Тункинской котловины. Долина р. Иркут, террасово-пойменный комплекс	Адаптированный тип русла, нижнее крыло пологой сегментной излучины. Подмываемый коренной берег с фрагментарным развитием поймы до 2 м, сложенный супесчаными отложениями. В месте установки прибора берег представлен откосом насыпи автодороги, частично сложенной техногенным грунтом
Кынгарга — пос. Аршан	231	Горно-котловинная часть бассейна р. Иркут. Южный макросклон хр. Тункинские Голыцы	Порожисто-водопадный тип русла. Валунно-глыбовые отложения в песчаном заполнителе. Протекает в ущелье, пойма отсутствует
Китой — исток	160	Ниже слияния рек Улзыта и Самарта. Горно-котловинная область бассейна р. Китой, днище Ильчиро-Китойской котловины с морено-холмистым рельефом	Широкопойменное русло, относительно прямолинейное. Пойма высотой 1 м сложена галечно-валунным материалом в песчаном заполнителе
Китой — пос. Большая Черемшанка	5220	Ниже впадения р. Большой Черемшанки. Область контакта предгорной и равнинно-платформенной областей бассейна р. Китой. Пойменно-террасовый комплекс	Широкопойменное русло, пойма высотой 2 м сложена валунно-галечниковым материалом в песчаном заполнителе
Малая Белая — пос. Юлинск	4000	Предгорный район бассейна р. Белой. Долина р. Малой Белой ниже впадения р. Олот Пойменно-террасовый комплекс	Широкопойменное относительно прямолинейное русло. Песчано-галечниковые отложения голоценового возраста. Пойма высотой 1,6–2,0 м
Белая — пос. Мишелёвка	16 400	Равнинный Бельский район бассейна р. Белой Пойменно-террасовый комплекс	Вогнутый берег адаптированной излучины. Пойма высотой 3,7 м сложена супесчано-песчаными отложениями
Ия — дер. Владимировка	7600	Равнинный Владимиро-Гадалейский район бассейна р. Ии, ниже впадения р. Икей Пойменно-террасовый комплекс	Вогнутый берег адаптированной излучины. Бечевник сложен валунно-галечными отложениями

се (со вкладом снеготаяния). Минимальная продолжительность составила 48 ч на р. Малой Белой (пос. Юлинск) 5–7 июля. Продолжительность подъема и спада паводка — 12 и 24 ч соответственно. Таких, небольших по величине паводков (продолжительностью 48–72 ч) на реках происходит от трех до восьми за сезон. Амплитуды подъема паводков изменяются в довольно широких пределах. Средняя амплитуда подъема уровня во время паводков в 2022 г. была около 400 мм.

По данным мониторинга, на реках Белой и Кынгарге основные параметры паводков (количество, сроки, продолжительность) были сходны с характеристиками паводков за 2022 г. (табл. 4). Наибольшие различия касались высоты подъема уровня и амплитуды паводков. Максимальная высота подъема уровня, близкая к уровню выхода воды на пойму и затоплению прибрежных территорий, зафиксирована на гидропостах: р. Белая — пос. Мишелёвка 27 июня 2019 г., максимальный уровень 6217 мм, амплитуда подъема 3879 мм; р. Иркут — с. Зактуй 14 июля 2022 г., максимальный уровень 3135 см, амплитуда подъема 1984 см; р. Кынгарга — пос. Аршан 27 июля 2019 г., максимальный уровень 2059 мм, амплитуда 1712 мм. Чаще всего максимальные в году паводки проходили в июле.

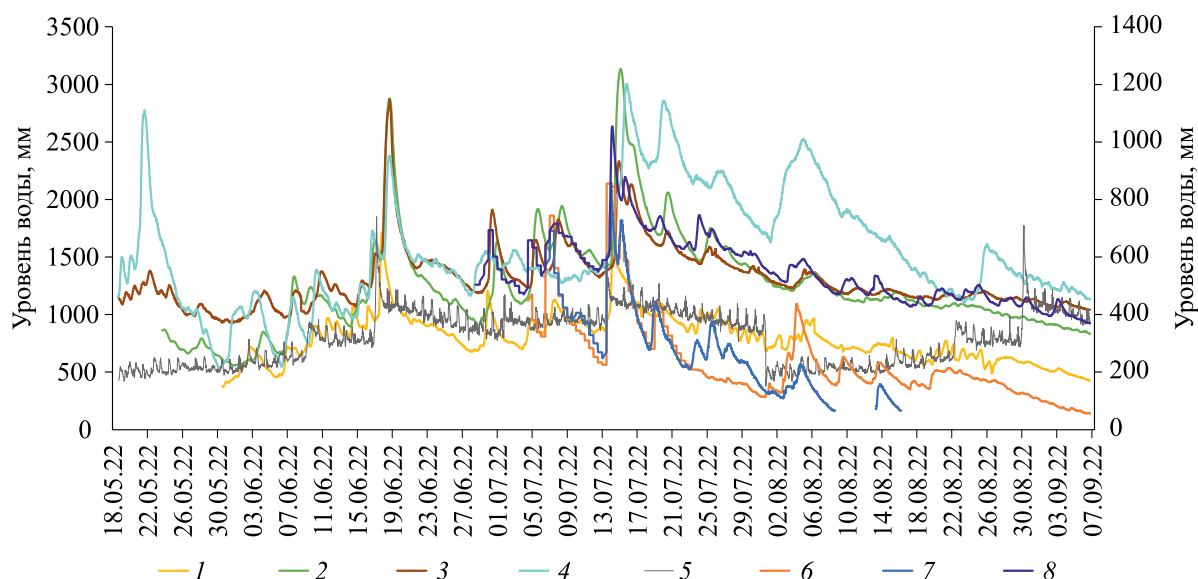


Рис. 2. Гидрографы уровня на реках левобережья Ангары за летний период 2022 г.

Гидропосты: 1 — р. Китой — пос. Большая Черемшанка, 2 — р. Иркут — с. Зактуй, 3 — р. Белая — пос. Мишелёвка, 4 — р. Ия — дер. Владимировка, 5 — р. Кынгарга — пос. Аршан, 6 — р. Китой — исток, 7 — р. Иркут — руч. Аерхан, 8 — р. Малая Белая — пос. Юлиньск.

Средняя скорость подъема уровня за период мониторинга на реках составляет 10,1 мм/ч, спада — 3,55 мм/ч, т. е. в среднем уровень поднимается в три раза быстрее, чем падает. Максимальная скорость подъема (121 мм/ч) зафиксирована на гидропосту р. Белая — пос. Мишелёвка 27–29 июня 2019 г. Максимальная скорость спада (66,5 мм/ч) отмечена во время спада первой волны этого экстремального паводка 27 июня 2019 г.

В целом прослеживалась следующая особенность: к концу лета форма паводков на многих реках становится более вытянутой, пики паводков — более сглаженными, а скорости подъема и спада в августе–сентябре уменьшаются. По всей видимости, дожди становились затяжными, с низкой интенсивностью, а водосборы насыщались влагой. Например, подобные паводки прошли на р. Китой (исток) 20–30 августа 2022 г., на р. Ие (дер. Владимировка) 25 августа — 4 сентября 2022 г., на р. Белой (пос. Мишелёвка) 28 августа — 2 сентября и 11–21 сентября 2019 г., на р. Кынгарге (пос. Аршан) 26 августа — 10 сентября 2020 г.

Средняя продолжительность стояния наивысших уровней во время паводков за период мониторинга на реках составляет 48 мин и изменяется от 23 мин до 1 ч 48 мин. Максимальная продолжительность стояния наивысшего уровня зафиксирована 2 августа 2020 г. на р. Белой (пос. Мишелёвка) — 4 ч 30 мин. Максимальная продолжительность стояния пиковых уровней наблюдается либо в августе, когда паводки становятся продолжительнее и приобретают более плавный вид, с более пологими подъемами уровня, либо в конце мая–первых числах июня, когда, по всей вероятности, дождевые паводки накладываются на снеготаяние. Для высоких паводков, которые чаще происходили в середине лета (с конца июня по начало августа) продолжительность стояния наивысших уровней также относительно высокая. Минимальная продолжительность стояния пиковых уровней наиболее характерна для небольших паводков, происходящих в середине лета (табл. 5). Она составляет 15–30 мин и равна заданному шагу измерений на постах. Скорее всего, при уменьшении периодичности измерений минимальное значение стояния пиковых уровней может также уменьшиться.

Характеристика высоких паводков. В практическом плане при оценке опасности паводочных наводнений наиболее важны свойства высоких паводков, которые могут стать причиной наводнений. Более подробно проанализированы высокие паводки, зафиксированные за период мониторинга на реках. Во время этих паводков максимальная высота подъема уровня была близка к уровням выхода воды на пойму и затоплению прибрежных территорий. Уровень выхода воды на пойму ($H_{п}$) определялся как начальный уровень при установке прибора (H_0) плюс высота пойменного уступа (расстояние от пойменного уступа до поверхности воды на момент установки прибора). Ниже представлена

Таблица 4

Параметры паводков за паводочные сезоны с 2019 по 2022 г.

Река – пост	Год	Количество паводков		Уровень, мм				Продолжительность паводков, часы				Скорость, мм/час	
		всего за сезон	средних/высоких/небольших	максимальный (дата)	средний за все паводки	амплитуда подъема – средняя/макс./мин.	всего паводка – средняя/макс./мин.	подъема – средняя/макс./мин.	спадая – средняя/макс./мин.	средняя/макс./мин.	спадая/макс./мин.	подъема уровня	спадая уровня
Кынгарга – пос. Аршан	2019	5	0/1/4	2059 (27.07)	559	458/1712/36	93,5/203/43	18,5/32,5/5,0	75/170,5/20,5	25,4/52,7/1,26	3,6/7,41/1,4		
	2020	6	1/1/4	1791 (14.07)	788	434/1179/123	151,8/354,5/64,5	41,5/107,5/8,5	110,3/247,0/52,0	17,2/59,0/1,81	3,59/8,2/0,72		
	2021	4	0/1/3	1185 (10.06)	819	575/1407/172	172,8/297/73	111,0/207,5/8,5	61,8/89,8/35,5	15,6/47,8/0,73	11,6/36,5/0,96		
	2022	4	0/1/3	740,5 (17.06)	391	230/456/147	85,0/95,25/65,8	31,7/60,75/9,75	53,25/81,75/23,0	14,24/33,8/2,42	3,52/4,70/1,53		
	Итого	4 (в среднем)	0/1/3	Макс. 2059 (27.07.2019)	639	Макс. 1712 (2019 г.)	126/354,5, 2020/43 (2019 г.)	51/207,5, 2021/5 (2019 г.)	75/247 2020/20,5 (2019 г.)	18,1/59,0 2020/0,73 (2021 г.)	5,6/36,5 2021/0,72 (2020 г.)		
Белая – пос. Мишелёвка	2019	14	2/3/9	6217 (27.06)	2119	1035/3879/185	137,2/434,5/50	38,7/102/13	98,6/332/18	31,78/121/3,03	13,8/66,5/2,8		
	2020	7	2/2/3	3612 (30.08)	1965	1180/1650/428	216/459/71	79,5/203,5/32	136,5/255,5/39	28,9/68/8,31	8,44/14,1/3,81		
	2021	10	4/2/4	3694(03.06)	2121	1133/2042/279	136/209,5/88,8	58,2/150,5/18	77,8/113/52,8	21,3/44,2/2,85	13,5/25,7/3,45		
	2022	10	0/2/8	2872 (15.06)	1419	518/1802/152	113/190/45,5	39,2/90,8/13,0	73,8/109/23,5	13,8/27,5/2,44	6,08/14,2/2,0		
	Итого	10 (в среднем)	2/2/6	Макс. 6217 (27.06.2019)	1906	Макс. 3879 (2019 г.)	145/459/45,5	50,7/203,5/13	93,5/332/18	121/24,10/2,44	66,5/10,8/2,0		

Таблица 5

Продолжительность стояния пиковых значений уровней

Река – створ	Частота измерений уровня	Продолжительность стояния максимальных уровней		
		средняя	максимальная (дата)	минимальная
Иркут – руч. Аерхан	1 раз в 30 мин	45 мин	2 ч 30 мин (05.06.2022)	30 мин
Иркут – с. Зактуй	1 раз в 30 мин	1 ч 12 мин	1 ч 30 мин (05.08.2022)	30 мин
Кынгарга – пос. Аршан	1 раз в 30 или 15 мин	26 мин	1 ч (31.08.2020)	15 мин ежегодно
Китой – исток	1 раз в 30 мин	1 ч 48 мин	4 ч / 20.08.2022	30 мин
Китой – пос. Большая Черемшанка	1 раз в 30 мин	33 мин	1 ч / 31.05.2022	30 мин
Малая Белая – дер. Юлиnsk	1 раз в 30 мин	1 ч 40 мин	4 ч / 26.08.2022	30 мин
Белая – пос. Мишелёвка	1 раз в 30 или 15 мин	1 ч 30 мин	4 ч 30 мин / 02.08.2020	15 мин ежегодно
Ия – дер. Владимировка	1 раз в 15 мин	23 мин	45 мин (04.06.2022, 06.08.2022)	15 мин

характеристика атмосферных осадков, которые сформировали такие паводки, по данным их измерений с периодичностью 1 раз в час.

Паводок 27 июня 2019 г. в районе гидропоста р. Белая – пос. Мишелёвка. Максимальный уровень составил 6217 мм, амплитуда подъема — 3879 мм. Выход воды на пойму и затопление прилегающих к посту прибрежных территорий (H_n) происходит при уровне около 3,7 м. В эти даты на левобережных притоках Ангары — Ие, Уде, Оке, Бирюсе — прошел катастрофический дождевой паводок, приведший к человеческим жертвам и огромному материальному ущербу, пострадали восемь районов Иркутской области [18]. По информации Росгидромета, на р. Белой уровень воды также приближался к опасным отметкам.

Паводок отличался стремительным подъемом и спадом (121 и 66,5 мм/ч соответственно). Уровень начал резко подниматься 25 июня в 18:00 и после небольшого спада достиг максимального значения 29 июня в 04:20. Второй высокий паводок прошел с 25 июля по 10 августа с максимумом уровня 4401,7 мм 30 июля. Он был существенно меньше июньского паводка по высоте и амплитуде подъема, а также по скорости подъема и спада уровня (рис. 3).

Паводок 19 июля – 4 августа 2019 г. в районе гидропоста р. Кынгарга – пос. Аршан. Максимальный уровень составил 2059 мм при амплитуде 1685 мм. Были сорваны навесные мосты через р. Кынгаргу в ущелье выше 1-го водопада. По данным осадкомера, на пике Любви дожди начались 19 июля, общее

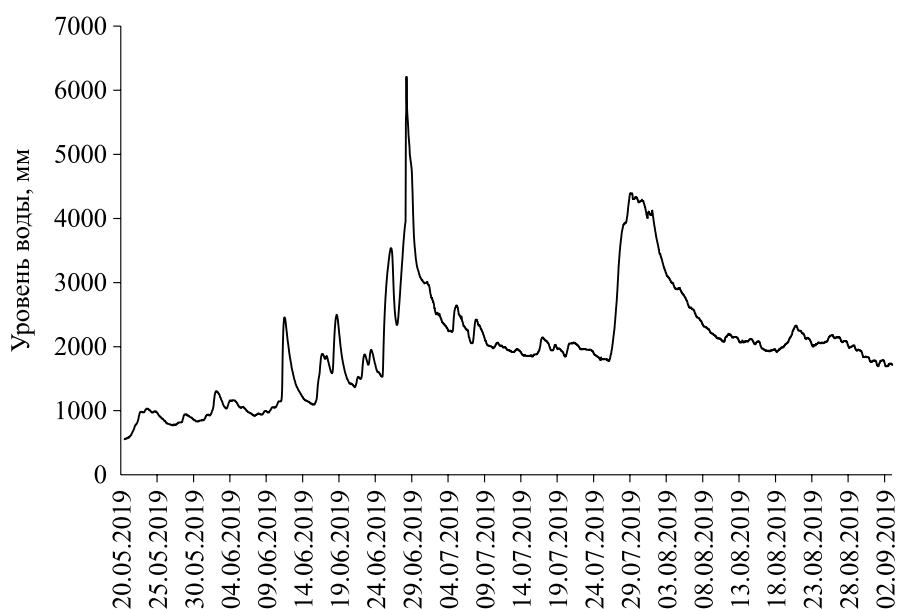


Рис. 3. Гидрограф уровня воды в районе гидропоста р. Белая – пос. Мишелёвка в летний период 2019 г.

Таблица 6

Характеристика паводкообразующих осадков на р. Кынгаре по данным осадкомера на пике Любви в 2019 г.

Сроки паводка	Уровни паводка, мм (начало/пик)	Амплитуда подъема уровня, мм	Продолжительность осадков до пика паводка, часы	Количество осадков до пика паводка, мм	Интенсивность осадков, мм/ч
21:00 24.06.2019 – 02:30 27.06.2019	376,38/600,51	224,1	4	25,4	6,35
01:30 27.06.2019 – 20:30 28.06.2019	422,89/515,36	92,5	16	16	1,0
14:00 06.07.2019 – 22:30 09.07.2019	351,05/536,06	185,0	25	29	1,16
20:00 19.07.2019 – 21:00 04.08.2019	373,6/2058,9	1685	215	122,6	0,57
21:00 01.09.2019 – 15:00 08.09.2019	666,7/675,5	8,87	162	31,6	0,23

количество выпавших осадков до пика паводка составило 122,6 мм, средняя интенсивность осадков — 0,57 мм/ч (табл. 6, рис. 4, а). При этом 26–28 июля за 52 ч выпало 101,6 мм осадков, их средняя интенсивность составила 1,95 мм/ч. Расстояние от осадкомера на пике Любви до гидропоста — 1,97 км.

Паводок 10–15 июня 2023 г. в районе гидропоста р. Китой — пос. Большая Черемшанка. Максимальный уровень 12 июня в 20:00 составил 2006,4 мм при амплитуде 1357,1 мм. По данным осадкомера, в пос. Раздолье дожди начались 30 мая в 20:00, общее количество выпавших осадков до наступления пика паводка составило 32,2 мм со средней интенсивностью 0,10 мм/ч. 13 июня в 17:00 был второй пик паводка, который составил 2002,4 мм, суммарное количество выпавших осадков к этому времени составляло 46,8 мм, а средняя интенсивность — 0,139 мм/ч (см. рис. 4, б). Расстояние от осадкомера в пос. Раздолье до гидропоста — 3 км.

При высоте бровки берега около 2 м и $H_0 = 367$ мм уровень выхода воды на пойму составлял 2367 мм. В районе гидропоста превышения H_n не было, однако в пониженных местах наблюдался выход воды на пойму и затопление прибрежных территорий.

Паводок 13–20 июля 2022 г. в районе гидропоста р. Иркут — с. Зактуй. Максимальный уровень 16 июля в 03:00 составил 3135 мм при амплитуде подъема 1984 мм (табл. 7, см. рис. 4, в). Расстояние

Таблица 7

Характеристика паводкообразующих осадков в районе поста р. Иркут — с. Зактуй по данным осадкомеров в дер. Быстрая и на пике Любви в 2022 г.

Сроки паводка	Уровни паводка, мм (начало/пик)	Амплитуда подъема уровня, мм	Продолжительность осадков до пика паводка, ч	Осадкомер в дер. Быстрая		Осадкомер на пике Любви	
				количество осадков до пика паводка, мм	интенсивность осадков мм/ч	количество осадков до пика паводка, мм	интенсивность осадков, мм/ч
22:00 06.06.2022 – 22:00 09.06.2022	663,4/1330,7	667,3	45	20,2	0,45	8,2	0,18
05:00 15.06.2022 – 15:00 26.06.2022	894,8/2878,7	1983,9	107	17,4	0,16	40,4	0,38
22:00 29.06.2022 – 16:00 04.07.2022	901,9/1638,3	736,4	50	7	0,14	0	0
16:00 04.07.2022 – 21:00 13.07.2022*	1094,2/1915,9	821,6	48	1	0,02	6,8	0,14
	1094,2/1941,9	847,6	114	36,8	0,32	18,6	0,16
21:00 13.07.2022 – 12:00 20.07.2022	1151,2/3135,2	1984	54	19,6	0,36	31,4	0,58

* Паводок с двумя пиками.

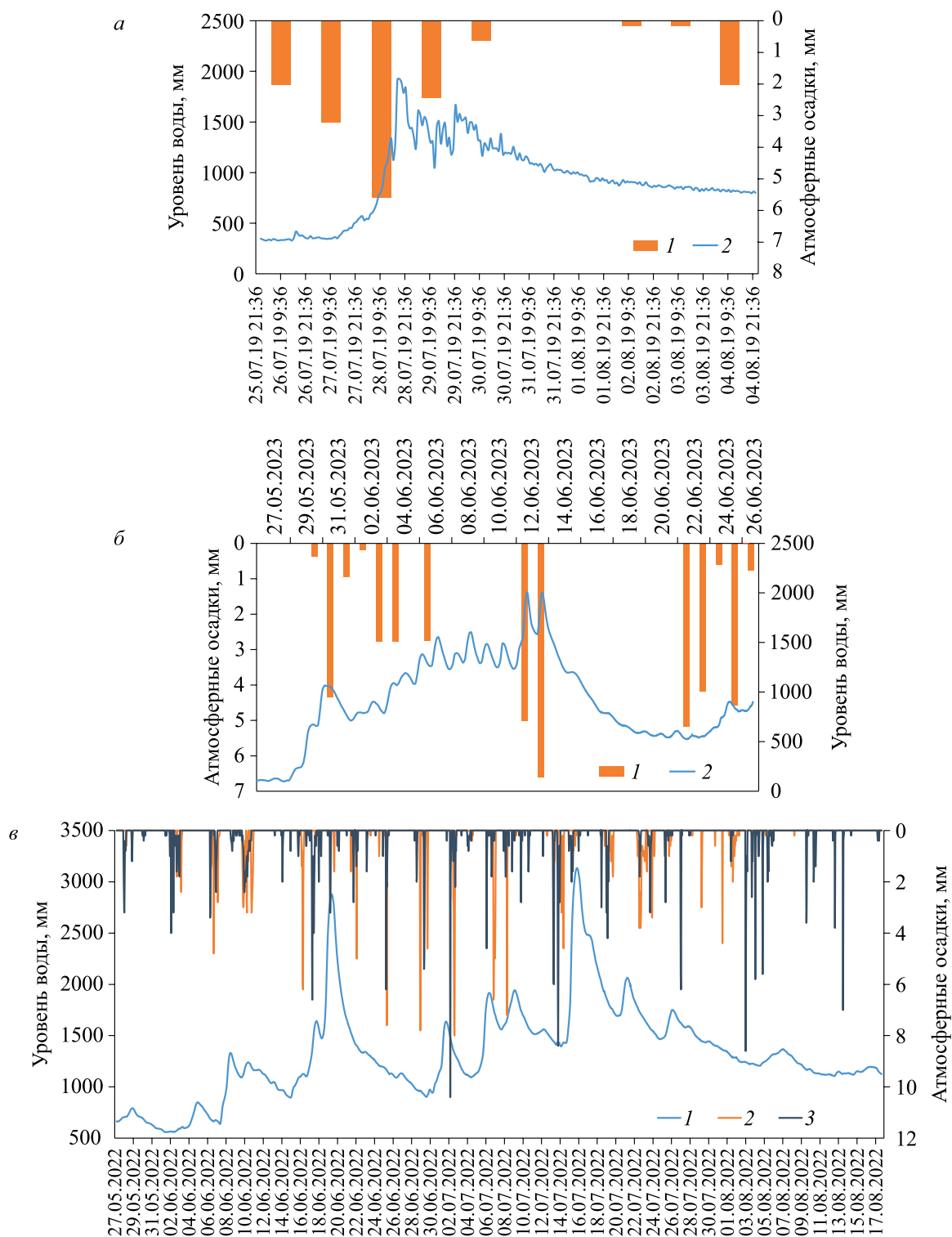


Рис. 4. Высокие паводки на реках Кынгарга, Китой и Иркут.

а — р. Кынгарга: 1 — атмосферные осадки на пике Любви, 2 — гидрограф уровня воды в районе поста р. Кынгарга — пос. Аршан в июле 2019 г. б — р. Китой: 1 — атмосферные осадки в пос. Раздолье, 2 — гидрограф уровня воды в районе поста р. Китой — пос. Большая Черемшанка в июне 2023 г. в — р. Иркут: 1 — гидрограф уровня воды в районе поста р. Иркут — с. Зактуй, 2 — атмосферные осадки в дер. Быстрая, 3 — атмосферные осадки на пике Любви в летний период 2022 г.

от осадкомера на пике Любви до гидропоста — 31,2 км, от осадкомера в дер. Быстрая — 51,6 км. При высоте бровки берега около 2 м и $H_0 = 861$ мм уровень выхода воды на пойму достигал 2861 мм. Отмечался выход воды на пойму, однако затоплений расположенной вблизи гидропоста насыпи дорожного полотна высотой до 6 м не было. По данным осадкомера в дер. Быстрая, общее количество выпавших осадков до наступления пика паводка составило 19,6 мм со средней интенсивностью 0,36 мм/ч, по данным осадкомера на пике Любви — 31,4 мм с интенсивностью 0,58 мм/ч.

Таким образом, дожди могут быть продолжительными и повсеместными или интенсивными и кратковременными, нередко ливневого характера. Ливни, охватывающие небольшие участки, могут не отражаться на режиме средних рек, но при этом способны стать причиной паводка на малых водотоках. Поэтому, помимо величины и интенсивности осадков, существенную роль в формировании паводков играет площадь, охваченная осадками, и их локация на водосборе. Большое значение также имеет размер водосбора. Данные о количестве и интенсивности осадков, полученные с помощью высокогорного осадкомера ($H = 1892$ м, так называемый пик Любви), в среднем в 1,5–2,0 раза превышают показания осадкомеров, расположенных на предгорных территориях, о чем свидетельствуют разности сумм паводкообразующих осадков за периоды с непрерывными обильными осадками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всего за паводочный сезон на реках проходило до 10 дождевых паводков разной величины, из них высоких — один, реже два. Прослеживается некоторая синхронность в прохождении высоких паводков на реках, что, вероятно, обусловлено влиянием крупномасштабных атмосферных процессов. Чаще всего максимальные в году паводки проходили в июле. В период многовершинных паводков водность рек остается высокой длительное время.

Величина паводка тесно связана с его продолжительностью. Последняя колеблется от 2 до 22 сут. Значительная продолжительность характерна для высоких паводков или паводков смешанного генезиса. Продолжительность подъема в среднем в 2–3 раза меньше, чем спада. Как правило, спад прекращается на уровнях выше, чем уровни перед началом паводка, что свидетельствует о постепенном накоплении влаги в водосборном бассейне в течение паводочного сезона. Средняя скорость подъема уровня в три раза выше, чем спада. К концу лета форма паводков на многих реках становится более вытянутой, они приобретают более плавную форму подъема и продолжительный затяжной спад, пики паводков становятся более сглаженными, а скорости подъема и спада в августе–сентябре уменьшаются.

Средняя продолжительность стояния наивысших уровней во время паводков измеряется несколькими часами, поэтому для более точного анализа паводков данных с разрешением один/два раза в сутки недостаточно. Особенно это касается малых водосборов, где отмечена наименьшая продолжительность стояния пиковых уровней для небольших паводков, происходящих в середине лета. Она составляет 15–30 мин и равна заданному шагу измерений на постах. Предположительно, при уменьшении периодичности измерений минимальное значение стояния наивысших уровней может также уменьшиться. Максимальная продолжительность стояния пиковых уровней фиксируется в августе, когда паводки приобретают более плавный вид, либо в конце мая — начале июня, когда, скорее всего, дождевые паводки накладываются на снеготаяние. Для высоких паводков, которые чаще происходили в середине лета (с конца июня по начало августа), продолжительность стояния наивысших уровней также довольно большая.

От года к году наибольшие различия отмечались в высоте подъема уровня и амплитуде паводков. Максимальная высота подъема уровня, близкая к уровню выхода воды на пойму и затоплению прибрежных территорий, зафиксирована в конце июня и в конце июля 2019 г., когда в Прибайкалье прошли экстремальные паводки и паводочные наводнения [18].

Результаты показали, что параметры паводков варьируют в широких пределах и зависят от многих факторов: площади водосбора реки, формы русла, высоты берегов в месте установки приборов, рельефа и уклонов русла, наличия крупных притоков выше по течению, а также от особенностей (интенсивности, площади охвата, продолжительности) дождей. Детальная характеристика паводков и паводокоформирующих осадков в горных водосборных бассейнах имеет важное значение при оценке реакции речного стока на выпавшие осадки и позволяет приблизиться к раскрытию тонких механизмов формирования наводнений в горах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (22–27–00326).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кичигина Н.В. Опасность паводочных наводнений в бассейнах левых притоков Ангары // География и природ. ресурсы. — 2020. — Т. 41, № 4. — С. 45–55. — DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2020-4(45-55)
2. Кичигина Н.В. Опасность наводнений на реках Байкальского региона // География и природ. ресурсы. — 2018. — № 2. — С. 41–51.
3. Loukas A., Garrote L., Vasilades L. Hydrological and hydro-meteorological extremes and related risk and uncertainty // Water. — 2021. — Vol. 13 (377). — DOI: 10.3390/w13030377
4. Li T., Lee G., Kim G. Case study of urban flood inundation — impact of temporal variability in rainfall events // Water. — 2021. — Vol. 13 (23). — P. 3438. — DOI: 10.3390/w13233438
5. Wang X., Kinsland G., Poudel D., Fenech A. Urban flood prediction under heavy precipitation // Journ. of Hydrology. — 2019. — Vol. 577. — P. 1–21.
6. Bezak N., Šraj M., Rusjan S., Mikoš M. Impact of the rainfall duration and temporal rainfall distribution defined using the Huff curves on the hydraulic flood modelling results // Geosciences. — 2018. — Vol. 8, Iss. 2. — 69 p. — DOI: 10.3390/geosciences8020069
7. Korolkov V.A., Pustovalov K.N., Tikhomirov A.A., Telminov A.E., Kurakov S.A. Autonomous weather stations for unmanned aerial vehicles. Preliminary results of measurements of meteorological profiles // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. International Conference and Early Career Scientists School on Environmental Observations, Modeling and Information Systems. — 2018. — Vol. 211 (1). — P. 012069.
8. Зуев В.В., Кураков С.А., Уйманова В.А. Комплексный мониторинг погодного-климатического и гидрологического режима бассейна р. Майма (Горный Алтай): первые результаты // Ползуновский вестн. — 2017. — № 3. — С. 70–75.
9. Тихомиров А.А., Корольков В.А., Смирнов С.В., Азбукин А.А., Богушевич А.Я., Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Кураков С.А., Тельминов А.Е., Богомолов В.Ю., Кабанов М.М., Капустин С.Н., Репина И.А., Пашкин А.Д., Степаненко В.М. Метеорологические наблюдения и их приборное обеспечение в ИМКЭС СО РАН // Оптика атмосферы и океана. — 2022. — Т. 35, № 2 (397). — С. 122–131.
10. Кичигина Н.В. Организация гидрометеорологического мониторинга на селеопасных водотоках в окрестностях п. Аршан // Материалы IV Междунар. конференции «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита» (Иркутск — пос. Аршан, 6–10 сентября 2016 г.). — Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2016. — С. 94–97.
11. Кичигина Н.В., Воропай Н.Н. Мониторинг гидроклиматических характеристик в селеопасных районах Прибайкалья // Современные проблемы географии и геологии: к 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете: Материалы IV Всерос. науч.-практ. конференции с междунар. участием. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2017. — Т. 1. — С. 373–375.
12. Bilichenko I.N., Sedykh S.A., Kichigina N.N., Li Z. Impact of forest wildfires on components of mountain landscapes of the Baikal region // Journ. of Wildlife and Biodiversity. — 2022. — Vol. 6 (2). — P. 100–114. — DOI: 10.5281/zenodo.6570597
13. Кураков С.А. Система автономного мониторинга состояния окружающей среды // Датчики и системы. — 2012. — № 4 (155). — С. 29–32.
14. Каргушин В.М. Климат южной тайги Средней Сибири // Климат и воды юга Средней Сибири. — 1966. — Вып. 1. — С. 16–48.
15. Обзор сложившихся гидрометеорологических условий в субъектах Российской Федерации Сибирского федерального округа в III квартале 2022 года [Электронный ресурс]. — <https://www.drso.ru/upload/iblock/8f2/8f27d419b1c-089f3180719b217abdab6.pdf> (дата обращения 05.06.2023).
16. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. — М.: Росгидромет, 2023 — 104 с.
17. Ресурсы поверхностных вод СССР. — Л.: Гидрометеоиздат, 1972. — Т. 16, вып. 2. — 586 с.
18. Цена наводнения // Интерфакс-Россия. — 2019. — 23 авг. [Электронный ресурс]. — <http://www.interfax-russia.ru/Siberia/view.asp?id=1058665> (дата обращения 26.05.2023).

Поступила в редакцию 28.06.2023

После доработки 07.11.2023

Принята к публикации 07.05.2024