

О.М. МАКАРЬЕВА*, Н.В. НЕСТЕРОВА*, А.Д. ФЕДОРОВА**, А.Н. ШИХОВ***, Т.А. ВИНОГРАДОВА**,****

*Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция
Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 685000, Магадан, ул. Портовая, 16,
Россия, omakarieva@gmail.com, nnesterova1994@gmail.com

**Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург,
Университетская набережная, 7–9, Россия, alexandra120559@gmail.com, vinograd1950@mail.ru

***Пермский государственный национальный исследовательский университет,

614068, Пермь, ул. Букирева, 15, Россия, and3131@inbox.ru

****ООО «НПО «Гидротехпроект»», 199178, Санкт-Петербург,

14-я линия Васильевского острова, 97, лит. А, пом. 3-Н, Россия, vinograd1950@mail.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШИТЕЛЬНЫХ ПАВОДКОВ ЛЕТОМ 2019 Г. НА РЕКЕ ИЕ (ИРКУТСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Представлены результаты исследования факторов, которые привели к образованию катастрофического наводнения в июне 2019 г. на реке Ие в г. Тулуе Иркутской области, а также расчет и оценка характеристик этих паводков. Выполнена оценка метеорологической ситуации условий формирования паводка с использованием глобальной модели прогноза погоды ICON. Проведен анализ трендов гидрометеорологических характеристик за период 1966–2019 гг. Выявлены повышение количества осадков в июне на 36–61 % (31–46 мм) и отрицательные тренды максимальных расходов воды величиной 24–37 % с мая по сентябрь. На основе данных об уровне воды и исторических кривых $Q(H)$ величина максимального суточного расхода воды 29 июня 2019 г. оценена как $6800 \pm 700 \text{ м}^3/\text{с}$. Выполнена схематизация водосбора р. Ие, систематизированы параметры и проведена верификация распределенной гидрологической модели «Гидрограф». Для трех водосборов в бассейне р. Ие медианное значение критерия Нэша–Сатклиффа составило 0,69 за период 1970–1996 гг. Проведены моделирование и оценка характеристик паводка на основе двух источников метеорологических данных. При использовании данных метеостанций максимальный рассчитанный суточный расход составил $6570 \text{ м}^3/\text{с}$. Эта величина попадает в диапазон оценок наблюдаемых значений, но его формирование запаздывает на 1 сут. Максимальный рассчитанный 3-часовой расход на основе данных модели ICON составил $5260 \text{ м}^3/\text{с}$, что как минимум на $840 \text{ м}^3/\text{с}$ ниже наблюдаемого значения, однако гидрограф паводка совпадает с наблюдаемым по срокам. Ансамбль входных метеорологических данных из разных источников потенциально мог быть использован для удовлетворительного прогноза величины и срока катастрофического паводка на р. Ие. Результаты исследования подтверждают принципиальную возможность краткосрочного прогноза паводка, а также уточнения расчетных характеристик стока на основе использования метода детерминированного гидрологического моделирования.

Ключевые слова: катастрофический паводок, гидрологическая модель «Гидрограф», максимальный расход воды, модель погоды ICON, осадки, гидрографы стока.

О.М. MAKARIEVA*, N.V. NESTEROVA*, A.D. FEDOROVA**, A.N. SHIKHOV***, T.A. VINOGRADOVA**,****

*North-East Research Permafrost Station of Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, 685000, Magadan, ul. Portovaya, 16, Russia,
omakarieva@gmail.com, nnesterova1994@gmail.com

**St. Petersburg State University, 199034, St. Petersburg, Universitetskaya naberezhnaya, 7–9,
Russia, alexandra120559@gmail.com, vinograd1950@mail.ru

***Perm State National Research University, 614068, Perm, ul. Bukireva, 15, Russia, and3131@inbox.ru

****OJSC SPA Gidrotekhproekt, 199178, St. Petersburg,

Chetyrnadtsataya liniya Vasilyevskogo ostrova, 97, lit. A, pom. 3-N, Russia, vinograd1950@mail.ru

MODELING OF THE SUMMER 2019 DISASTROUS FLOODS ON THE IYA RIVER (IRKUTSK OBLAST)

The paper discusses the results of investigation of the factors that led to the formation of a catastrophic flood in June 2019 on the Iya river in Tulun town, Irkutsk oblast, as well as a calculation and assessment of the characteristics of these floods. An

analysis of the meteorological environments of flood formation is performed by using the ICON global weather forecast model. The trends in hydrometeorological characteristics for the period 1966–2019 are analyzed. The study revealed an increase in the precipitation amount in June by 36–61 % (31–46 mm), and negative trends in the maximum water discharges making up 24–37 % from May to September. Using the data on the water level and historical Q(H) curves, the maximum daily water discharge on June 29, 2019 was estimated at $6800 \pm 700 \text{ m}^3/\text{s}$. A schematization of the Iya river basin is carried out, the parameters are systematized and the distributed hydrological model Hydrograph is verified. For three sub-basins within the Iya river basin, the median value of the Nash–Sutcliff criterion was 0.69 for the period 1970–1996. The flood characteristics are simulated and assessed using two sources of meteorological data. According to the data from weather stations, the maximum daily discharge was $6570 \text{ m}^3/\text{s}$. This value falls within the range of estimates of observed values but its formation is delayed by 1 day. According to the simulation based on the ICON model data, the maximum 3-hour discharge reached $5260 \text{ m}^3/\text{s}$, or at least $840 \text{ m}^3/\text{s}$ lower than the observed value; however, the simulated flood hydrograph coincides with observed one for the time intervals. The results of the study confirm a possibility for a short-term flood forecast using the method of deterministic hydrological modelling

Keywords: catastrophic flood, Hydrograph hydrological model, maximum water discharge, ICON weather model, extreme precipitation; streamflow hydrographs.

ВВЕДЕНИЕ

Иркутская область — один из наиболее паводкоопасных регионов России. В зонах возможного затопления в Иркутской области расположены 222 населенных пункта, в том числе восемь городов: Тулун, Киренск, Нижнеудинск, Иркутск, Усть-Кут, Черемхово, Зима, Ангарск. Площадь периодически затопляемых пойменных земель превышает $25\,000 \text{ км}^2$, или около 4 % от общей площади региона [1].

Здесь наводнения часто имеют смешанный генезис — на половодье накладываются дожди или заторы, а дождевые паводки в некоторые годы усугубляются селями. Наибольшую опасность представляют собой паводочные наводнения в южных районах Иркутской области. Они имеют наибольшую повторяемость, площади затопления, наносят значительный экономический ущерб и приводят к гибели людей. Прогнозируемость таких наводнений, определяемая степенью успешности прогнозов осадков, остается достаточно низкой.

Ранее крупные наводнения в южной части Иркутской области наблюдались в 1984, 1996 и 2001 гг., наиболее разрушительным из них было наводнение в июле 2001 г. [1]. Несмотря на высокую повторяемость разрушительных паводков, в Атласе природных и техногенных опасностей и рисков [2] юг Иркутской области отнесен к зоне умеренно опасных наводнений.

Летом 2019 г. на реках Иркутской области, стекающих с гор Восточного Саяна (Ие, Уде, Бирюсе и Оке), прошли две волны экстремальных дождевых паводков, приведших к затоплению г. Тулуна и других населенных пунктов в пойме реки и ставших самыми разрушительными в регионе за всю историю инструментальных наблюдений. Наибольший подъем уровня воды был зафиксирован на посту р. Ия — г. Тулун (с 474 до 1387 см за трое суток) в период первого паводка с 26 июня по 5 июля 2019 г. Зафиксированный уровень воды более чем на 5 м превысил опасную отметку 850 см и более чем на 2,5 м — исторический максимум 1133 см, отмечавшийся в 1984 г. Всего при наводнении пострадали 107 населенных пунктов, погибли 25 человек и 8 пропали без вести [3]. По предварительным данным, материальный ущерб от паводка в регионе составил 29 млрд руб. [4]. В работе [5] приведена оценка зоны затопления и даны рекомендации по минимизации последствий.

В период с 28 июля по 4 августа 2019 г. на р. Ие произошел еще один значительный паводок (максимальный уровень воды достиг отметки 1121 см). По масштабу он сопоставим с паводком 1984 г., до 2019 г. считавшимся максимальным.

Среди обсуждаемых причин экстремального паводка в июне 2019 г. — сильные продолжительные дожди как результат изменений климата, таяние снега и ледников в горах Восточного Саяна, обезлесение бассейнов рек из-за вырубок и пожаров и др. [6].

Цель исследования — анализ факторов, приведших к формированию катастрофического паводка в июне 2019 г., а также расчет и оценка характеристик паводков в июне и июле 2019 г. на р. Ие. Для расчета режима и величины паводков применялся метод математического моделирования, что также позволило оценить современные возможности этого метода для прогноза катастрофических гидрологических явлений. Для расчетов использовалась детерминированная распределенная гидрологическая модель «Гидрограф» [7], данные наблюдений метеорологических станций и прогноз по глобальной модели прогноза погоды ICON [8].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПАВОДКА

Река Ия берет начало на северных склонах Восточного Саяна высотой до 2789 м над ур. моря (гора Холба) при слиянии рек Холбы и Хиаи. Водораздельная линия бассейна р. Ии проходит на юго-западе по Удинскому хребту, на юге — Окинскому хребту, на северо-западе — Бирюсинскому хребту. В орографическом отношении территория бассейна делится на две части: горную (от истока до Передового хребта) и равнинную. Водный режим реки характеризуется невысоким весенне-летним половодьем, интенсивными дождевыми паводками, следующими друг за другом, и низкой зимней меженью [9].

Климат территории резко континентальный: зима морозная, малооблачная с небольшим количеством осадков, что обусловлено образованием над территорией мощных малоподвижных антициклонов; лето короткое, относительно жаркое, в это время над территорией развиваются циклоны, с которыми связано выпадение значительного количества осадков. Среднегодовая температура воздуха на метеорологической станции (м/с) Икей за период 1966–2012 гг. составила $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Осадки в течение года распределены неравномерно, около 80 % годовой суммы выпадает в летний период. Дожди летом

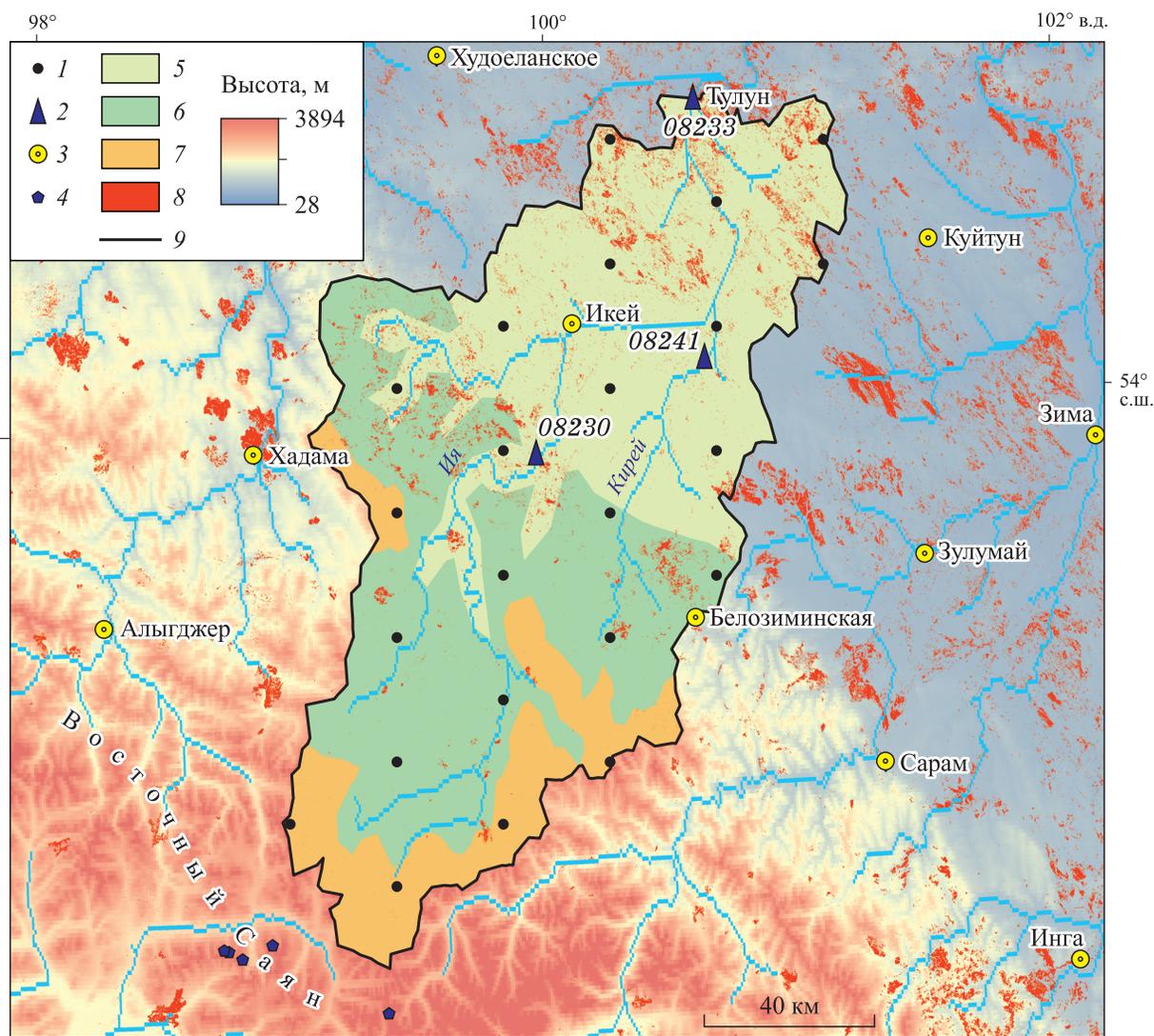


Рис. 1. Схема бассейна р. Ия – г. Тулун.

1 — расчетная точка; 2 — гидрологический пост; 3 — метеорологическая станция; 4 — ледники; 5 — долина; 6 — хвойные леса; 7 — гольцы; 8 — нарушение лесного покрова; 9 — граница водосбора.

бывают как обложного, так и ливневого характера. Годовая сумма осадков колеблется от 350 мм (м/с Куйтун) до 760 мм (м/с Белозиминская) (рис. 1).

Водосбор р. Ии относится к зоне темнохвойной тайги. В горах значительные территории занимают гольцы — скалистые склоны без растительности [10]. В высокогорных частях бассейна встречаются единичные скопления «вечного» снега, однако ледники находятся за пределами водосбора (см. рис. 1) [11].

Анализ существующей гидрометеорологической информации. В бассейне р. Ии в настоящее время действуют три гидрологических поста, на которых проводятся измерения расходов воды. Их характеристики приведены в табл. 1. Гидрологический пост р. Ия — г. Тулун расположен в 4 км ниже г. Тулуна, в 1,2 км ниже железнодорожного моста. Площадь водосбора составляет 14 500 км² [12]. Наблюдения за стоком ведутся с 1921 г., а непрерывные данные по максимальным уровням и расходам воды опубликованы с 1936 г. [12, 13], с 2008 г. данные опубликованы в [14]. Основная доля стока формируется в горной части водосбора; так, на 8090 км² (56 % площади водосбора) приходится около 280 мм/год стока, а на оставшуюся равнинную часть — около 50 мм/год, что в сумме составляет 330 мм/год в створе гидрологического поста в г. Тулуно.

В пределах бассейна р. Ии в настоящее время действуют две метеостанции — Икей и Тулун, обе расположены в равнинной части водосбора. До 1999 г. поблизости от восточной границы водосбора действовала м/с Белозиминская (высота 755 м), на которой годовое количество в 1,6–1,8 раза превышало количество осадков на ныне действующих станциях. Таким образом, по основной стокоформирующей части водосбора уже более 20 лет отсутствуют данные наблюдений за осадками и другими метеорологическими величинами.

Наиболее высокие паводки на р. Ие ранее наблюдались в 1980, 1984 (максимальный) и 2006 гг. Согласно описаниям [12], максимальный расход воды паводка 1984 г. определялся на основе кривой Q(H) 1981 г. Кривая Q(H) 81,84 была выведена на расход 4400 м³/с, определенный по меткам максимального уровня 1133 см, зафиксированного 23 июля 1984 г. Освещенность кривой Q(H) в 1984 г. составила 99 %, а максимальный измеренный расход — 4100 м³/с. В 1981 г. освещенность кривой Q(H) составила 98 %, максимальные измеренный и рассчитанный расходы — 2520 и 1620 м³/с соответственно [12]. В 1980 г. освещенность кривой Q(H) составила 99 %, а максимальные измеренный и рассчитанный расходы — 2520 и 2580 м³/с соответственно [13]. Таким образом, можно констатировать, что сток в период паводков 1980 и 1984 гг. вычислен с высокой степенью надежности. Важно отметить, что после 1984 г. до 2006 г. значительных паводков на р. Ие не наблюдалось, и можно предположить, что в связи со значительным ухудшением ситуации в работе сети Росгидромет данные 1980–1984 гг. являются наиболее достоверными и могут быть использованы для оценки расхода воды в период паводков 2019 г. Экстраполяция обеих кривых до уровня воды 1360 см, зафиксированного 30 июня 2019 г., дает разброс величин расхода воды от 6100 до 7500 м³/с.

Метеорологические условия формирования паводка в июне 2019 г. Для оценки метеорологических условий формирования паводка были использованы данные глобальной модели прогноза погоды ICON, разработанной метеослужбой Германии (DWD) [8]. Суточные прогнозы данной модели от 00 ч Всемирного скоординированного времени (BCV) получены с ftp-сервера DWD [15] с шагом по времени 3 ч и пространственным разрешением 13 км. Такое разрешение можно считать достаточным для прогноза зон осадков, формирующихся за счет процессов синоптического масштаба (т. е. циклонов и их атмосферных фронтов).

Таблица 1

Основные характеристики гидрологических постов

Код поста	Река — створ	S	H ₁ /H ₂ /H ₃	R	Q ₁ /Q ₂	D	Y ₀	P
8230	Ия — пос. Аршан	5140	2781/570/1483	4,7	2810/1920	20.07.1984	534	1963–2017
8233	Ия — г. Тулун	14500	2781/436/979	2,4	4400/4040	23.07.1984	331	1941–2017
8241	Кирей — с. Уйгат	2950	2485/485/873	4,4	1210/931	21.07.1984	443	1959–2017

Примечание. S — площадь водосбора, км²; H₁, H₂, H₃ — максимальная, минимальная и средняя высота водосбора соответственно, м; R — средневзвешенный уклон реки, ‰; Q₁, Q₂ — максимальный срочный и суточный расход воды за указанный период наблюдений, м³/с; D — дата максимального расхода до 2019 г.; Y₀ — средний годовой слой стока, мм; P — период наблюдений за расходами воды, годы.

Экстремальные осадки, выпавшие на водосборе р. Ии 25–27 июня 2019 г., были обусловлены смещением изолированного высотного (тропосферного) циклона со стороны Западной Сибири и его последующей регенерацией в районе западной части Байкала. Циклон сформировался как самостоятельное барическое образование 22 июня над центральной частью Западной Сибири и в последующие двое суток смещался через Новосибирскую и Кемеровскую области.

К утру 24 июня смещающийся с запада на восток холодный фронт достиг центральных районов Красноярского края и Хакасии. Сформировавшаяся к вечеру 24 июня зона сильных дождей была ориентирована через г. Канск на юго-восток, в среднюю (предгорную) часть бассейнов рек Уды и Ии.

К вечеру 25 июня фронт был ориентирован по линии от Красноярска на центральную часть Байкала. В зоне осадков оказалась вся северная (равнинная) часть бассейна р. Ии, включая г. Тулун. В соответствии с данными модели ICON, наибольшее количество осадков за период с 00 ч ВСВ 25 июня по 00 ч ВСВ 26 июня прогнозировалось в северо-восточной части бассейна р. Ии (до 90 мм). В самом Тулуно за это время выпало 68 мм, что очень близко к прогнозному значению. В горной части бассейна ожидаемое количество осадков за сутки составило всего 20–30 мм. Осадки, выпавшие 25–26 июня, сформировали первую волну паводка.

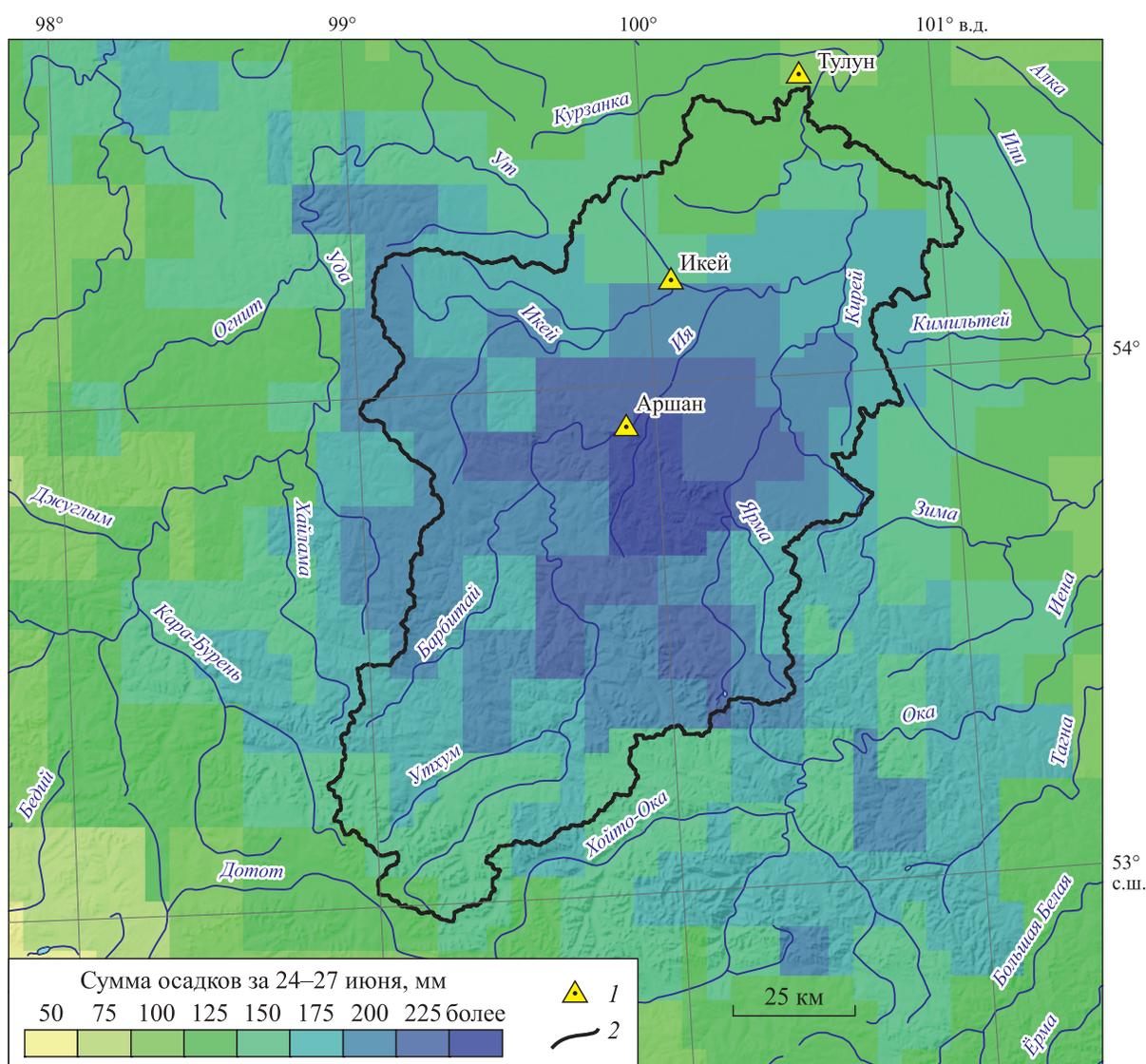


Рис. 2. Пространственное распределение суммы осадков за период 24–28 июня 2019 г. по данным модели ICON.

1 — метеостанции; 2 — граница бассейнов рек.

26 июня произошло углубление высотного циклона в сторону гор Восточного Саяна, сложились все условия для орографического усиления осадков. Происходило натекание воздушной массы с высоким влагосодержанием на достаточно высокий (до 2800 м) горный хребет. По данным гидропоста Аршан, за двое суток выпало 255 мм [16]. В соответствии с прогнозом модели ICON, количество осадков с 00 ч ВСВ 26 июня по 00 ч ВСВ 27 июня в средней части бассейна ожидалось в пределах 90–100 мм, а в высокогорной — 50–70 мм. Осадки, выпавшие 26 июня, сформировали вторую, наиболее высокую и разрушительную волну паводка.

Всего за период с 00 ч ВСВ 24 июня по 00 ч ВСВ 28 июня в среднем по бассейну р. Ии, по данным модели ICON, прогнозировалось выпадение 170 мм осадков, в средней (предгорной) части бассейна — до 250 мм. В высокогорной части бассейна р. Ии количество осадков прогнозировалось в пределах 125–150 мм.

Сравнение модельных и фактических данных об осадках на метеостанциях Тулун и Икей показало, что, согласно модели, значительные суммы осадков выпали сутками ранее, чем наблюдались фактически, однако общая сумма осадков, по данным модели и наблюдений, расходится не более чем на 7 %. Но модель недооценила количество осадков в центральной части бассейна, возможно, в связи со сравнительно низким разрешением, что ведет к сглаживанию полей осадков. По этой же причине модель может занижать эффект орографического усиления осадков в горах. Тем не менее данные модели позволили получить реалистичную картину пространственного распределения осадков по бассейну (рис. 2) и объяснить некоторые ключевые особенности формирования паводка.

Таяние снега и ледников. Как одна из возможных причин экстремального паводка в СМИ упоминалось таяние снега и ледников в горной части бассейна р. Ии. Однако проведенный анализ спутниковых снимков и результатов моделирования позволяет опровергнуть эту гипотезу. Снежный покров в бассейне р. Ии на момент формирования паводка практически полностью сошел. По спутниковому снимку Landsat-8 за 23.06.2019 установлено, что даже в горной части бассейна на тот момент снегом было покрыто менее 10 % площади. Как уже упоминалось выше, ледники в бассейне р. Ии отсутствуют (см. рис. 1).

Вырубки и пожары. Известно, что в первые годы после нарушения естественного растительного покрова леса вследствие вырубок или пожаров может наблюдаться формирование поверхностного стока, понижение испарения и другие изменения гидрологического режима, приводящие к повышению максимальных расходов воды [17].

Иркутская область занимает первое место в России по площади вырубки леса, однако основные районы лесозаготовок находятся севернее [18]. По данным Global Forest Change [18], за 2000–2018 гг. площадь потерь лесов в бассейне р. Ии составила не более 4 % (или 580 км²) от общей площади водосбора (см. рис. 1). В значительной степени эти потери обусловлены пожарами, а не вырубкой. Сравнительно невысокая доля нарушенной территории в бассейне р. Ии позволяет считать этот фактор незначительным в формировании катастрофического паводка.

Изменения климата. С целью оценки изменений гидрометеорологического режима был проведен анализ характеристик стока (месячные слои и максимальные расходы для теплого периода) для трех гидрологических постов, а также анализ метеорологических элементов (температура воздуха и характеристик осадков) для семи метеорологических станций на наличие трендов и рассчитаны их величины. Для выявления трендов использовался метод Манна–Кендалла с уровнем значимости $p < 0,05$ [19, 20], для оценки величины трендов применялся метод Тейла–Сена [21].

Анализ данных показал, что годовые значения температуры воздуха повысились на 1,2–2,1 °С. При этом значительное повышение температуры воздуха наблюдается в феврале — на 4,1–5,7 °С. В другие месяцы температура менялась следующим образом: в мае она повысилась на 1,7–2,4 °С, в июле и августе — на 1,6–2,4, в октябре — на 2,1–2,6 °С. На пяти из семи метеорологических станциях зафиксировано увеличение количества осадков в июне на 34–61 %, что в абсолютных величинах составляет 31–46 мм; на двух станциях отмечается рост осадков в сентябре на 36–39 % (или 20–24 мм).

На двух гидрологических постах на р. Ие выявлено наблюдающееся повсеместно в Сибири [22, 23] повышение минимального стока в период с ноября по апрель. Суммарная величина тренда составляет 12–17 мм, или 43–49 % за указанные месяцы. В теплый период повышение стока не наблюдается, скорее наоборот, можно отметить статистически незначимое понижение стока в период с июня по август. Такие же незначительные изменения наблюдаются на р. Кирей (пост 8241), повышение стока в зимний период на этой реке не фиксируется. Что же касается максимальных суточных расходов

воды, то для поста в г. Тулуна за период наблюдения 1941–2017 гг. величина отрицательного тренда составила 180 м³/с (36 %) в мае и 289 м³/с (38 %) в июле (уровень значимости $p < 0,05$). В июне и августе величины отрицательного тренда составили 158 м³/с (24 %) и 202 м³/с (24 %) соответственно, но с более низким уровнем значимости $p = 0,08$. Изменений годовых слоев стока на рассматриваемых водосборах не происходит.

ВЕРИФИКАЦИЯ ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ «ГИДРОГРАФ»

Для исследования условий развития паводков 2019 г. в бассейне р. Ии использована распределенная детерминированная гидрологическая модель «Гидрограф» [1, 24]. Она представляет собой работоспособный инструмент исследования гидрологических процессов и оценки характеристик стока в различных физико-географических условиях [25–29]. Модель «Гидрограф» применяется на объектах любых размеров: от почвенной колонки или элементарного склона до крупных речных бассейнов без изменения структуры и алгоритмов [30–32]. Описание модели и методы ее параметризации подробно представлены в указанных публикациях и будут описаны в данной работе очень кратко.

В целях параметризации бассейн р. Ии был разбит на три стокоформирующих комплекса (СФК): гольцы, темнохвойный лес и долины рек (см. рис. 1). Оконтуривание СФК проводилось на основе спутниковых снимков Landsat и ландшафтной карты СССР [33]. Данный подход позволяет расширять информацию, полученную с помощью снимков, подробными описаниями ландшафтов.

Гольцовый комплекс сформирован альпийскими горами с распространенными на них тундрами, покрытыми стлаником, и гольцами скалами. Темнохвойный лес состоит из кедра, пихты и ели на горных склонах. Долины рек представляют собой поймы и надпойменные террасы с лугами и злаково-разнотравными лесами с участками низинных болот. В пределах гольцов формируется быстрый сток с отсутствием перехвата влаги растительностью и малым задержанием влаги в почвогрунтах, хвойные леса, наоборот, отличаются большой способностью перехвата и формированием почвенного стока. В пределах долинного комплекса значительную роль играет испарение, величина которого может превышать 80 % от годового количества осадков.

Водосбор р. Ии также был покрыт регулярной сеткой репрезентативных точек (РТ), в узлы которой в процессе моделирования с учетом высотных градиентов интерполируются данные метеорологических станций.

Параметры СФК определялись на основе ранее выполненных работ [27, 31] с использованием справочных материалов о водно-физических свойствах почвогрунтов [34], а также материалов наблюдений на опорных станциях комплексной водобалансовой и агрометеорологической сети почвенно-испарительных и снегоиспарительных пунктов [35]. В настоящей работе были использованы сведения станции Солянка (Красноярский край, 365 км от г. Тулуна) об агрогидрологических свойствах почвы, глубине протаивания и промерзания, испарении с поверхности суши и снежного покрова.

Для верификации модели «Гидрограф» проведено моделирование стока для трех действующих створов (см. табл. 1) с суточным шагом. Период моделирования 1970–1996 гг. определялся наличием метеоданных для семи станций, в том числе м/с Белозиминская, наиболее репрезентативной для горной части водосбора и закрытой после 1996 г. (см. рис. 1).

Результаты моделирования элементов водного баланса и величины критерия эффективности моделирования Нэша–Сатклифа (NS) [36] представлены в табл. 2.

Таблица 2

Водный баланс и критерии эффективности, 1970–1996 гг.

Код поста	Река – створ	S, км ²	Y _о	Y _с	P	E	NS (значение/среднее)	NS (макс, год)	NS (мин, год)
8230	Ия – пос. Аршан	5140	540	528	771	243	0,69/0,62	0,80 (1974)	0,10 (1971)
8233	Ия – г. Тулун	14 500	326	338	586	247	0,72/0,67	0,86 (1972)	0,32 (1983)
8241	Кирей – с. Уйгат	2950	374	402	688	286	0,66/0,57	0,85 (1972)	–0,11 (1993)

Примечание. Y_о и Y_с – зафиксированный и рассчитанный среднемноголетний годовой слой стока соответственно, мм; P, E – рассчитанные осадки и испарение соответственно, мм.

Рассчитанные величины среднемноголетнего годового слоя осадков составили 586 мм для бассейна р. Ия – г. Тулун и 771 мм для р. Ия – пос. Аршан. Рассчитанные и зафиксированные величины стока составили 338 и 326 мм для бассейна р. Ия – г. Тулун и 528 и 540 мм для бассейна р. Ия – пос. Аршан соответственно. Рассчитанная годовая величина испарения составляет около 250 мм. Минимальные и максимальные значения годового слоя осадков и стока в бассейне р. Ия – г. Тулун наблюдались в 1993 и 1986 годах. Они составили в 1993 г. (сухой год) 400 и 205 мм, а в 1986 г. — 765 и 440 мм соответственно.

Ошибка моделирования среднемноголетней величины годового стока не превышает 7 %. Критерий Нэша–Сатклиффа NS [36] составил в среднем от 0,58 до 0,68, медиана от 0,61 до 0,71. Максимальные величины NS превосходят 0,80 для каждого водосбора.

Верификация результатов моделирования проведена также для максимальных расходов воды. Кривые имеют как почти полную сходимость в области средних обеспеченностей, так и удовлетворительное совпадение в областях малых и больших обеспеченностей. В пределах обеспеченностей 8–17 % наблюдается некоторое превышение рассчитанных максимальных расходов над зафиксированными. Однако расхождение не превышает величины 300 м³/с (8 %).

В целом результаты моделирования следует признать удовлетворительными, а модель «Гидрограф» — пригодной для изучения процессов формирования стока рассматриваемой территории.

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПАВОДКОВ НА РЕКЕ ИЕ ЛЕТОМ 2019 Г.

Моделирование паводков 2019 г. по данным метеорологических станций. Для расчета гидрографов паводков летом 2019 г. в бассейне р. Ия – г. Тулун в качестве входной информации были использованы суточные метеорологические данные двух станций Иркутского УГМС – Икей и Тулун. Интерполяция осадков в расчетные точки производилась с учетом распределения осадков по высоте в горной части водосбора, верифицированного на предыдущем этапе исследования.

Согласно расчетам, с 25 по 27 июня 2019 г. в бассейне р. Ия – г. Тулун выпало 239 мм осадков, 25 июня — 79, 26 июня — 132, 27 июня — 28 мм. Рассчитанный слой стока за период с 25 июня по 5 июля 2019 г. составил 162 мм, максимальное суточное значение слоя стока 30 июня 2019 г. — 39 мм. Максимальный рассчитанный суточный расход достиг значения 6570 м³/с (рис. 3).

В конце июля 2019 г. на р. Ие прошел второй паводок. С 26 по 28 июля 2019 г., согласно расчетам, в бассейне р. Ия – г. Тулун выпало 156 мм осадков. Максимальный рассчитанный суточный расход достиг величины 3100 м³/с 31 июля 2019 г.

Моделирование катастрофического паводка в июне 2019 г. на основе метеорологической модели ICON. Моделирование паводка 26–30 июня 2019 г. на р. Ие было проведено на основе метеорологической модели ICON. В качестве начальных условий был принят 1989 г., который по условиям весеннего половодья примерно совпадал с 2019 г. Таким образом, до 31 мая моделирование проводилось на основе данных метеорологических станций за 1989 г. в суточном режиме, а с 1 по 30 июня — на основе 3-часовых рядов температуры и дефицита влажности воздуха и осадков модели ICON. По итогам моделирования получено, что максимальный рассчитанный 3-часовой расход составил 5260 м³/с, максимальный суточный расход — 4780 м³/с. Слой осадков по водосбору за период 25–27 июня был равен 170 мм, а слой стока паводка за период 25 июня–5 июля — 136 мм.

На рис. 3 представлено сравнение рассчитанных гидрографов стока на основе данных модели ICON и метеостанций. Гидрограф, полученный в результате наблюдений, представлен в виде диапазона величин расходов в его максимальной части, соответствующих двум кривым Q(H). Для гидрографа ICON характерны два пика, сформированные двумя волнами осадков. Максимальный расход на 1400 м³/с ниже минимальной величины зафиксированного, однако его формирование совпадает по срокам. По данным метеостанций, максимальный суточный расход попадает в диапазон величин, полученных при наблюдении, однако его формирование запаздывает на 1 сут. Согласно расчету по данным метеостанций, слой осадков, выпавших на водосбор за период 25–27 июня 2019 г., составил 239 мм, что на 70 мм выше, чем по модели ICON. В целом, судя по результатам моделирования, модель погоды ICON «растянула» выпадение значительной суммы осадков на более длительный срок, чем это произошло в действительности. При использовании данных метеостанций при интерполяции осадков, по-видимому, были завышены суммы осадков, выпавших в горной части. Комбинация обоих источников данных потенциально могла быть использована для прогноза катастрофического паводка.

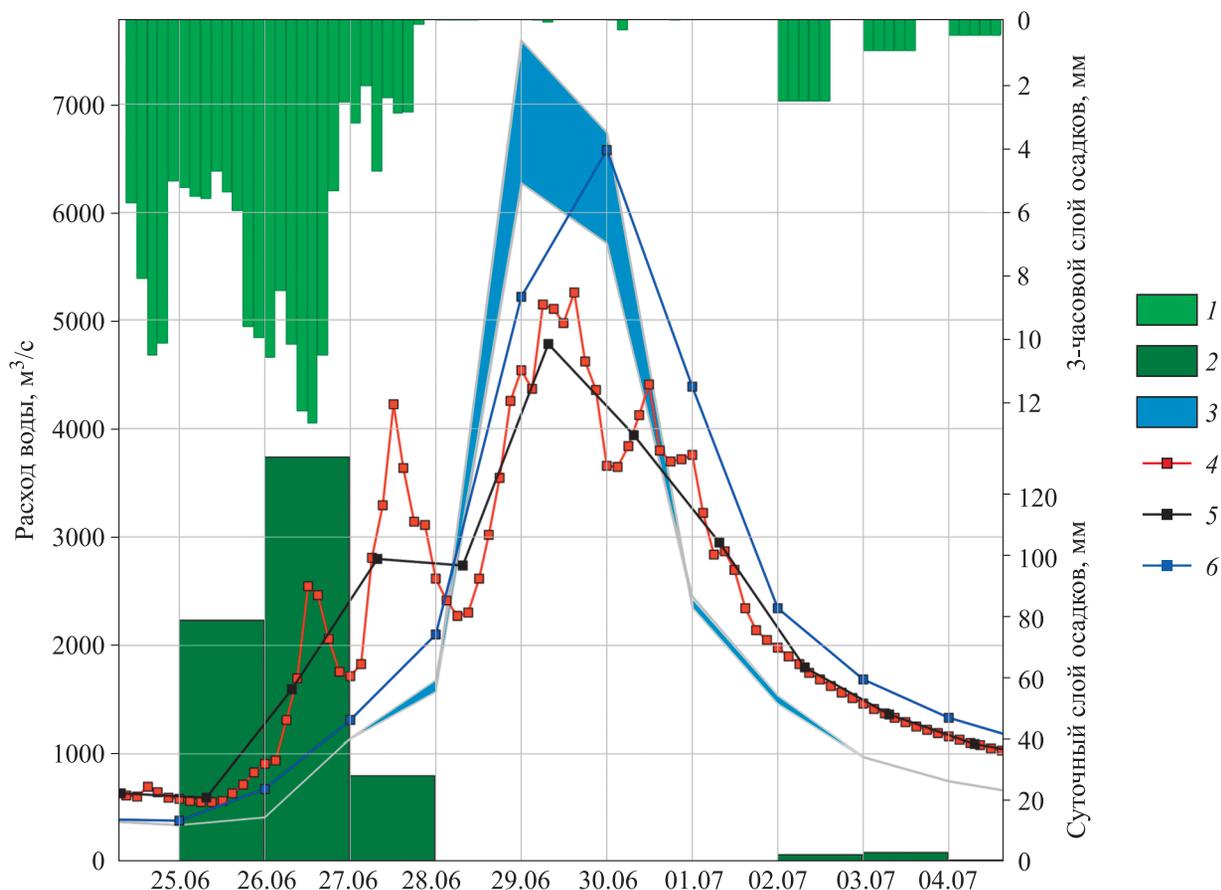


Рис. 3. Результаты моделирования паводка в бассейне р. Ия – г. Тулун в июне 2019 г.

Сумма осадков на водосбор: 1 – 3-часовые осадки по модели погоды ICON, 2 – суточные осадки на основе данных метеостанций; 3 – зафиксированный гидрограф стока (на основе экстраполяции зависимостей расхода воды от уровня); гидрограф стока по данным модели погоды ICON: 4 – рассчитанный 3-часовой, 5 – усредненный суточный; 6 – рассчитанный суточный гидрограф стока на основе данных метеостанций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При наводнении в июне 2019 г. в Иркутской области погибли 25 человек и 8 пропали без вести. В связи с этим возникает вопрос о том, была ли возможность прогноза катастрофического паводка и своевременного принятия мер для смягчения его последствий.

Одним из ведущих сотрудников Гидрометцентра высказано мнение о том, что «Да, у нас есть разные методы <прогноза>, у нас есть методы, которые соответствуют мировому уровню. Но по некоторым водным объектам методы устарели и требуют переработки. У нас более 2 миллионов рек, и для каждой реки, по которым мы выпускаем прогнозы, требуется своя методика. Только Гидрометцентр России использует в своей работе ежегодно около 2000 методик. Как вы себе представляете, можно ли их переработать... Обычно на переработку одной методики уходит минимум три года...» [37].

Действительно, использование более 2000 методик весьма затруднительно. Альтернативой может стать разработка единой методики расчета стока, позволяющей производить прогнозы стока в любых условиях, а ее уточнение (регионализация), конечно, должно проводиться не на отдельных реках. Примером такого подхода является гидрологическая модель «Гидрограф», эффективность применения которой в различных географических условиях была показана в работах [17, 25–32].

Исследование показало, что даже использование открытых прогнозов зарубежных метеорологических моделей в сочетании с данными наземных наблюдений могло бы стать основой для заблаговременного прогноза величины разрушительного паводка на р. Ие.

Наряду с дальнейшим развитием метода детерминированного гидрологического моделирования для расчета и прогноза стока очевидна необходимость восстановления и развития сети гидрометеорологических наблюдений в горных районах страны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (19–55–80028).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кичигина Н.В.** Опасность наводнений на реках Байкальского региона // География и природ. ресурсы. — 2018. — № 2. — С. 41–51.
2. **Атлас** природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций / Ред. С.К. Шойгу. — М.: Дизайн. Информация. Картография, 2007. — 322 с.
3. **Официальный сайт** Российского агентства международной информации «РИА Новости» [Электронный ресурс]. — <https://ria.ru/20190721/1556733218.html> (дата обращения 22.07.2019).
4. **Официальный сайт** издательского дома Коммерсантъ [Электронный ресурс]. — <https://www.kommersant.ru/doc/4019553> (дата обращения 22.07.2019).
5. **Официальный сайт** информационно-аналитического издания «Тайга.инфо — Главные новости Сибири» [Электронный ресурс]. — <https://taiga.info/147658> (дата обращения 18.07.2019).
6. **Шаликовский А.В., Лепихин А.П., Тиунов А.А., Курганович К.А., Морозов М.Г.** Наводнения в Иркутской области 2019 г. // Водное хозяйство России. — 2019. — № 6. — С. 48–65.
7. **Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А.** Математическое моделирование в гидрологии. — М.: Академия, 2010. — 304 с.
8. **Zängl G., Reinert D., Rípodas P., Baldauf M.** The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core // Quarterly Journ. of the Royal Meteorological Society. — 2015. — N 141 (687). — С. 563–579.
9. **Ресурсы** поверхностных вод СССР. Т. 16, вып. 2: Ангаро-Енисейский район. Ангара / Под ред. Г.Г. Добрумова. — Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 111 с.
10. **Номоконов Л.И.** Растительность. Карта м-ба 1:2 000 000 // Атлас Иркутской области. — М.; Иркутск: ГУГК, 1962. — С. 83–90.
11. **Raup B.H., Racoviteanu A., Khalsa S.J.S., Helm C., Armstrong R., Arnaud Y.** The GLIMS geospatial glacier database: a new 31 tool for studying glacier change // Global and Planetary Change. — 2007. — N 1–2. — P. 101–110.
12. **Автоматизированная** информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [Электронный ресурс]. — <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения 13.05.2019).
13. **Государственный** водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 1: РСФСР, вып. 13: Бассейн Ангары 1981–2000 гг. / Под ред. Т. Шмидт. — Л.: Гидрометеиздат, 1986. — 290 с.
14. **Государственный** водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 7, вып. 2–4: Карское море (Восточная часть) 1952–1980 гг. / Гос. ком. СССР по гидрометеорологии и контролю природ. среды, Иркут. территор. упр. по гидрометеорологии и контролю природ. среды. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. — 388 с.
15. **Официальный сайт** метеослужбы Германии (DWD) [Электронный ресурс]. — <http://ftp-outgoing2.dwd.de/gds/ICON/grib/europe/> (дата обращения 22.07.2019).
16. **Официальный сайт** Российского агентства международной информации «РИА Новости» [Электронный ресурс]. — <https://tass.ru/sibir-news/6640452> (дата обращения 23.07.2019).
17. **Семёнова О.М., Лебедева Л.С., Волкова Н.В., Шалина Е.В.** Использование спутниковых данных для исследования процессов формирования стока в бассейне р. Витимкан (зона распространения многолетней мерзлоты) // Исследование Земли из космоса. — 2015. — № 3. — С. 15–26.
18. **Hansen M.C., Potapov P.V., Moore R., Hancher M., Turubanova S.A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S.V., Goetz S.J., Loveland T.R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C.O., Townshend J.R.G.** Global Forest Change. [Электронный ресурс]. — <https://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest> (дата обращения 20.07.2019).
19. **Kendall M.G.** Rank Correlation Methods. — London: Griffin, 1975. — 199 p.
20. **Mann H.B.** Nonparametric tests against trend // Econometrica. — 1945. — N 13. — P. 245–259.
21. **Sen P.K.** Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau // Journ. of the American Statistical Association. — 1968. — N 63. — P. 1379–1389.
22. **Makarieva O.M., Nesterova N.V., Post D.A., Sherstyukov A., Lebedeva L.S.** Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost // The Cryosphere. — 2019. — N 13. — P. 1635–1659.
23. **Tananaev N.I., Makarieva O.M., Lebedeva L.S.** 2016. Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia // Geophys. Res. — 2019. — N 43. — P. 764–772.

24. **Виноградов Ю.Б.** Математическое моделирование процессов формирования стока (опыт критического анализа). — Л.: Гидрометеиздат, 1988. — 312 с.
25. **Макарьева О.М., Виноградова Т.А., Нестерова Н.В., Виноградов А.Ю., Бельдиман И.Н., Колупаева А.Д.** Моделирование катастрофических паводков в бассейне р. Туапсе // Геориск. — 2018. — Т. 12, № 3. — С. 78–89.
26. **Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Виноградова Т.А., Бельдиман И.Н., Колупаева А.Д.** Расчет характеристик катастрофических паводков неизученной реки Цемес (г. Новороссийск, Черноморское побережье России) на основе гидрологической модели «Гидрограф» // Вестн. Санкт-Петерб. ун-та. Науки о Земле. — 2019. — Т. 64, № 1. — С. 24–43.
27. **Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Ямпольский Г.П., Кудымова Е.Ю., Осташов А.А., Колупаева А.Д.** Оценка максимальных расходов воды различной обеспеченности неизученной горной реки Хемчик (Республика Тыва) на основе методов математического моделирования // Инженерные изыскания. — 2019. — Т. 13, № 2. — С. 36–51.
28. **Vinogradov Yu.B., Semenova O.M., Vinogradova T.A.** An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system // Hydrological Processes. — 2011. — N 25. — P. 1055–1073.
29. **Semenova O.M., Lebedeva L.S., Vinogradov Yu.B.** Simulation of subsurface heat and water dynamics, and runoff generation in mountainous permafrost conditions, in the Upper Kolyma River basin, Russia // Hydrogeology Journ. — 2013. — N 21. — P. 107–119.
30. **Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А.** Моделирование процессов формирования стока рек высокогорной криолитозоны Восточной Сибири (на примере хребта Сунтар-Хаята) // География и природ. ресурсы. — 2019. — № 1. — С. 178–186.
31. **Макарьева О.М., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А.** Моделирование процессов формирования стока на малых горных водосборах криолитозоны (по материалам Колымской водно-балансовой станции) // Криосфера Земли. — 2020. — № 1. — С. 43–56.
32. **Нестерова Н.В., Макарьева О.М., Виноградова Т.А., Лебедева Л.С.** Моделирование процессов формирования стока зоны Байкало-Амурской магистрали на основе данных полигона «Могот» // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. — 2018. — № 1. — С. 18–36.
33. **Ландшафтная карта СССР 1980 года. М-6 1:2 500 000 / Отв. ред. И.С. Гудилин.** — М: Изд-во Мин. геол. СССР, Гидроспецгеологии, 1980. — 16 л.
34. **Агрогидрологические свойства почв Иркутской области (справочник) / М.Н. Редько, В.И. Гонтарь, Г.А. Букин.** — Иркутск: Изд-во Глав. упр. гидрометеорол. службы при СМ СССР, Изд-во Иркут. упр. гидрометеорол. службы. Иркут. гидрометеорол. обсерватории, 1968. — 549 с.
35. **Материалы наблюдений опорных станций комплексной водно-балансовой и агрометеорологической сети, почвенно-испарительных и снего-испарительных пунктов. 1970–1985 гг. / Отв. ред. Э.Л. Тихонова.** — Новосибирск: Изд-во Зап.-Сиб. упр. гидрометеорол. службы, 1987. — Вып. 11. — 547 с.
36. **Nash J.E., Sutcliffe J.V.** River flow forecasting through conceptual models: A discussion of principles // Journ. of Hydrology. — 1970. — N 10 (3). — P. 282–290.
37. **Официальный сайт ГПНТБ СО РАН «Новости сибирской науки».** [Электронный ресурс]. — <http://www.sib-science.info/ru/news/oblasti-globalnoe-11072019> (дата обращения 20.02.2019).

Поступила в редакцию 13.03.2020

После доработки 20.04.2020

Принята к публикации 25.06.2020