

**В.Ю. ГЕОРГИЕВСКИЙ, Е.А. ГРЕК, А.Г. ЛОБАНОВА, Т.Г. МОЛЧАНОВА**

Государственный гидрологический институт, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия Васильевского острова, 23, Россия, georg@ggi.nv.ru, elena\_greck@mail.ru, lobanovaantonina@mail.ru, molch@ggi.nw.ru

### **УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ПАВОДКА 2019 ГОДА НА РЕКЕ ИЯ И ОЦЕНКА ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК**

*На основе использования оперативных данных Иркутского УГМС представлены основные характеристики катастрофического дождевого паводка, произошедшего в период с 24 июня по 13 июля 2019 г. на реках бассейна р. Ия. Показано, что как по объему стока, так и по максимальному расходу воды паводок на р. Ия и ее притоках был наибольшим за весь период наблюдений. Рассмотрен вклад в общий объем стока за паводок различных частей водосбора р. Ия. Установлено увеличение дисперсии в колебаниях максимальных расходов воды р. Ия, начиная с 1980 г., и повышение повторяемости очень больших их величин в последние десятилетия. Это стало причиной неоднородности максимальных расходов воды за многолетний период наблюдений. Стандартные кривые распределения не позволили удовлетворительно описать эмпирические точки на кривой обеспеченности. Лишь в результате одновременного использования составных однородных распределений и учета выдающегося максимума редкой повторяемости получено согласование эмпирического и аналитического распределения максимальных расходов воды и определены расчетные параметры максимального стока р. Ия у г. Тулун. Приведены результаты оценки расчетных максимальных расходов воды и слоев дождевых паводков различной обеспеченности для гидрологического поста р. Ия – г. Тулун.*

**Ключевые слова:** нестационарность, методика расчета, вероятностные характеристики, наивысший уровень, опасное гидрологическое явление.

**V.Yu. GEORGIEVSKII, E.A. GRECK, A.G. LOBANOVA, T.G. MOLCHANOVA**

State Hydrological Institute, 199053, St. Petersburg, Vtoraya liniya Vasilyevskogo ostrova, 23, Russia, georg@ggi.nv.ru, elena\_greck@mail.ru; lobanovaantonina@mail.ru; molch@ggi.nw.ru

### **FORMATION CONDITIONS FOR THE CATASTROPHIC FLOOD OF 2019 ON THE IYA RIVER AND ASSESSMENT OF ITS CHARACTERISTICS**

*Based on operational data from the Irkutsk Hydrometeorological Service, the main characteristics of catastrophic flood that occurred in the period from June 24 to July 13, 2019 on the rivers of the Iya drainage basin are presented. It is shown that the flood on the Iya river and on its tributaries was the highest both in the runoff volume and in the maximum water discharge for the entire observation period. Contribution from the various parts of the Iya catchment to the total flood runoff is considered. An increased variance in fluctuations of the maximum water discharges since 1980 and increased repeatability of very large values of discharges over the last several decades were determined. This is a reason for the heterogeneity of the maximum water discharges for a long observation period. Standard distribution curves did not allow to adequately describing the empirical points on the probability curve. Only based on combined use of composite homo generous distributions and consideration of the outstanding rare maximum it became possible to obtain a satisfactory compliance between empirical and analytical distributions of maximum water flow rates and determine calculated parameters of the maximum discharges the Iya river near the city Tulun. Estimation of the calculated maximum water discharge and depths of flood runoff of different probability in the post the Iya river – Tulun city are presented.*

**Keywords:** nonstationarity, calculation method, probabilistic characteristics, highest level, dangerous hydrological phenomenon.

#### **ВВЕДЕНИЕ**

В период с 24 июня по 13 июля на реках бассейна Ия прошел катастрофический паводок, приведший к резкому повышению уровня воды и затоплению прибрежных территорий. На гидрологическом посту р. Ия – г. Тулун уровень воды достиг наивысшей за весь период наблюдений отметки в 1382 см (над нулем графика). Наиболее значительно пострадал г. Тулун, где прохождение паводка

сопровождалось разрушениями и прорывами дамб. В результате погибло 25 человек. В конце июля–начале августа 2019 г. по р. Ие прошел второй дождевой паводок, приведший к повторному затоплению значительной части города. Наивысший уровень воды в этот период был зафиксирован на отметке 1125 см.

Настоящая статья посвящена анализу формирования паводка, наблюдавшегося на р. Ие и ее притоках в период 26 июня по 13 июля 2019 г., количественной оценке его характеристик и определению расчетных максимальных расходов воды и слоев дождевых паводков различной обеспеченности для гидрологического поста р. Ия – г. Тулун с целью обоснования комплекса мер по обеспечению безопасной жизнедеятельности в рассматриваемом бассейне.

### ИСХОДНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Исходными данными для анализа условий формирования стока в паводок 2019 г. и определения его характеристик послужили оперативные материалы, полученные от Иркутского управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (УГМС):

- уровни воды за срок наблюдений 8 ч по гидрологическим постам р. Ия – пос. Аршан, р. Икей – с. Икей, р. Кирей – с. Уйгат за период с 01.01.2019 г. по 02.08.2019 г.;
- среднесуточные уровни воды по постам р. Ия – пос. Аршан, р. Ия – г. Тулун, р. Икей – с. Икей за период с 01.06.2019 г. по 31.08.2019 г.;
- многосрочные уровни воды по постам р. Ия – пос. Аршан, р. Ия – г. Тулун, р. Кирей – с. Уйгат за период с 01.05.2019 г. по 31.07.2019 г., по посту р. Икей – с. Икей за период с 01.06.2019 г. по 31.08.2019 г.;
- измеренные расходы воды за 1980, 1986, 2001, 2006, 2010 гг. по постам р. Ия – пос. Аршан, р. Ия – г. Тулун, р. Кирей – с. Уйгат;
- результаты гидравлического расчета максимального расхода воды на гидрологических постах р. Ия – пос. Аршан, р. Ия – г. Тулун, р. Кирей – с. Уйгат по меткам высоких вод при наивысшем уровне, зафиксированном во время дождевого паводка 1984 г.

Для оценки расчетных (вероятностных) характеристик паводка были использованы данные многолетних наблюдений за стоком и уровнем воды по четырем действующим гидрологическим постам (табл. 1).

К моменту подготовки настоящей статьи сведения о расходах воды в период паводка отсутствовали. В связи с этим были выполнены расчеты суточных и максимальных срочных расходов воды по всем гидрологическим постам.

**Река Ия – г. Тулун.** Одной из основных задач было определение расхода воды при наивысшем уровне в период прохождения паводка. Поскольку данные наблюдений за уклоном водной поверхности на участке гидрологического поста во время прохождения максимального расхода воды отсутствуют, расчет производился в соответствии с подготовленным ранее в Государственном гидрологическом институте «Пособием по экстраполяции кривых расходов воды до наивысших уровней» [1], в котором приведены методы определения расхода как при наличии, так и отсутствии измеренных уклонов водной поверхности. Расчет выполнялся двумя способами: гидравлическим (по формуле Шези) и на основе экстраполяции зависимости средней скорости течения от уровня воды. Следует отметить, что анализ многолетних данных по измеренным расходам воды показал устойчивость зависимости  $Q = f(H)$ , используемой в Иркутском УГМС в оперативной практике. Также установлено, что участок расположения гидрологического створа и нижележащий участок реки характеризуются отсутствием поймы. Площади живого сечения русла в основном гидрологическом створе и створе нижнего уклонного поста при высоких уровнях практически одинаковые. При отмеченных морфометрических особенностях рассматриваемого речного участка зависимость уклона водной поверхности от уровня характеризуется его увеличением при наполнении русла с дальнейшей стабилизацией [1].

Таблица 1

Действующие гидрологические посты Росгидромета, расположенные в бассейне р. Ии (Иркутское УГМС)

Река – гидропост	Расстояние (км) от		Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Период наблюдений	Отметка “0” поста, м БС
	истока	устья			
р. Ия – пос. Аршан	192	292	5140	1941–2019	572,42
р. Ия – г. Тулун	365	119	14 500	1920–2019	448,91
р. Икей – с. Икей	130	18	2400	1944–1979, 2012–2019	507,26
р. Кирей – с. Уйгат	150	22	2950	1949–2019	483,92

С учетом вышеизложенного, расчет расхода воды при наивысшем уровне в период паводка был выполнен при уклоне 0,73 ‰, определенным Иркутским УГМС по меткам высоких вод паводка 1984 г., второго по величине после паводка 2019 г. В соответствии с выполненным расчетом расход воды при наивысшем уровне (1382 см) составил 6800 м<sup>3</sup>/с. При этом площадь живого сечения составила 2384 м<sup>2</sup>, средняя глубина 7,63 м, средняя скорость течения 2,84 м/с. Ежедневные расходы воды в период паводка были рассчитаны по зависимости, представленной на рис. 1, а.

При гидравлических условиях, когда уклон водной поверхности стабилизируется в верхней части амплитуды уровня, вполне обоснованно и определение расхода воды на основе экстраполяции зависимости средней скорости течения от средней глубины потока [1]. Нами приведены зависимости средней скорости (см. рис. 1, б) и площади поперечного сечения (см. рис. 1, в) от уровня воды р. Ия на гидрологическом посту у г. Тулуна. При уровне воды 1382 см средняя скорость течения составляет 2,84 м/с, а площадь водного сечения — 2383 м<sup>2</sup>. Соответственно, расход воды определен равным 6770 м<sup>3</sup>/с, что очень близко к оценке, полученной гидравлическим методом (6800 м<sup>3</sup>/с).

**Река Ия – пос. Аршан, р. Икей – с. Икей, р. Кирей – с. Уйгат.** Для этих гидрологических постов ежедневные расходы определялись по кривой связи между расходами и уровнями воды  $Q = f(H)$ .

Особенность расположения гидрометрических створов на этих постах — это наличие значительных односторонних пойм шириной 200–350 м, затопляемых при высоких уровнях воды. В связи с

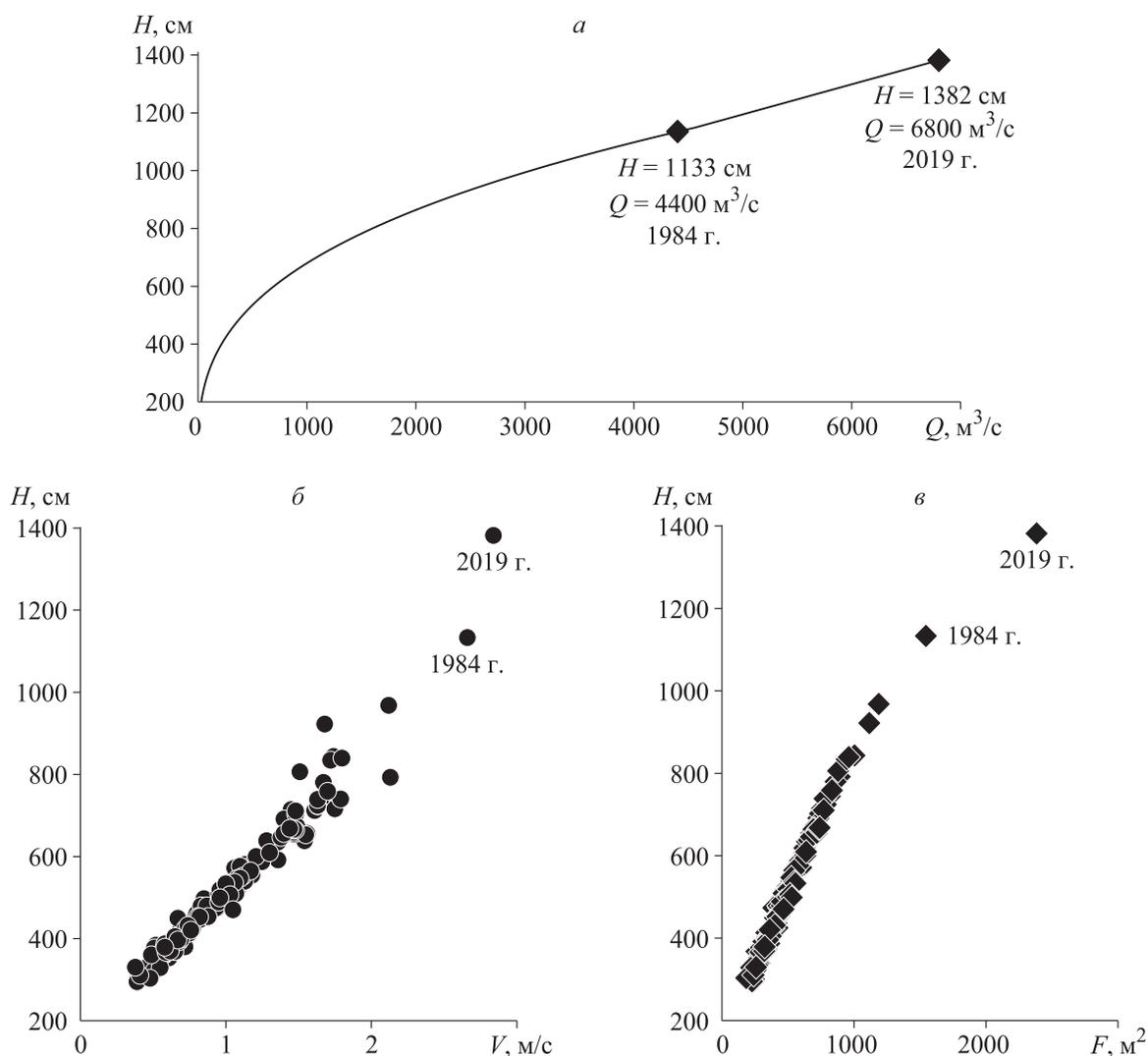


Рис. 1. Определение расходов воды на гидрологическом посту р. Ия – г. Тулун в период паводка 2019 г.

а — кривая  $Q = f(H)$ ; б — средняя скорость течения; в — площадь водного сечения.

этим приращение уровня воды при его высоких значениях весьма незначительное. Если на р. Ие у г. Тулуна наивысший уровень воды в 2019 г. превысил уровень воды 1984 г. на 249 см, то на р. Ие у пос. Аршан — на 15 см, а на р. Кирей у с. Уйгат — на 56 см. Поэтому экстраполяцию кривой расходов до высшего уровня вполне допустимо выполнять по тенденции в ее верхней части [1].

В соответствии с выполненными расчетами максимальный расход воды в период дождевого паводка 2019 г. на р. Ие у пос. Аршан составил 3000 м<sup>3</sup>/с, на р. Кирей у с. Уйгат — 1600 м<sup>3</sup>/с, на р. Икей у с. Икей — 1300 м<sup>3</sup>/с.

### ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ПАВОДКА

**Условия формирования опасных гидрологических явлений на р. Ие в районе г. Тулун.** Превышение уровня воды р. Ии на гидрологическом посту у г. Тулуна отметки 700 см приводит к началу затопления прибрежных территорий города и представляет собой опасное гидрологическое явление (ОГЯ), а соответствующий расход воды составляет 1090 м<sup>3</sup>/с. За рассматриваемый многолетний период времени превышение критического уровня наблюдалось для 28 годов. Превышения отметки 900 см, при которой затопляется значительная часть территории г. Тулуна, расположенной в пойме р. Ии, отмечались в 1980, 1984, 2006, 2019 гг. Анализ данных показывает, что превышение критического расхода происходит во время прохождения отдельных одновершинных дождевых паводков. Особенность формирования высоких паводков — это наложение на основную волну, поступающую с горной части водосбора р. Ии, паводочных волн ее основных притоков — рек Икея и Кирея.

**Условия формирования паводка, прошедшего по р. Ие в июне–июле 2019 г.** Бассейн р. Ии до г. Тулуна оказался в зоне наиболее интенсивных осадков. По данным Иркутского УГМС, в пунктах метеорологических наблюдений, расположенных в пос. Аршан, селах Икей и Уйгат и г. Тулуна, суммарный слой осадков за 4 сут составил 279, 218, 158 и 85 мм соответственно. Большая часть осадков выпала в горной части бассейна реки. К сожалению, в самой верхней (горной) части водосбора, где, вероятно, прошли наиболее интенсивные осадки, метеорологических наблюдений не проводилось. В связи с этим корректно определить количество паводкообразующих осадков на основе имеющихся данных вряд ли возможно. На рис. 2 показаны среднесуточные расходы воды в период паводка, зафиксированные на гидрологических постах на р. Ие и ее главных притоках — реках Икей и Кирей. В табл. 2 приведены основные характеристики дождевого паводка для рассматриваемых гидрологических постов.

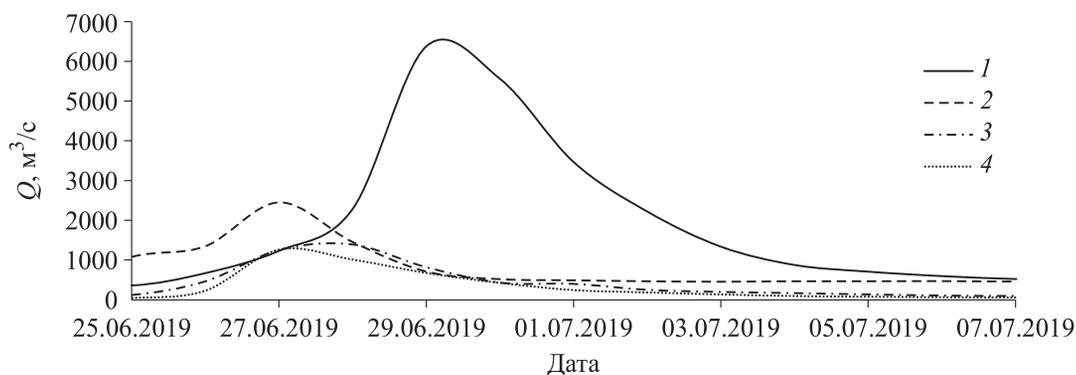


Рис. 2. Расходы воды в период паводка на гидрологических постах на р. Ие и ее притоках.

Гидропосты: 1 — р. Ия — г. Тулун, 2 — р. Ия — пос. Аршан, 3 — р. Икей — с. Икей, 4 — р. Кирей — с. Уйгат.

Таблица 2

#### Основные характеристики дождевого паводка 2019 г. на гидропостах р. Ия — г. Тулун, р. Ия — пос. Аршан, р. Икей — с. Икей, р. Кирей — с. Уйгат

Река — гидропост	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Дата начала паводка	Наибольший срочный расход воды, м <sup>3</sup> /с	Дата наибольшего срочного расхода воды	Дата окончания паводка	Слой стока, мм	Объем стока, км <sup>3</sup>
р. Ия — пос. Аршан	5140	24.06	3000	27.06.2019	10.07.2019	209	1,08
р. Ия — г. Тулун	14 500	25.06	6800	29.06.2019	13.07.2019	171	2,48
р. Кирей — с. Уйгат	2950	24.06	1600	28.06.2019	10.07.2019	183	0,54
р. Икей — с. Икей	2400	24.06	1300	27.06.2019	10.07.2019	170	0,41

Как следует из данных рис. 2 и табл. 2, увеличение расходов воды в верхней части водосбора р. Ии и на ее притоках началось практически одновременно 24 июня. Пик паводка был зафиксирован по мере продвижения волны паводка на р. Ие – пос. Аршан и на р. Икей – с. Икей – 27 июня, на р. Кирей – с. Уйгат – 28 июня, а у г. Тулуна – 29 июня. Таким образом, пик паводка на р. Ие у г. Тулуна сформировался в результате одновременного наложения паводочных волн по основному стволу реки и ее главных притоков.

Анализ характеристик паводка 2019 г. и данных многолетних наблюдений позволяет сделать вывод, что по объему стока и по максимальному расходу воды на всех четырех рассматриваемых постах дождевой паводок был наибольшим за весь период наблюдений. Из общего объема паводка на р. Ие у г. Тулуна, составляющего  $2,48 \text{ км}^3$ , на долю верхней части бассейна (до пос. Аршан) приходится 43 %, водосборов рек Икей и Кирей – соответственно 16 и 22 %. На остальной части водосбора сформировалось 19 % объема паводка.

Следует отметить, что модули максимальных срочных расходов воды на р. Ие у пос. Аршан составили  $0,58 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$ , а у Тулуна –  $0,47 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$ . Представляет интерес сравнить полученные данные с модулями максимального стока, наблюдавшимися на других горных реках во время катастрофических паводков. Так, максимальные модули во время прохождения дождевого паводка 2002 г. на р. Кубани изменялись от  $0,36 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$  (Невинномысский ГУ,  $A = 11\,000 \text{ км}^2$ ) до  $0,53 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$  (Усть-Джегутинский ГУ,  $A = 4100 \text{ км}^2$ ). На р. Адагум у г. Крымска ( $A = 328 \text{ км}^2$ ) во время катастрофического паводка 2012 г. модуль максимального стока составил  $2,9 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$ .

**Методика расчета и вероятностные характеристики паводка.** Для определения расчетных характеристик максимального стока используются вероятностные методы. В связи с этим возникает вопрос о степени соответствия эмпирических и аналитических кривых распределений, их экстраполяции в область редкой повторяемости. Важной задачей является оценка повторяемости (вероятности превышения) наблюдаемых выдающихся максимумов и их учет при определении вероятностных значений стока [2, 3]. Для сглаживания и экстраполяции эмпирических распределений в качестве основных аналитических кривых распределения, как правило, используются кривые Крицкого–Менкеля (трехпараметрическое распределение), Пирсона III типа (биномиальная кривая), логнормальное распределение, которые рекомендуются нормативными документами [3].

В США и ряде других стран наиболее часто применяются логарифмическое распределение Пирсона III типа, стандартное распределение Пирсона III типа, распределение Вейбулла и распределение Гумбеля, а также логнормальное распределение [4].

Оценки параметров аналитических кривых распределения (среднее многолетнее значение, коэффициент вариации и отношение коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации) устанавливаются по рядам наблюдений за рассматриваемой гидрологической характеристикой методом приближенного наибольшего правдоподобия или методом моментов. В последнее время в практике гидрологических расчетов при определении параметров распределения используется также метод L-моментов [5–7].

Формирование максимального стока рек в последние десятилетия происходит в условиях изменяющегося климата, что может приводить к нарушению стационарности его временных рядов. В связи с этим возникает необходимость оценки однородности рядов наблюдений на основе генетического и статистического анализа [3, 8, 9].

При неоднородных рядах наблюдений используются усеченные и составные кривые обеспеченностей [3, 8]. При расчете максимальных расходов по усеченной кривой обеспеченностей аппроксимируется только верхняя ее часть. Обычно при усечении выбираются пороговые значения максимальных расходов воды в зоне обеспеченности 30–50 %. При построении составной кривой обеспеченностей гидрологический ряд разбивается на несколько однородных выборок, каждая из которых описывается своим законом распределения. Затем строится суммарная кривая, которую и принято называть составной кривой обеспеченностей.

В последние годы в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) [10, 11], других организациях России [12–16] и за рубежом [17, 18] выполнен анализ особенности изменений максимального стока рек в условиях происходящего потепления климата. Результаты исследований ГГИ показали, что современные изменения максимального стока рек России, начавшиеся с конца 1970-х – середины 1980-х гг. для различных регионов, определяются условиями его формирования. На территориях, где максимальные расходы формируются дождевыми паводками, в конце прошлого–начале нынешнего века отмечались катастрофические наводнения, не наблюдавшиеся ранее.

Для определения расчетных параметров максимального стока по неоднородному ряду максимальных расходов с учетом выдающегося (экстремального) максимума в ГГИ был разработан алгоритм, позволяющий учесть одновременно и составные кривые обеспеченности, и исторический, редко повторяющийся максимум. Впервые данный алгоритм был реализован при расчетах параметров максимального стока на примере катастрофического паводка 2012 г. в верхней предгорной части р. Кубани [8]. Попытка построения аналитических кривых распределения и, соответственно, определения расчетных значений максимальных расходов воды по всему ряду наблюдений в створе Невинномысского гидроузла на р. Кубани не привела к удовлетворительным результатам. Применяемые аналитические распределения не смогли описать эмпирические точки. Была выявлена неоднородность самых высоких значений ранжированного ряда относительно остальных членов ряда максимальных расходов. Проведенный генетический и статистический анализ формирования максимальных расходов свидетельствовал о необходимости разделения неоднородной совокупности общего ряда на две относительно однородные выборки и дальнейших расчетов с использованием составных кривых обеспеченности. Применение составных кривых обеспеченности улучшило согласование эмпирических и аналитических распределений, но не решило задачи учета исторического (выдающегося) максимума 2002 г., повторяемость которого была получена на основе анализа архивных данных как один раз в 200 лет. Лишь одновременное использование составной (суммарной) кривой распределения и учет максимума обеспеченностью 0,5 % привели к удовлетворительному согласованию эмпирической и аналитической кривых.

Аналогичный подход был применен и при определении расчетных параметров максимального стока р. Ия у г. Тулуна. Временной ряд максимальных расходов воды дождевых паводков р. Ия — г. Тулун характеризуется также неоднородностью и наличием выдающегося значения, зафиксированного в 2019 г.

Особенности многолетних изменений максимальных расходов и слоев паводочного стока р. Ия у г. Тулун иллюстрируются данными, представленными на рис. 3, и свидетельствуют об увеличении повторяемости очень больших величин в последние десятилетия. Четко прослеживается увеличение размаха колебаний (дисперсии) максимальных расходов воды, начиная с 1980 г. В этот период от-

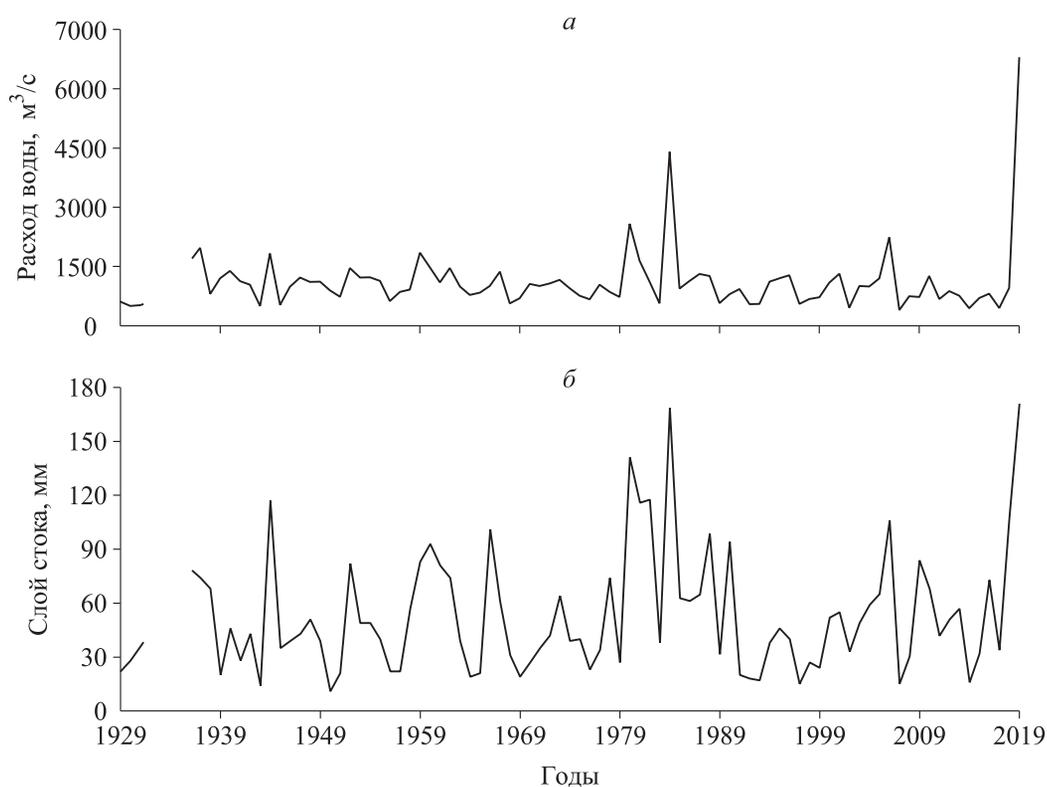


Рис. 3. Многолетние колебания максимальных расходов воды (а) и слоев паводочного стока (б) на гидрологическом посту р. Ия — г. Тулун за период с 1929 по 2019 г.

мечаются максимальные расходы воды и слои паводочного стока, значительно превышающие среднее многолетнее значение за весь период наблюдений (1980, 1984, 2006, 2019 гг.). Выполненный анализ суммарных и разностных интегральных кривых также показал, что начиная с 1980 г. отмечается перелом в их ходе — максимальные расходы и слои дождевых паводков увеличиваются по сравнению с предыдущим периодом.

Оценка однородности рядов максимальных расходов воды и слоев паводочного стока по статистическим критериям Стьюдента (для средних значений) и Фишера (для дисперсий) состояла в сравнении расчетного значения статистики критериев для однородных последовательных частей ряда, полученных по эмпирическим данным, с их критическими обобщенными значениями при заданном уровне значимости, объеме выборки, коэффициентах автокорреляции и асимметрии. Уровень значимости задавался равным 5 %. Критические значения статистик Стьюдента и Фишера, в зависимости от уровня значимости, коэффициента внутрирядной корреляции и коэффициентов асимметрии, определялись в соответствии с [3, 8, 19]. В результате выполненных расчетов было установлено, что многолетний ряд слоев дождевого стока был однородным, а максимального стока — однородным по критерию Стьюдента и неоднородным по критерию Фишера. В связи с этим дополнительно была выполнена проверка ряда максимальных расходов воды по критериям резко отклоняющихся экстремальных значений в эмпирическом распределении (критерии Диксона и Смирного–Граббса).

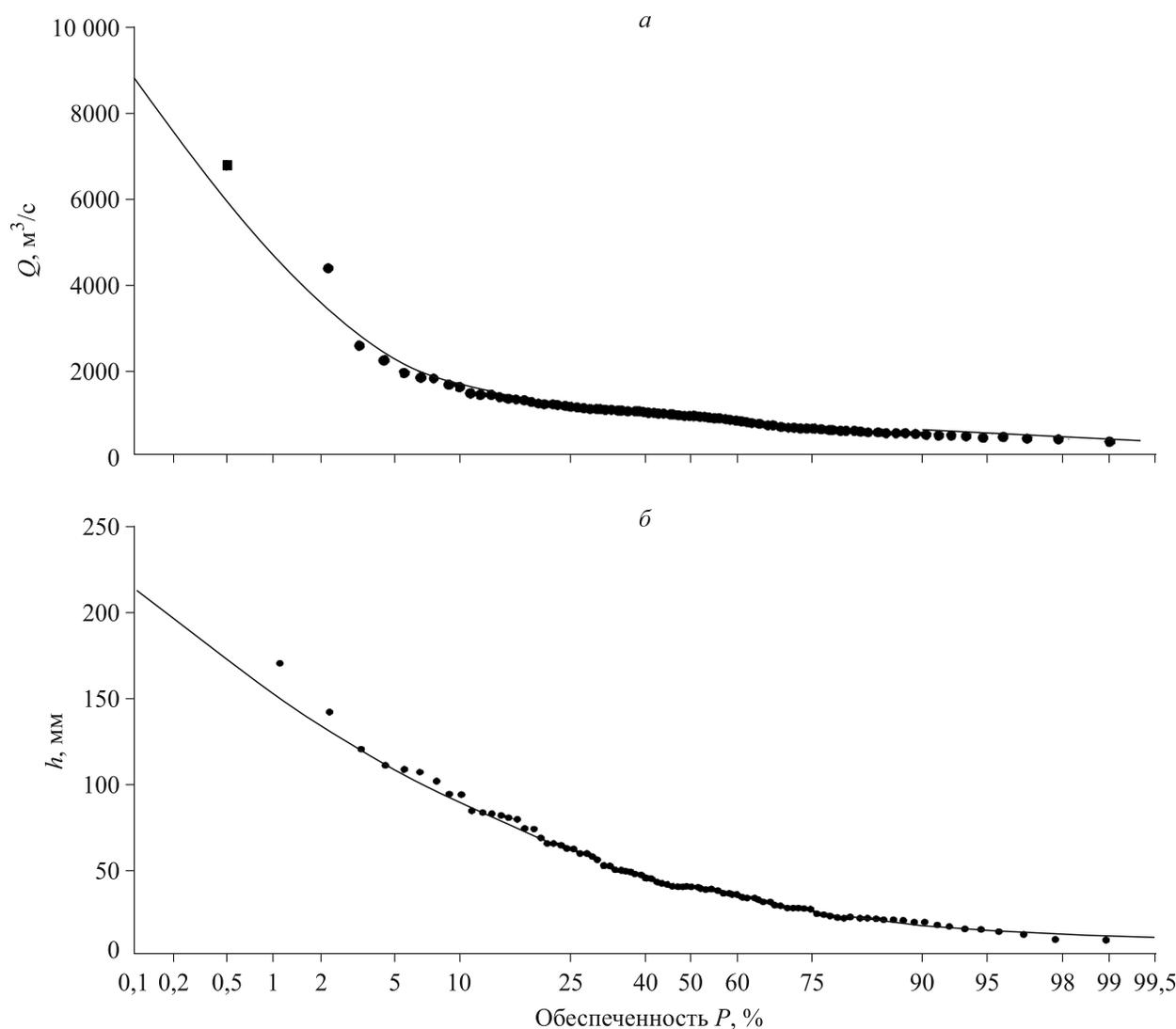


Рис. 4. Кривые обеспеченности максимальных расходов (составная) (а) и слоев паводочного стока (б).

Причины неоднородности резко отклоняющихся точек в эмпирическом ряду наблюдений могли быть следующими: наибольшее в ряду значение стока имеет повторяемость более редкую, чем она определена по эмпирической формуле анализируемого ряда; резко отклоняющиеся значения стока сформированы особыми гидрометеорологическими условиями. Оценка однородности экстремальных значений максимальных расходов показала, что максимальные расходы по р. Ия – г. Тулун в 1984 и 2019 гг. неоднородны относительно эмпирического распределения. На основании анализа исторических сведений максимальный расход 2019 г. можно отнести к разряду выдающихся. Так, Б.Д. Зайков [20], ссылаясь на работу [21], пишет следующее: «1820 г. на р. Ие, впадающей в Ангару, снесло совершенно целое селение — 27 дворов без остатка; люди спасались на карбазах и лодках. Луга большей частью затоплены и занесены илом и песком; деревья мачтовой величиной вырваны с корнем и разбросаны по лугам. Множество мостов на большой московской дороге разрушены. Самая дорога изрыта и во многих местах сообщения прерваны... Кратко: бедствия необыкновенные... Снесенное наводнением селение в Нижнеудинском уезде, о котором упоминал Сперанский, было с. Карташевское...». Можно предположить, что дождевой паводок 2019 г. был максимальным за период 1820–2019 гг.

Таким образом, выполненный анализ показал, что рекомендуемые СП 33-101 2003 [3] для сглаживания и экстраполяции кривые ежегодных вероятностей превышения распределения Крицкого–Менкеля и Пирсона III типа для рассматриваемого ряда максимального стока р. Ии у г. Тулуна, характеризующегося нестационарностью по дисперсии и наличием выдающегося (исторического) максимального расхода воды, не могут корректно описать эмпирическое распределение во всем диапазоне вероятностей. Поэтому лишь одновременное использование составных однородных распределений и учет выдающегося максимума позволили получить удовлетворительное согласование эмпирических и аналитических распределений максимальных расходов воды [8].

На рис. 4, а представлена аналитическая (составная) кривая обеспеченности максимальных расходов воды р. Ия – г. Тулун с учетом неоднородности ряда и исторического максимума, которая принята для дальнейших расчетов.

Поскольку проверка однородности ряда слоев паводочного стока по статистическим критериям Стьюдента и Фишера для периодов 1921–1979 гг. и 1980–2019 гг. показала, что ряд однороден как по среднему, так и по дисперсии, то их расчетные значения получены путем применения аналитической функции распределения ежегодных вероятностей превышения — кривых обеспеченностей (см. рис. 4, б).

Расчетные максимальные расходы воды на гидрологическом посту р. Ии у г. Тулуна обеспеченностью 1 и 0,1 % определены равными 4700 и 8840 м<sup>3</sup>/с, а слои дождевых паводков — 151 и 212 мм соответственно.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В период с 24 июня по 13 июля 2019 г. на реках бассейна р. Ии прошел катастрофический паводок, обусловленный экстремально высокими осадками, который привел к резкому повышению уровня воды и затоплению прибрежных территорий. Наиболее интенсивные осадки прошли в верхней (горной) части бассейна. Максимальные расходы воды и слои дождевых паводков, сформировавшиеся в бассейне р. Ии, оказались наибольшими за весь 90-летний период наблюдений. Генетический и статистический анализ максимальных срочных расходов воды по гидрологическому посту показал, что ряд неоднороден в результате очень значительного увеличения дисперсии в колебаниях стока в последние 40 лет. Максимальный расход 2019 г. (6800 м<sup>3</sup>/с), рассчитанный двумя способами — гидравлическим (по формуле Шези) и на основе экстраполяции зависимости средней скорости течения от уровня воды, является выдающимся. Исторические данные за многолетний период позволили сделать вывод, что указанный расход не превышался в последние 200 лет. Расчетные максимальные расходы воды на гидрологическом посту р. Ии у г. Тулуна обеспеченностью 1 и 0,1 % определены равными 4700 и 8840 м<sup>3</sup>/с, а слои дождевых паводков — 151 и 212 мм соответственно. Эти результаты могут быть использованы при обосновании и проведении мероприятий по защите г. Тулуна от наводнений.

Анализ изменений максимального стока рек в условиях происходящих изменений климата для ряда регионов России показывает, что в последние десятилетия отмечается увеличение паводков, формирующихся в результате интенсивных дождей, и частоты появления высоких расходов воды малой обеспеченности. Адаптация к опасным гидрологическим явлениям представляется одной из актуальных проблем современной гидрологии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пособие** по экстраполяции кривых расходов воды до наивысших уровней. — Л.: Гидрометеиздат, 1966. — 102 с.
2. **Крицкий С.Н., Менкель М.Ф.** Гидрологические основы управления водохозяйственными системами. — М.: Наука, 1982. — 271 с.
3. **Свод правил.** СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик / Науч. рук. А.В. Рождественский. — М: Госстрой России, 2004. — 73 с.
4. **Casebook of Methods for Computing Hydrological Parameters for Water Projects: A Contribution to the International Hydrological Programme** / Ed. M.L. Lowing, M.J. Lowing. — U.S. California: Unesco, 1987. — 324 p.
5. **Hosking J.R.M., Wallis J.R.** Regional Frequency Analysis: An Approach Based on L-Moments. — New York: Cambridge University Press, 1997. — 224 p.
6. **Сикан А.В., Винокуров И.О., Тесленко Д.Д.** Использование метода L-моментов для оценки параметров распределения расходов весеннего половодья рек Северо-Запада России // Уч. зап. Рос. гос. гидрометеол. ин-та. — 2015. — № 38. — С. 21–27.
7. **Руководство** по гидрологической практике. Т. 2: Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов. — Женева: Всемир. метеорол. организация, 2012. — 324 с.
8. **Методические рекомендации** по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным / Под ред. А.В. Рождественского, А.Г. Лобановой. — СПб.: Нестор-История, 2010. — 162 с.
9. **СТО ГГИ 52.08.41-2017.** Основные гидрологические характеристики при нестационарности временных рядов, обусловленной влиянием климатических факторов. Рекомендации по расчету. — СПб.: Изд-во Гос. гидролог. ин-та, 2017. — 42 с.
10. **Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Грек Е.Н., Лобанова А.Г., Молчанова Т.Г.** Оценка современных изменений максимального стока рек России // Метеорология и гидрология. — 2019. — № 11. — С. 46–55.
11. **Георгиевский В.Ю., Грек Е.А., Грек Е.Н., Лобанова А.Г., Молчанова Т.Г.** Пространственно-временные изменения характеристик экстремального стока рек бассейна Волги // Метеорология и гидрология. — 2018. — № 10. — С. 8–16.
12. **Атлас** природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций Сибирского федерального округа России / Под ред. С.К. Шойгу. — М.: Дизайн. Информация. Картография, 2009. — 384 с.
13. **Зуляр Ю.А.** Проблемы экологической безопасности Прибайкалья // Проблемы национальной безопасности в контексте развития Восточно-Сибирского региона: Материалы межрегион. науч.-практ. семинара (25–27 мая 2004 г.). — Иркутск: Анонс, 2005. — С. 16–23.
14. **Материалы** в ежегодный государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера за 2008–2015 гг.». — Иркутск: Глав. упр. МЧС России по Иркутской области, 2008–2016.
15. **Корытный Л.М., Кичигина Н.В.** Наводнения на реках Восточной Сибири: генезис, повторяемость, опасность // Доклады VI Всерос. гидрол. съезда. — М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. — С. 87–92.
16. **Семёнов В.А., Гниломедов Е.В., Салугашвили Р.С., Голубев В.Н., Фролов Д.М.** География распределения и генезис климатообусловленных изменений экстремальных расходов воды, опасных наводнений и маловодий на реках России // Труды НИИ Гидрометеорол. информ. — 2015. — Вып. 179. — С. 108–120.
17. **IPCC, 2013:** Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Ed. T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. — Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2013. — 1535 p.
18. **Climate Change 2014:** Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Ed. O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth. — Cambridge: Cambridge University Press, 2015. — 151 p.
19. **Рождественский А.В., Сахарюк А.В.** Обобщение критериев однородности Стьюдента и Фишера на случай коррелированных во времени и пространстве гидрологических характеристик // Труды Гос. гидролог. ин-та. — 1981. — Вып. 282. — С. 51–71.
20. **Зайков Б.Д.** Высокие половодья и паводки на реках СССР за историческое время. — Л.: Гидрометеиздат, 1954. — 133 с.
21. **Вагин В.И.** Исторические сведения о деятельности графа М.М. Сперанского в Сибири с 1819 по 1822 год. Собраны В. Вагиным. — СПб.: Типография 2-го отделения Собственной Его Императорского Величества канцелярии, 1872. — Т. 2. — 752 с.

*Поступила в редакцию 17.02.2020*

*После доработки 20.04.2020*

*Принята к публикации 25.06.2020*