

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

УДК 539.1

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ПАВОДКИ В БАССЕЙНЕ АНГАРЫ В 2019 ГОДУ: МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ И ВОДНОГО РЕЖИМА РЕК

© 2021 г. Ю. Г. Мотовилов^{а, *}, А. Н. Гельфан^{а, b}, В. О. Полянин^а

^аИнститут водных проблем РАН, Москва, Россия

^бМосковский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия

*e-mail: motol49@yandex.ru

Поступила в редакцию 13.07.2020 г.

После доработки 12.12.2020 г.

Принята к публикации 22.12.2020 г.

Исследованы основные факторы формирования экстраординарных дождевых паводков на левобережных притоках Ангары летом 2019 г., вызвавших катастрофические наводнения в Иркутской области. Для этого на основе информационно-моделирующего комплекса, вычислительным ядром которого является физико-математическая модель формирования речного стока ЕСОМАГ, построена пространственно распределенная гидрологическая модель и проверена по многолетним (35 лет) рядам гидрометеорологических наблюдений на пяти речных бассейнах региона. По статистическим критериям получено удовлетворительное соответствие фактических и рассчитанных гидрографов речного стока и величин максимального стока. По результатам моделирования построены и проанализированы поля характеристик гидрологического цикла (осадков, запасов воды в снеге, влажности почвы) в бассейне верхней Ангары летом 2019 г. и показано, что основными факторами формирования катастрофических паводков на р. Ия являются экстремальные осадки в сочетании с малыми потерями стока на инфильтрацию в переувлажненные перед выпадением осадков почвы. Максимальный рассчитанный расход воды на реке у г. Тулун на 40% превысил исторический максимум и составил 5640 м³/с. Проанализированы пространственно-временные особенности двух волн паводка 2019 г. на исследуемых левобережных притоках Ангары.

Ключевые слова: наводнение, паводок, притоки Ангары, река Ия, Тулун, гидрологическое моделирование

DOI: 10.31857/S2587556621020102

ВВЕДЕНИЕ

Экстраординарные дождевые паводки, сформировавшиеся летом 2019 г. на реках Иркутской области, привели к полному и частичному затоплению (подтоплению) более 70 муниципальных образований, включая 4 города, 67 сел и поселков, около 60 деревень, садоводств и садоводческих товариществ¹. В результате наводнения погибли 25 человек. Ущерб, по некоторым оценкам, составил более 35 млрд руб., в том числе около 500 млн руб. – потери сельского хозяйства².

Паводки затронули в основном левые притоки р. Ангары и Братского водохранилища, на которых были значительно превышены установлен-

ные критические отметки уровня водной поверхности³. Для некоторых рек высота паводковой волны существенно превосходила наибольшие значения предшествующего периода инструментальных наблюдений. Согласно данным Иркутского УГМС, в створе г. Тулун, который больше всего пострадал от наводнения, максимальный уровень воды р. Ия почти на 2.5 м превысил исторический максимум, наблюдавшийся в 1984 г., и составил 13 м 82 см над нулем графика поста.

² Цена наводнения. <http://www.interfax-russia.ru/Siberia/view.asp?id=1058665> (дата обращения 19.01.2020); Более трех тысяч пострадавших от паводка жителей Иркутской области получили из регионального бюджета компенсации за утраченные сельхозугодья. https://irkobl.ru/sites/agro-line/news/766846/?sphrase_id=19871550 (дата обращения 20.01.2020).

³ Здесь и ниже под критическими отметками (уровнями) понимаются уровни воды в реке, при которых происходит выход воды на пойму со значительным затоплением сельскохозяйственных угодий и частичным – населенных пунктов. См., например, (Ресурсы..., 1972).

¹ Постановление правительства Иркутской области “Об установлении описания границ подтопленных (затопленных) зон чрезвычайной ситуации, сложившейся в результате паводка, вызванного сильными дождями, прошедшими в июне 2019 года на территории Иркутской области” от 17 июля 2019 года N 558-пп.

Район распространения наводнения 2019 г. относится к наиболее паводкоопасным в Иркутской области, а экстремальные гидрологические характеристики не являются здесь редкостью (Иркутская..., 1914; Зайков, 1954; Задонина, Леви, 2008; Разумов и др., 2015; Мисюркеев и др., 2019). Если принять во внимание последствия произошедшего стихийного бедствия, становится очевидным, что для рассматриваемой территории опасность высоких паводков остается в настоящее время недооцененной.

В задачах оценки и управления рисками наводнений практический интерес представляет не только определение максимальных расходов воды и их обеспеченностей, но и анализ условий формирования экстраординарных паводков и воспроизведение потенциально возможных характеристик их водности в сложившихся физико-географических условиях в целях создания информационных систем поддержки принятия решений при выборе и повышении надежности комплекса структурных мероприятий (строительства водохранилищ, защитных дамб, изменения морфометрии русел и т.п.) для обеспечения безопасности населения, социальных и производственных объектов.

Методической основой таких систем, как показывает мировой опыт, служат физически обоснованные пространственно распределенные модели формирования речного стока (Мотовилов, Гельфан, 2018). Высокая пространственно-временная изменчивость процессов формирования дождевых паводков в рассматриваемом регионе наряду с разреженностью и неравномерностью сети метеорологического мониторинга затрудняет разработку эффективной (по принятым критериям качества) гидрологической модели. В публикациях, появившихся после катастрофического наводнения лета 2019 г. на р. Ия (Шаликовский и др., 2020; Макарьева, 2020), описаны предварительные результаты моделирования этого явления, но проверке предложенных моделей авторы не уделили должного внимания, из-за чего становится сложным оценить работоспособность моделей в широком диапазоне региональных условий формирования паводков.

В настоящей статье представлена *первая региональная гидрологическая модель формирования речного стока* в бассейнах левобережных притоков верхней Ангары (включая р. Ия). В начале дается краткая характеристика объекта исследований. Затем приводится описание модели, ее информационное обеспечение, результаты испытаний по данным наблюдений за речным стоком в створах рассматриваемых рек за многолетний период до 2019 г. Отдельный раздел посвящен результатам применения модели для исследования пространственного распределения процессов и факторов

формирования экстраординарных дождевых паводков 2019 г. и расчетам гидрографов стока этих паводков в различных створах речной сети.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов моделирования выбраны левобережные притоки Братского водохранилища и р. Ангары в ее верхнем течении — рр. Ия с Киреем, Ока, Белая, Китой и Иркут (рис. 1).

Истоки перечисленных рек лежат в горах Восточного Саяна на высотах 2500–3000 м над ур. м., а бассейны отделены друг от друга его отрогами (Окинским, Бельским, Китойским, Тункинским и др.), отходящими в северо-восточном направлении. На юге исследуемая территория ограничивается хребтом Хамар-Дабан, а на севере — Ангарским кряжем. Ближе к нижнему течению долины рек выходят на широкую Иркутско-Черемховскую равнину. Плоские поверхности междуречий здесь имеют высоту 550–650 м над ур. м., несколько увеличиваясь в районе г. Тулун до 650–730 м над ур. м. В горной части местами разбросаны небольшие наледы и снежники, которые не оказывают существенного влияния на водный режим и максимальный сток исследуемых рек.

Распределение осадков по территории неравномерно и во многом определяется высотой местности и ориентацией склонов. Наименьшее количество годовых осадков выпадает в пределах Иркутско-Черемховской равнины — от 350 мм, наибольшее — на наветренных, большей частью западных склонах Восточного Саяна — 800–900 мм в поясе ниже 2000 м над ур. м. и до 1000–1200 мм — выше. Твердые осадки выпадают с октября по апрель (от менее 25 до 40% годовой суммы), жидкие — с мая по сентябрь (от 60 до 75% и более) (Ресурсы..., 1972; Селиверстов, 2003).

Водный режим рек характеризуется прохождением серий летних дождевых паводков, как правило превышающих по расходам и уровням воды весеннее половодье, и низкой зимней меженью. Наиболее многоводные месяцы июнь–август. Питание рек главным образом дождевое (40–60%). Из-за малоснежных зим в условиях резко континентального климата вклад снегового питания не превышает 20%. На долю подземной составляющей приходится 20–30%. Основные характеристики рек приведены в табл. 1.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве расчетно-аналитического инструмента для оценки условий формирования стока в бассейне р. Ангары (до Братского гидроузла) был использован информационно-моделирующий комплекс (ИМК), вычислительным ядром которого является физико-математическая модель с рас-

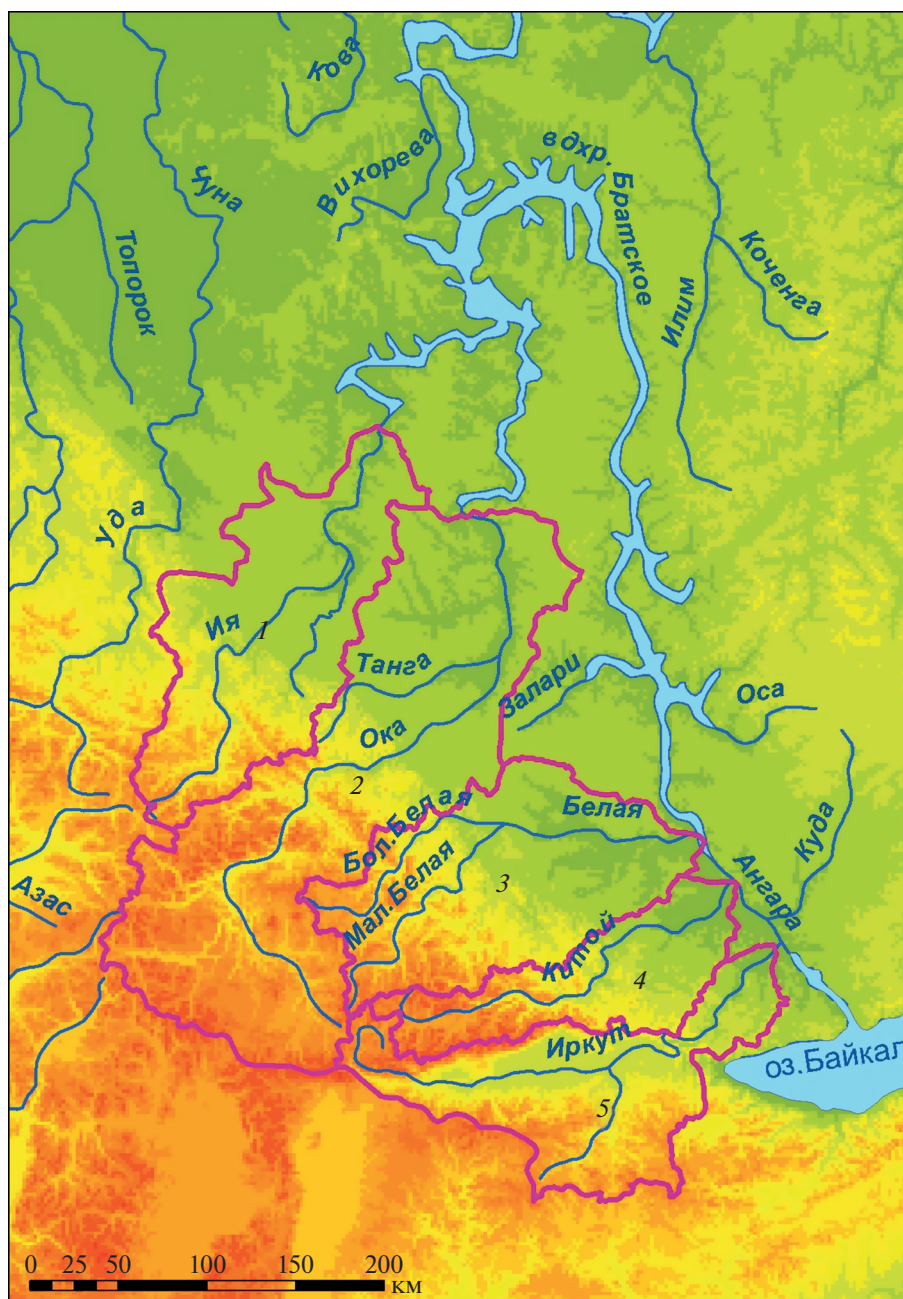


Рис. 1. Расположение исследуемых бассейнов рек: 1 – Ия; 2 – Ока; 3 – Белая; 4 – Китой; 5 – Иркут.

пределенными параметрами ECOMAG (ECOLOGical Model for Applied Geophysics)⁴. Структура ИМК, основные уравнения и входящие в них параметры, а также алгоритмы расчетов, подробно описаны в ряде работ (Мотовилов, Гельфан, 2018; Motovilov et al., 1999). Следует отметить, что технология ИМК ECOMAG уже использовалась для

оперативных сценарных расчетов притока воды в водохранилища Ангаро-Енисейского каскада (включая водосбор Братского водохранилища) и, в частности, для расчетов возможных сценариев развития гидрологической обстановки и регулирования режимов работы Саяно-Шушенского водохранилища после аварии 17 августа 2009 г. в период его непроектной эксплуатации до восстановления ГЭС (Беднарук, Мотовилов, 2017). В данной работе первоначальная версия модели на водосборе Братского водохранилища была существенно детализирована и адаптирована для мо-

⁴ Авторские права на комплекс ECOMAG защищены Свидетельством о государственной регистрации программ для ЭВМ (правообладатель – ИВП РАН, автор – Ю.Г. Мотовилов).

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых рек

Река	Створ (индекс г.п.)	Длина реки, км	Площадь водосбора, км ²		Расходы воды, м ³ /с		Крупные притоки
			общая	в створе г.п.	ср.	макс.*	
Ия	Тулун (8233)	484	18100	14500	149	4040	Кирей (пр.), Икей (лев.), Илир (лев.) Тагна (пр.), Зима (лев.) Образуется слиянием Бол. и Мал. Белой — Зан-Мурин (пр.)
Кирей	Уйгат (8241)	172	3260	2950	42.4	—	
Ока	Усть-Када (8209)	630	34000	33400	269	4530	
Белая	Мишелевка (8172)	359	18000	14000	168	2820	
Китой	Китой (8161)	316	9190	8420	120	1480	—
Иркут	Баклаши (8410)	488	15780	14000	140	1870	

* Значения приведены без учета максимальных расходов 2019 г.

делирования формирования стока на левобережных притоках Ангары.

Ниже приведен состав информационных ресурсов, привлекаемых для модели и проведения гидрологических расчетов.

1. ГИС-обеспечение речного бассейна.

Для пространственной схематизации территории водосбора Братского водохранилища и выделения расчетных элементов модели использовались следующие информационные картографические материалы (рис. 2):

- цифровая модель рельефа на исследуемую территорию, в матричной форме содержащая информацию о рельефе с разрешением ячейки 1 км (30 × 30 с), подготовленная компанией ООО “Data+” (Москва);

- цифровая почвенная карта, которая была “вырезана” из Почвенной карты России масштаба 1 : 2500000, разработанной коллективом авторов под руководством М.А. Глазковой и представленной в электронном виде Почвенным институтом им. В.В. Докучаева⁵;

- цифровая ландшафтная карта, которая была “вырезана” из Ландшафтной карты СССР в масштабе 1 : 2500000, составленной коллективом авторов под руководством В.А. Николаева и представленной в электронном виде Почвенным институтом им. В.В. Докучаева.

Модельная пространственная схематизация речного бассейна и его русловой сети выполнена с помощью специализированной ГИС-технологии ECOMAG Extension, которая позволяет на основе цифровой модели рельефа и анализа линий тока в автоматическом режиме с необходимой степенью детальности прорисовывать структуру модельной речной сети, выделять границы элементарных водосборов, являющихся пространственными расчетными единицами модели, и на основе цифровых тематических карт назначать

для этих единиц характеристики типов почв и растительности, от которых зависят значения параметров модели. Здесь необходимо подчеркнуть, что в модели ECOMAG своеобразие водосборов отдельных рек в пределах всего бассейна отражается именно сочетанием в них и пространственным распределением конкретных типов почв, растительности, рельефа, уклонов, структуры речной сети, метеорологических условий и т.п. В результате на исследуемой части водосбора р. Ангары до створа Братского гидроузла было выделено 113 расчетных элементарных бассейнов (рис. 3а), их средняя площадь составляет около 1500 км², модельная речная сеть кроме основной реки включает 9 притоков 1-го порядка, 26 — 2-го порядка, 19 — 3-го порядка и 1 — 4-го порядка (рис. 3б).

2. Гидрометеорологическое обеспечение речного бассейна.

Информация гидрометеорологического мониторинга является одной из основ для проведения гидрологических расчетов с помощью ИМК ECOMAG. Данные архивных наблюдений используются для калибровки параметров гидрологической модели, ее валидации, расчетов пространственного распределения характеристик гидрологического цикла на водосборной территории, гидрографов стока, как в пунктах наблюдений, так и на не охваченных наблюдениями участках речного русла.

В качестве метеорологического обеспечения использовалась выверенная база данных, подготовленная специалистами ВНИИГМИ-МЦД Росгидромета (Булыгина и др., 2014) и содержащая информацию с суточным разрешением (сумма осадков, температура и дефицит влажности воздуха) по 32 метеостанциям, расположенным в Иркутской области в пределах бассейна Братского водохранилища и в непосредственной близости от него, за период наблюдений с 1966 по 2014 г. (рис. 4). За период с 2015 по 2019 г. использовались метеоданные с сайта “Погода и Климат”, находящиеся в открытом доступе (<http://www.pogodaiklimat.ru/>).

Гидрологическое обеспечение включает данные о среднесуточных расходах воды на гидрологи-

⁵ Все почвы подразделяются на зональные, интразональные и горные. Основой для разделения почв является генетическая классификация. Для всех почв указан их механический состав, что особенно важно при задании водно-физических свойств почв и соответствующих параметров модели.

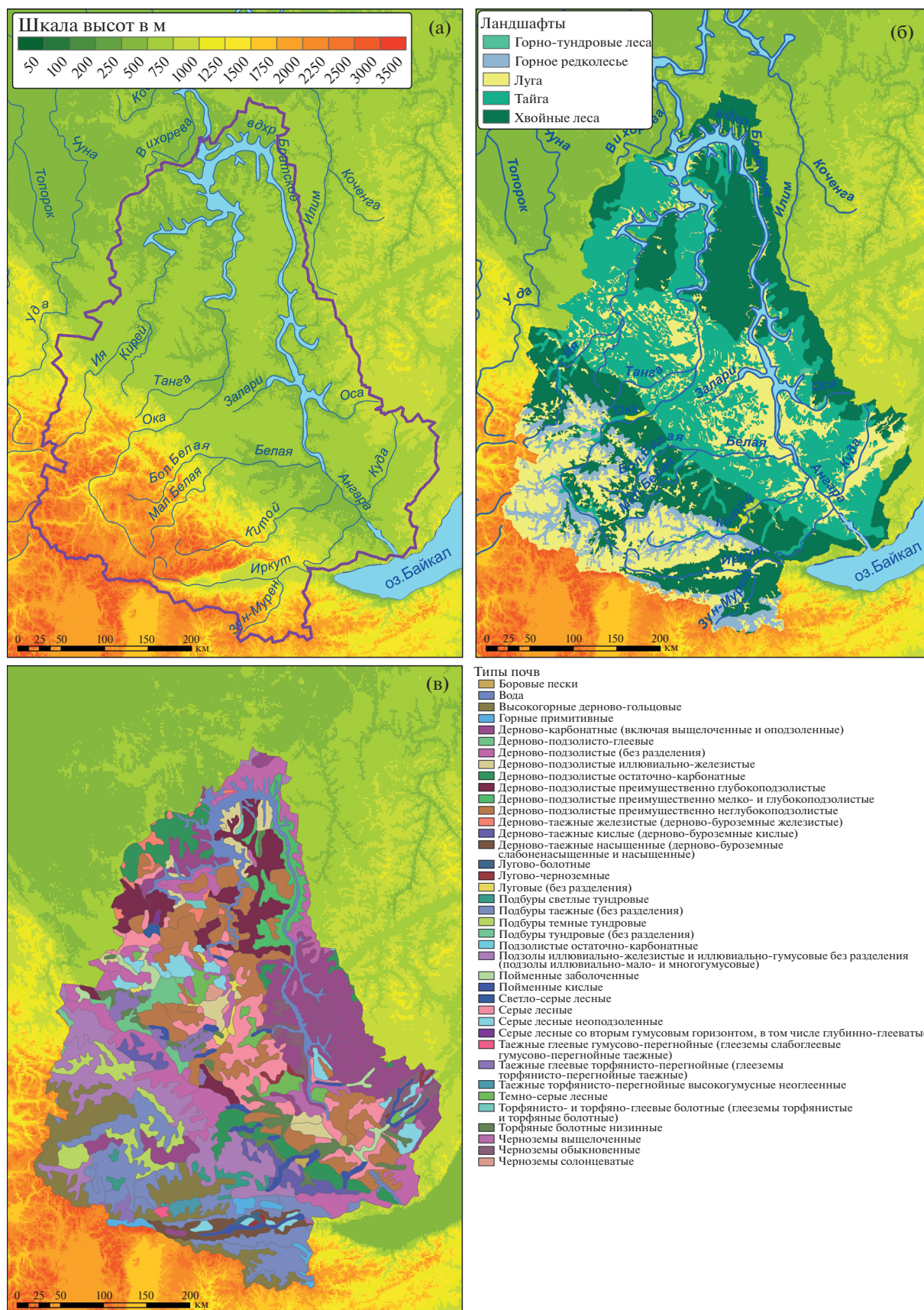


Рис. 2. Геоинформационное обеспечение модели: (а) цифровая модель рельефа; (б) цифровая ландшафтная карта; (в) цифровая почвенная карта.

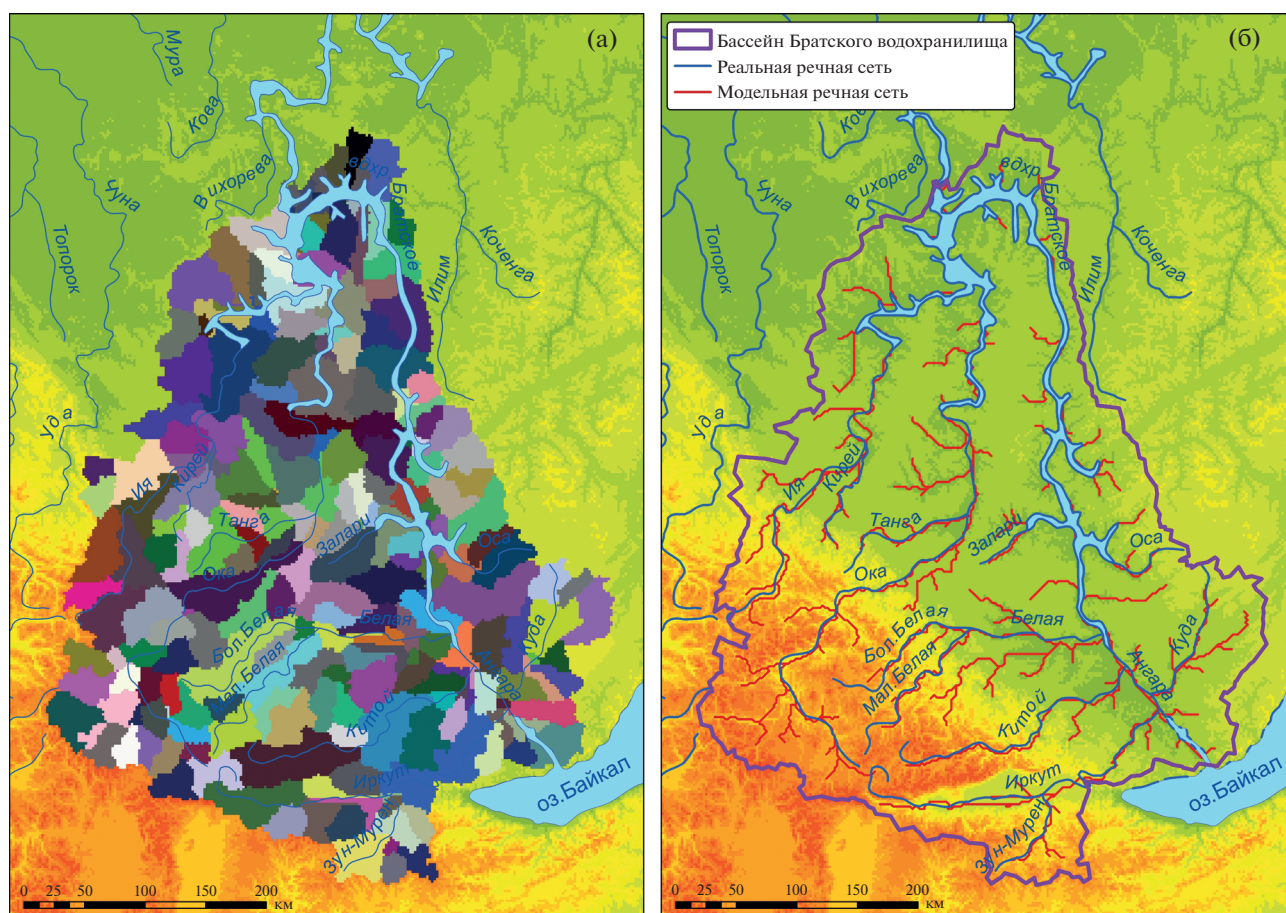


Рис. 3. Модельная схематизация водосборной площади (а) и речной сети (б) в бассейне р. Ангары.

ческих постах исследуемых рек (см. табл. 1, рис. 4) за период с 1966 по 2019 г. К сожалению, из-за известных проблем с доступностью гидрологической информации в Российской Федерации, в собранных рядах наблюдений имеются систематические пропуски, в частности, в периоды с 1989 по 2007 г., а также для некоторых гидропостов в 2018–2019 гг.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА ЛЕВОБЕРЕЖНЫХ ПРИТОКОВ р. АНГАРЫ ПО ДАННЫМ МНОГОЛЕТНИХ НАБЛЮДЕНИЙ ДО 2019 ГОДА

Калибровка параметров модели ЕСОМАГ проводилась по рядам среднесуточных расходов воды на гидропостах для периода 2008–2014 гг., а валидация выполнялась для периодов 1966–1989, 2015–2018 гг. Большая часть параметров модели задавалась из баз данных характеристик почв, растительности и речных бассейнов. Несколько ключевых параметров подбирались путем калибровки модели. Целевая функция строилась на основе распространенного в гидрологических расчетах критерия Нэша–Сатклифа (NS), характе-

ризующего степень соответствия фактических и рассчитанных гидрографов:

$$NS = \frac{F_0^2 - F^2}{F_0^2}, \quad (1)$$

где $F_0^2 = \sum_i (Q_i - Q_{cp})^2$, $F^2 = \sum_i (Q_{i,p} - Q_i)^2$, $Q_{i,p}$ – рассчитанный по модели расход воды в i -е сутки, Q_i – фактический расход, Q_{cp} – средняя величина фактического расхода воды за период расчета. В идеальном случае, когда фактические и смоделированные гидрографы совпадают, значение $NS = 1$. Однако на практике $NS < 1$ (в том числе может быть и отрицательным значением). Результаты расчетов считаются хорошими при $NS > 0.75$ и удовлетворительными при $0.75 > NS > 0.35$. При $NS < 0.35$ результаты считаются неудовлетворительными.

В гидрологических расчетах по модели ЕСОМАГ на каждом временном шаге выполняется моделирование характеристик стока во всех ячейках речной сети, поэтому в рамках одного расчета имеется возможность одновременного сопоставления рассчитанных и измеренных гидрографов

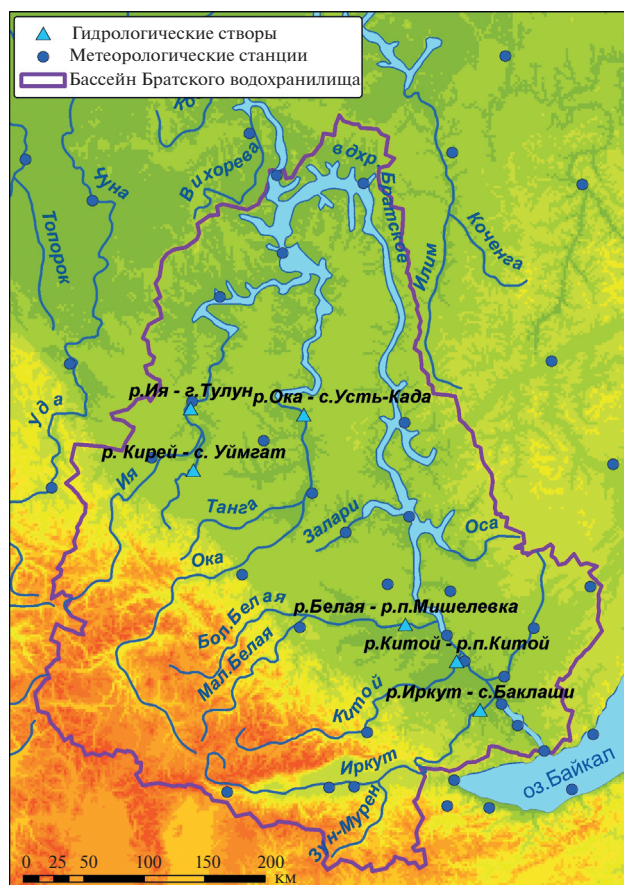


Рис. 4. Гидрометеорологическое обеспечение модели в бассейне Ангары.

во всех створах наблюдений и интегрального учета эффективности модели. Для этих целей нами использованы следующие два варианта задания критерия качества расчетов:

– осредненный критерий в виде $NS_{\text{mean}} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M NS_i$, где M – количество пунктов сравнения;

– средневзвешенный критерий NS_{total} в виде (1), в котором $F_0^2 = \sum_k \sum_i (Q_{i,k} - Q_{\text{cp}})^2$, $F^2 = \sum_k \sum_i (Q_{i,k,p} - Q_{i,k})^2$, $Q_{i,k,p}$ – рассчитанный по модели расход воды в i -е сутки в k -м пункте сравнения, $Q_{i,k}$ – фактический расход в i -е сутки в k -м пункте сравнения, $Q_{\text{cp}} = \frac{1}{MN} \sum_k \sum_i Q_{i,k}$ – средневзвешенная по всем пунктам сравнения M величина фактического расхода воды за период расчета в N сут.

Если в первом случае всем гидропостам придаются равные веса, то во втором случае большие веса придаются гидропостам с большими среднегодовыми расходами.

На предварительном этапе калибровки и валидации модели было установлено, что можно подобрать наборы параметров, которые дают достаточно высокие значения перечисленных выше модификаций критерия NS , однако соответствие фактических и рассчитанных максимальных годовых расходов в расчетных створах получается при этом не очень хорошее. Поскольку учет именно этой гидрологической характеристики представляется наиболее важным при оценках риска наводнений в рамках рассматриваемой задачи, калибровка параметров модели выполнялась по составному критерию:

$$NSM = (1 - NS_{\text{mean}}) + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \frac{|Q_{\text{max},f_i} - Q_{\text{max},c_i}|}{Q_{\text{max},f_i}}, \quad (2)$$

где Q_{max} – фактические (f) и рассчитанные (c) среднееголетние максимальные расходы воды в i -том створе. Данный критерий помимо обычного критерия соответствия гидрографов Нэша–Сатклифа дополнительно учитывает отклонение фактических и рассчитанных максимальных годовых расходов за период сравнения.

Региональная модель была откалибрована и верифицирована по многолетним рядам гидрологических наблюдений в области, включающей 6 левобережных притоков р. Ангары (рр. Ия, Кирей, Ока, Белая, Китой и Иркут) (табл. 2). Расчеты показали, что для большей части гидропостов значения критериев для калибровочной и проверочной серии не сильно отличаются между собой, что говорит об устойчивости параметров модели. Кроме того, оценки точности модельных расчетов по критерию NS показали, что для 5-ти из 6-ти гидрологических постов результаты моделирования можно признать удовлетворительными. В то же время низкие значения оценок для рр. Китой и Иркут свидетельствуют о недостаточной эффективности модели формирования стока для этих притоков, возможно, из-за больших погрешностей в задании осадков по данным разреженной сети метеорологических наблюдений. Проведение численных экспериментов для этих притоков с ненадежными оценками критериев соответствия может привести и к ненадежным выводам, поэтому эти 2 притока в дальнейшем были исключены из анализа при проведении численных экспериментов.

В табл. 3 приведены оценки погрешностей расчета максимальных расходов левобережных притоков р. Ангары. Из материалов таблицы следует, что относительные погрешности расчета среднееголетних максимальных годовых расходов на 4-х рассматриваемых бассейнах не превышают 10%. Погрешности расчета абсолютных среднесуточных максимумов стока на гидро-

Таблица 2. Значения критериев Нэша–Сатклифа для калибровочной и проверочной серии расчетов

Река, пункт	Площадь водосбора, км ²	Калибровка 2008–2014	Валидация 1966–1989
Ия, г. Тулун	14500	0.66	0.61
Кирей, с. Уйгат	2950	—	0.63
Ока, с. Усть-Када	33400	0.68	0.60
Белая, р.п. Мишелевка	14000	0.56	0.60
Китой, с. Китой	8420	0.36	0.63
Иркут, с. Баклаши	14000	0.04	—

постах за рассматриваемый период наблюдений лежат в диапазоне от 4 до 16%.

На рис. 5 приведены примеры гидрографов на гидропостах за 4 года из калибровочной и проверочной серии расчетов.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАВОДКОВ НА ЛЕВОБЕРЕЖНЫХ ПРИТОКАХ р. АНГАРЫ В 2019 ГОДУ

Ключевыми факторами формирования дождевых паводков в теплый период года является предшествующая увлажненность водосбора, а также количество, продолжительность осадков и их пространственное распределение. Ввиду низкой плотности сети гидрометеорологического мониторинга в регионе, пространственно-временной анализ условий формирования экстремального паводка 2019 г., и в первую очередь распределения влажности почвы и осадков на исследуемой территории, выполнялся на основе пространственного моделирования элементов гидрологического цикла с помощью модели ECOMAG.

Снежный покров. На рис. 6 показан рассчитанный по данным метеорологических наблюдений временной ход формирования и разрушения снежного покрова вблизи г. Тулун за период 2015–2019 гг. Из материалов рис. 6 видно, что за

осенне-зимний сезон 2018–2019 гг. сформировались минимальные за рассматриваемый период максимальные запасы воды в снежном покрове. Проанализируем этот сезон более подробно. Согласно расчетам, устойчивый снежный покров установился 1 декабря 2018 г. Активное нарастание запасов воды в снеге происходило до середины февраля 2019 г., достигнув максимальной величины 41 мм, после чего отмечалось некоторое снижение снеготопливности за счет испарения. Интенсивное таяние началось со второй декады марта, и к началу первой декады апреля снег большей частью растаял. По данным Иркутского УГМС, на агрометеостанции “Тулун” в 2018 г. устойчивый снежный покров образовался 1 декабря, снеготаяние началось 3 марта 2019 г., а дата разрушения устойчивого снежного покрова — 3 апреля 2019 г. Максимальный запас воды в снеге за период с декабря 2018 г. по апрель 2019 г. по данным наблюдений составил 46 мм в поле и 41 мм в лесу. Таким образом, даты характерных фаз залегания снежного покрова и величины максимальных снеготопливности в районе г. Тулун по модельным расчетам и по данным наблюдений оказались близки между собой. Кроме того, как показали результаты моделирования снеготопливности за многолетний период, максимальное содержание воды в снежном покрове в 2019 г. было значительно

Таблица 3. Фактические и рассчитанные максимальные годовые расходы на левобережных притоках за период наблюдений с 1966 г.*

Река, пункт	Кол-во лет наблюдений	Q _{max mean} факт	Q _{max mean} модель	Отн. ошибка, %	Q _{max} факт	Q _{max} модель	Отн. ошибка %
1	2	3	4	5	6	7	8
Ия, г. Тулун	35	1009	1025	2	4040	3894	4
Кирей, с. Уйгат	23	292	267	9	931	785	16
Ока, с. Усть-Када	31	1875	1841	2	4530	4741	5
Белая, р.п. Мишелевка	30	1148	1121	2	2820	2490	12

* В 3-м и 4-м столбцах приведены среднеегодежные максимальные расходы за период наблюдений, указанный во 2-м столбце, в 5-м — относительная погрешность расчета Q_{max mean}, в 6-м и 7-м — абсолютные среднесуточные максимумы расходов за период наблюдений, в 8-м — относительная погрешность расчета Q_{max}.

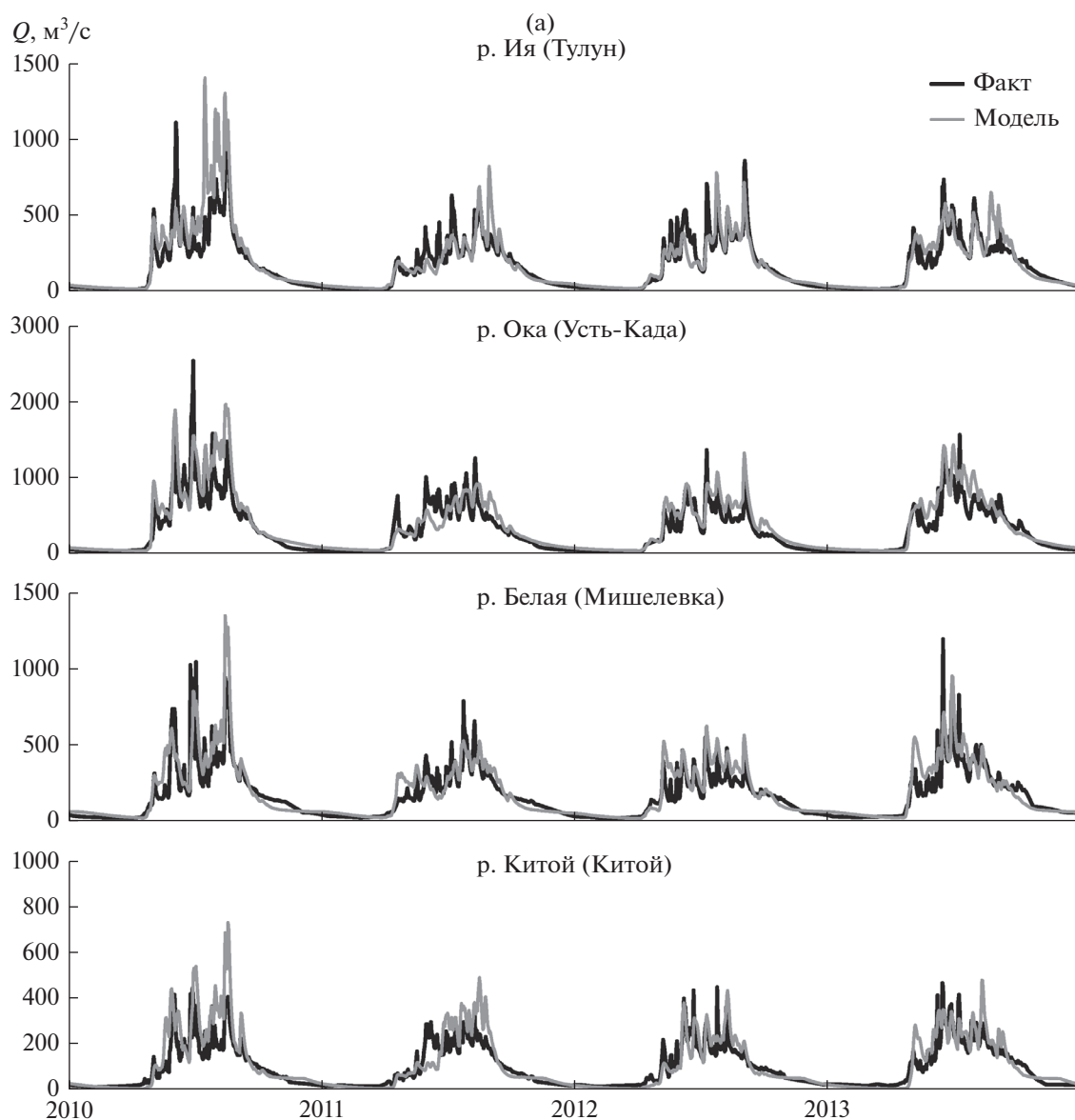


Рис. 5. Фактические и рассчитанные гидрографы на левобережных притоках Ангары за 4 года из: (а) периодов калибровки (2010–2013) и (б) валидации модели (1984–1987).

ниже его среднееголетней нормы, поэтому ни снеготаяние, ни весеннее половодье на р. Ия не могли оказать непосредственного влияния на формирование катастрофических паводков в июне–июле 2019 г.

Влажность почвы. Анализ хода рассчитанной влажности почвы у г. Тулун (см. рис. 6) за период 2015–2019 гг. показывает, что в результате влажного лета 2018 г. в осенне-зимний период 2018–2019 гг. в окрестностях Тулуна установилось высокое увлажнение почвы (временные отрезки с постоянной влажностью на графике характеризуют зимнее увлажнение промерзшей почвы в различные годы). Снеготаяние весной 2019 г. и обильные осадки в мае–июне поддерживали вы-

сокую влажность почвы, близкую к наименьшей полевой влагоемкости. Пространственная картина высокого увлажнения речных бассейнов подтверждается рассчитанными по модели ежедневными полями влажности почвы для всей водосборной территории. Результат таких расчетов на 25 июня 2019 г. (первый дождливый день катастрофического паводка) приведен на рис. 7. Чтобы исключить влияние различных типов почв на степень их увлажнения, при построении полей влажности почвы содержание влаги нормировалось на величину наименьшей полевой влагоемкости. На значительной части бассейна, особенно на западе территории в районе водосбора р. Ия, влажность почвы была близка к наимень-

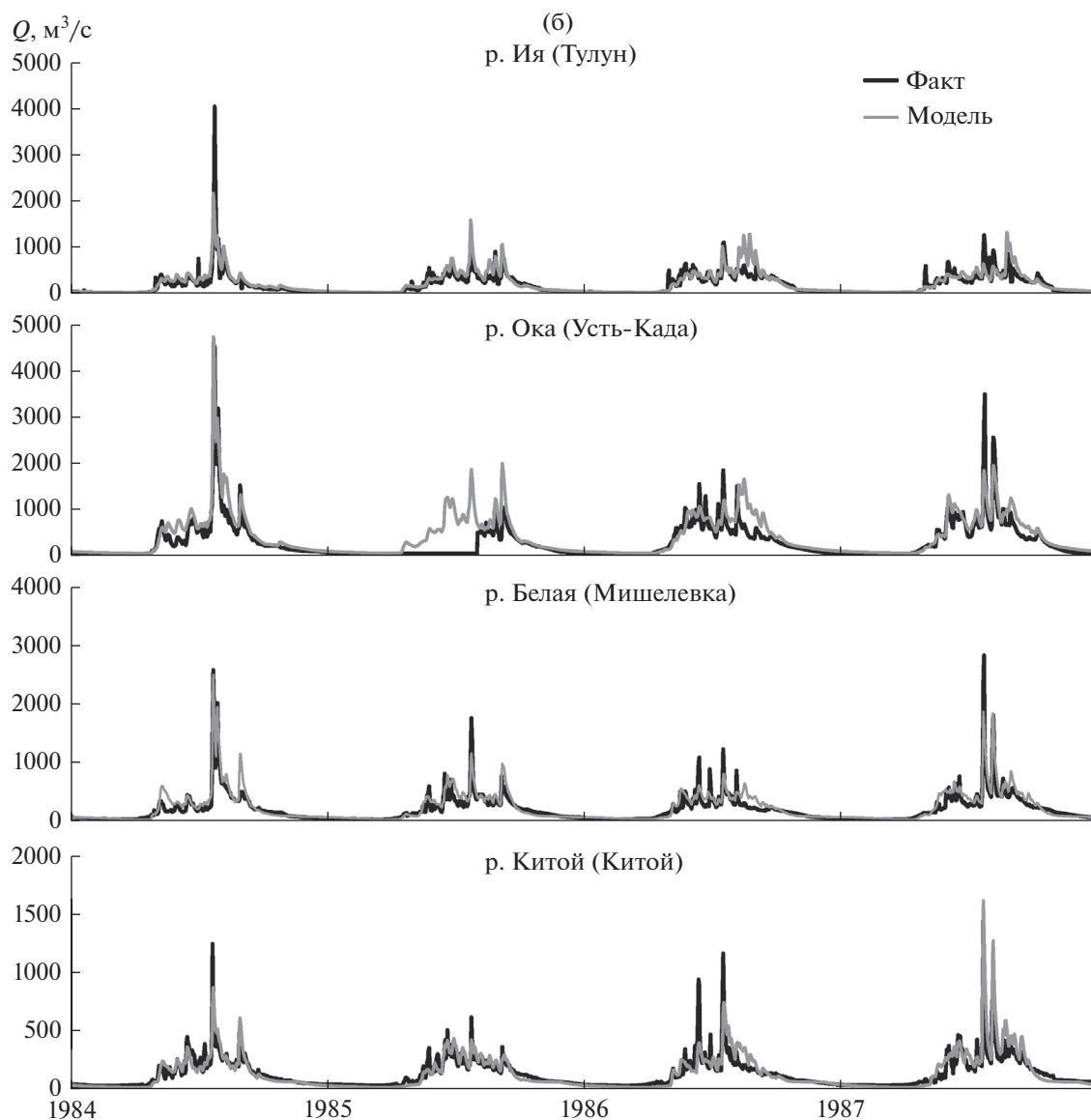


Рис. 5. Окончание.

шей полевой влагоемкости или даже превышала ее (переувлажненная почва). Менее влажными оставались области на востоке бассейна, ближе к устьевой части левобережных притоков р. Ангары. Очевидно, что в условиях переувлажненной почвы в период первой волны паводка потери стока на впитывание в почву на значительной части территории бассейна и, в частности, на водосборе р. Ия были минимальны, что стало важным фактором формирования высокого паводка. Аналогичная картина, согласно расчетам, сформировалась и перед второй волной паводка в конце июля 2019 г.

Осадки. И, наконец, главный фактор формирования катастрофического паводка на левобережных притоках Ангары — величина и простран-

ственное распределение слоя осадков за паводковые периоды. На рис. 8 слева приведено оцененное моделью поле суммарных осадков по данным наблюдений на метеостанциях за период 25–27 июня 2019 г., сформировавших первую волну паводка, а справа — поле осадков за период 26–28 июля во время второй волны паводка. В июне наиболее мощные осадки выпали в горной и предгорной части бассейна р. Ия (свыше 200 мм). Так, на метеостанциях “Тулун” и “Икей” за три дня выпало соответственно 81 и 217 мм осадков, что значительно (до трех раз) превышало месячную норму. По некоторым сведениям, в п. Аршан в среднем течении р. Ия выпало около 250 мм осадков. Такие суммы осадков за короткий промежуток времени превышали наблюдаемые исто-

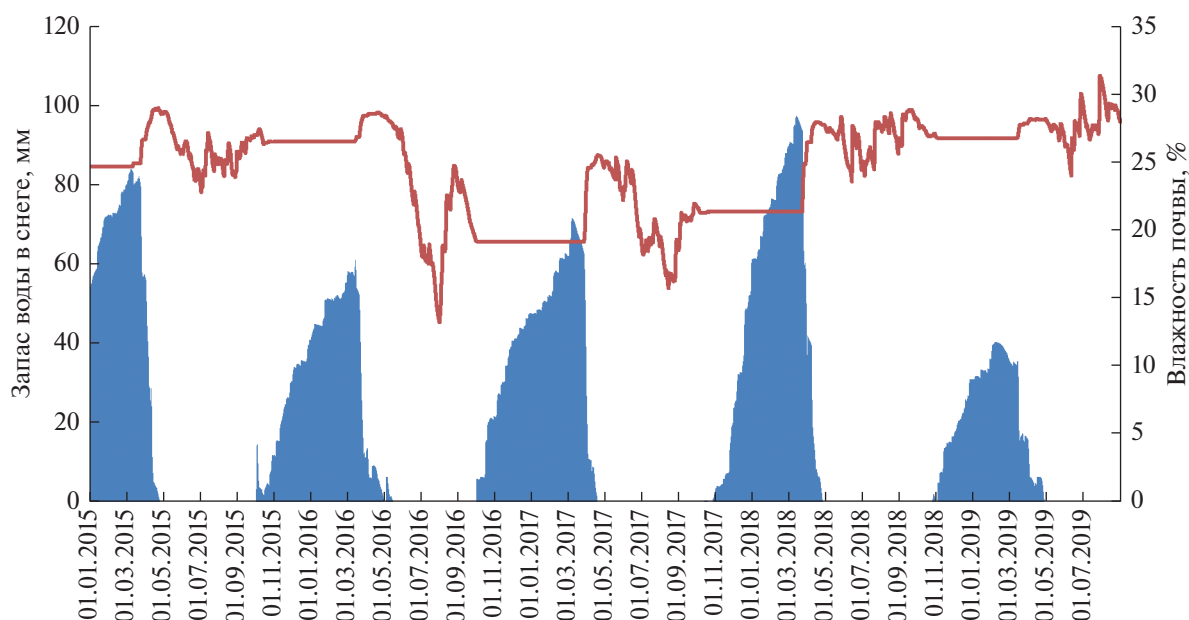


Рис. 6. Рассчитанный ход запасов воды в снежном покрове и влажности почвы за период 2015–2019 гг. в районе г. Тулун.

рические максимумы. Сильные дожди выпали и на центральную часть рассматриваемой территории (водосбор р. Оки). На юге, юго-востоке и севере бассейна осадки были более умеренными.

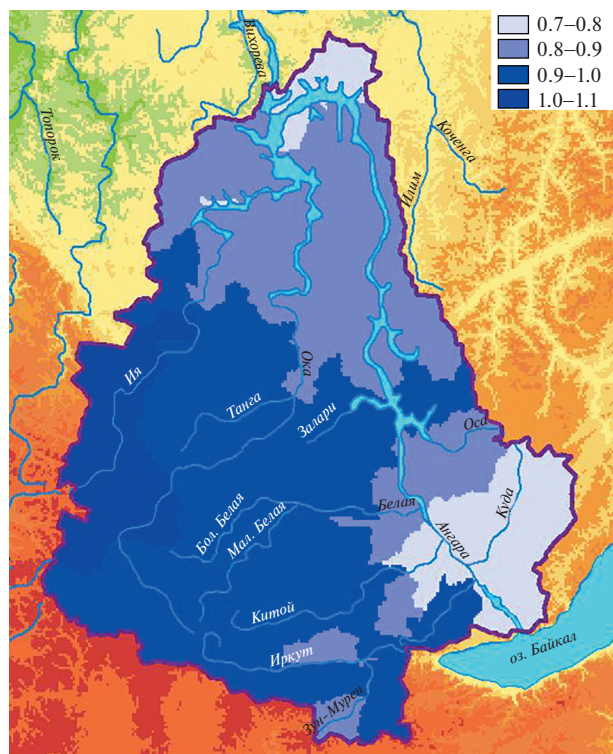


Рис. 7. Рассчитанное поле нормированной влажности почвы в бассейне Ангары на 25 июня 2019 г.

В июле в период второй волны паводка в очагах с максимальными суммами осадков в целом выпадали менее интенсивные осадки по сравнению с первой волной, а пространственное распределение слоя осадков было более равномерным. Зона осадков максимальной интенсивности сосредоточилась в центральной части бассейна с постепенным убыванием слоя осадков в южном и северных направлениях.

Паводки. Смоделированные гидрографы стока на левобережных притоках Ангары в паводковый период лета 2019 г. показаны на рис. 9. На рр. Ие (г. Тулун) и Кирей (с. Уйгат) максимальные расходы сформировались во время первой волны паводка, что обусловлено сочетанием факторов переувлажненной почвы и экстремальными осадками в горной и предгорной частях бассейна р. Ия (значения рассчитанных максимумов паводков и даты их прохождения в 2019 г. на левобережных притоках Ангары приведены в табл. 4). Согласно расчетам по модели в этот период на р. Ия сформировались максимальные за весь период наблюдений расходы. Так, в г. Тулун значение максимального среднесуточного расхода паводка, вызвавшего жертвы и значительные разрушения, составило $5640 \text{ м}^3/\text{с}$. Максимальные расходы гидрографов на рр. Оке (с. Усть-Када) и Белой (р.п. Мишелевка) сформировались во время второй волны паводка, а осадки первой июньской волны не вызвали экстремальных паводков на этих реках.

Модель адекватно воспроизводит даты прохождения максимальных расходов на реках (в первую или во вторую волну паводка), опреде-

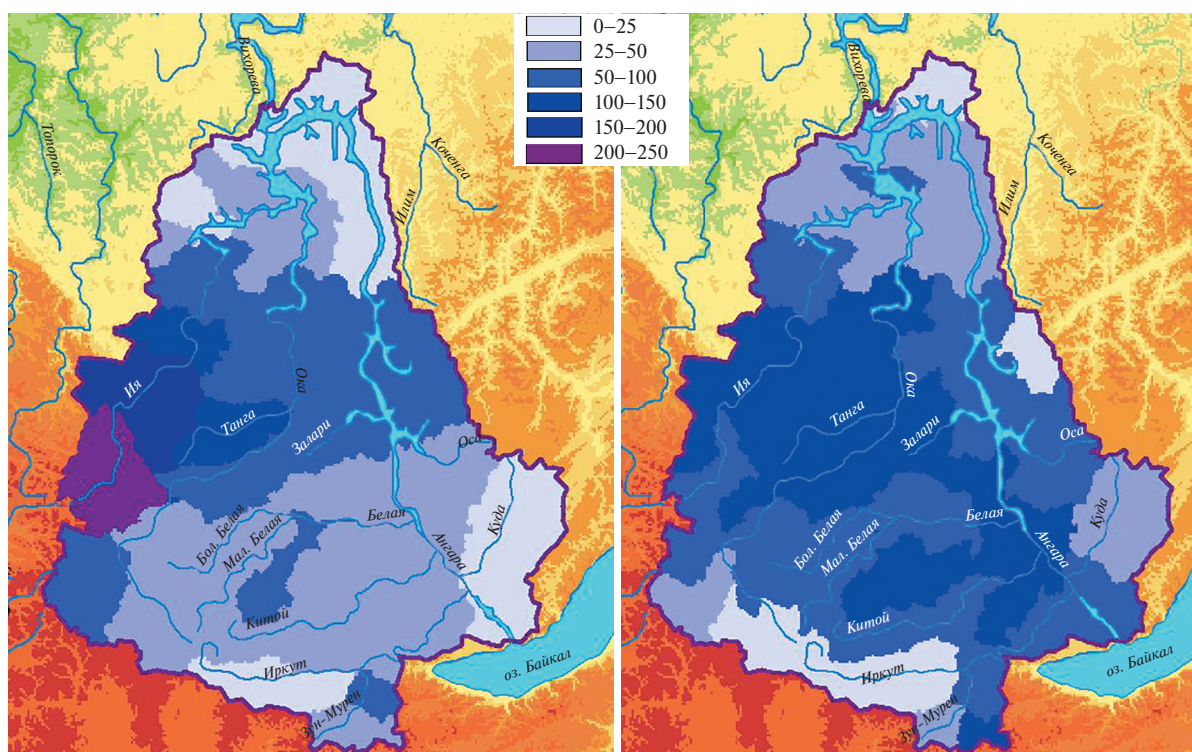


Рис. 8. Рассчитанные поля сумм осадков в бассейне Ангары за периоды первой (25–27 июня 2019 г., слева) и второй (26–28 июля 2019 г., справа) волн паводка.

ленные по данным наблюдений за уровнем воды. Рассчитанные и фактические даты прохождения пиков паводков отличаются не более чем на сутки. Таким образом, можно заключить, что модель адекватно воспроизводит указанные пространственно-временные особенности формирования паводков 2019 г.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Пространственно распределенная модель ECOMAG была адаптирована для расчетов формирования стока на левобережных притоках р. Ангары с едиными для всех речных бассейнов параметрами характеристик подстилающей поверхности. Своеобразие частных водосборов отдельных притоков отражается в модели сочетани-

ем в них и пространственным распределением конкретных типов почв, растительности, рельефа, уклонов, структуры речной сети и метеорологических условий. Модель была откалибрована и верифицирована по многолетним (35 лет) рядам гидрометеорологических наблюдений. Статистические оценки погрешности расчетов среднесуточных расходов воды показали, что для 5 из 6 гидрологических постов результаты моделирования можно признать удовлетворительными по критерию Нэша–Сатклифа.

Оценки погрешностей расчета среднемноголетних максимальных расходов на рр. Ия, Кирей, Ока, Белая получились не больше 10%. Погрешности расчета максимальных расходов на этих

Таблица 4. Рассчитанные и предварительно оцененные Росгидрометом по данным наблюдений значения максимальных расходов паводков и даты их прохождения в 2019 г. на левобережных притоках Ангары

Река, пункт	Модель $Q_{\max}$, м ³ /с	Модель Дата	Наблюдения $Q_{\max}$	Наблюдения Дата
Ия, г. Тулун	5640	28.06	—	29.06
Кирей, с. Уйгат	1570	27.06	—	—
Ока, с. Усть-Када	3840	30.07	3610	1.08
Белая, р.п. Мишелевка	2600	30.07	2320	31.07

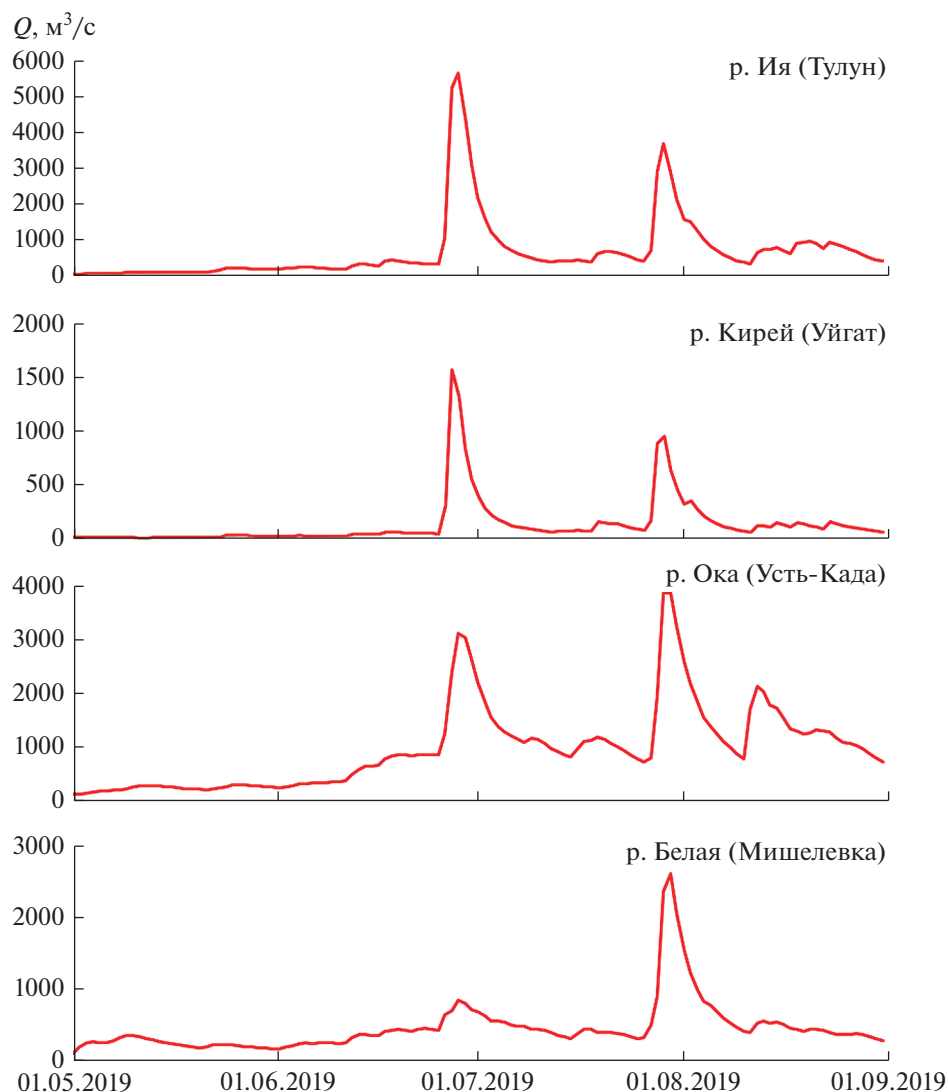


Рис. 9. Рассчитанные гидрографы стока на левобережных притоках Ангары в 2019 г.

гидропостоях за период наблюдений лежат в диапазоне от 4 до 16%.

2. Пространственное моделирование факторов формирования экстремальных паводков 2019 г. на рассматриваемой территории в предшествующий паводковой ситуации период показало, что:

- максимальные запасы воды в снежном покрове весной 2019 г. были ниже среднееголетних норм, поэтому и снеготаяние, и весеннее половодье на левобережных притоках Ангары непосредственно не могли оказать существенного влияния на формирование катастрофических паводков в июне–июле 2019 г.;

- высокое предзимнее увлажнение почв, весеннее снеготаяние и обильные осадки в мае–июне 2019 г. сформировали на значительной части территории, особенно на западе, в районе водосбора р. Ия, высокую влажность почвы, близкую к наи-

меньшей полевой влагоемкости или даже превышающую ее (переувлажненные почвы). В этих условиях в период первой волны паводка потери стока на впитывание в почву на значительной части бассейна и, в частности, на водосборе р. Ия были минимальны, что послужило дополнительным фактором формирования высокого паводка. Аналогичная картина увлажнения почвы, близкого к наименьшей полевой влагоемкости, согласно расчетам сформировалась и перед второй волной паводка;

- главный фактор формирования катастрофического паводка на р. Ия – величина и пространственное распределение слоя осадков за паводковые периоды. В горных и предгорных участках бассейна р. Ия в конце июня выпали мощные осадки (свыше 200 мм), превысившие наблюдаемые исторические максимумы. Достаточно силь-

ные дожди выпали и на центральную часть бассейна (водосбор р. Оки). В период второй волны паводка в конце июля в целом выпадали менее интенсивные осадки, но пространственное распределение осадков было более равномерным.

Таким образом, основными факторами формирования катастрофических паводков на р. Ия в 2019 г. по результатам моделирования являются экстремальные осадки и переувлажненные почвы перед выпадением осадков, обуславливающие высокие коэффициенты стока.

3. Согласно модельным расчетам, на западе рассматриваемой территории бассейна Ангары на водосборе р. Ия в период июньского паводка 2019 г. сформировался выдающийся паводок, максимальный расход которого значительно превысил исторический максимум за период наблюдений и составил 5640 м³/с. На р. Оке рассчитанный максимальный расход июньского паводка не превышал исторических значений. На р. Белой июньский паводок не был высоким. Такая пространственная картина прохождения паводка в регионе тесно коррелирует с полем осадков за 25–27 июня (см. рис. 8). В период прохождения второй волны паводка в регионе в конце июля – начале августа сформировалась обратная картина: на водосборе р. Ия максимумы были ниже июньских значений, а на рр. Оке и Белой прошли максимальные в 2019 г. расходы, которые не превышали максимальных расходов за период наблюдений. При сопоставлении рассчитанных максимальных расходов с предварительными оценками Росгидромета на двух гидропостях (р. Ока – с. Усть-Када, р. Белая – р.п. Мишелевка) получены близкие значения (различия в 6 и 12%).

Таким образом, можно заключить, что разработанная региональная гидрологическая модель адекватно воспроизводит пространственно-временные особенности формирования катастрофического паводка 2019 г. на исследуемых левобережных притоках р. Ангары. Разработанная технология имеет высокий потенциал как в части расширения географии применения – за счет включения притоков рр. Китой и Иркут, а также других крупных паводкоопасных притоков р. Ангары ниже Братского водохранилища (рр. Уда, Бирюса и др.) – так и в области ее использования – для повышения качества гидроинформационной поддержки при разработке стратегии, планировании и реализации дорожных водохозяйственных мероприятий, направленных на снижение рисков наводнений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Информационная база для построения гидрологической модели создана в рамках исследований по теме

Госзадания Института водных проблем РАН № 0147-201900003.

FUNDING

The information base for constructing a hydrological model was created within the state-ordered research theme no. 0147-201900003 of the Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Беднарчук С.Е., Мотовилов Ю.Г. Технология информационной поддержки при управлении каскадами водохранилищ // Гидротехническое строительство. 2017. № 7. С. 22–35.
- Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549. 2014. <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> (дата обращения 20.01.2020).
- Задонина Н.В., Леви К.Г. Хронология природных и социальных феноменов в Сибири и Монголии. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2008. 759 с.
- Зайков Б.Д. Высокие половодья и паводки на реках СССР за историческое время. Л.: Гидрометеиздат, 1954. 135 с.
- Иркутская летопись // Тр. Восточно-Сибирского отдела Русского географического общества. 1914. № 8. 418 с.
- Макарьева О.М. Результаты моделирования паводка на реке Ия – Тулун. 2019. https://vk.com/other_hydrology-rezultaty-modelirovaniya-pavodka-na-reke-iyatulun (дата обращения 20.01.2020).
- Мисюркеев Ю.А., Марасанов М.Г., Кичигина Н.В. Риск затопления и подтопления Иркутской области и анализ ущерба от них // Водные ресурсы Байкальского региона: проблемы формирования и использования на рубеже тысячелетий: Материалы науч.-практ. конф. / науч. ред. С.С. Тимофеева. Иркутск: Изд-во Иркутского гос. ун-та, 1998. Т. 1. С. 153–156.
- Мотовилов Ю.Г., Гельфан А.Н. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: РАН, 2018. 300 с. <https://doi.org/10.31857/S9785907036222000001>
- Разумов В.В., Разумова Н.В., Пчелкин В.И. Масштабы и опасность наводнений в Сибирском регионе России // Наука. Инновации. Технологии. 2015. № 4. С. 103–144.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1972. Т. 16. Вып. 2. 400 с.
- Селиверстов Ю.Г. Саяны и горы Тувы. 2003. <http://www.geogr.msu.ru/avalanche/regions/als/sa.doc/sa.htm> (дата обращения 20.01.2020).
- Шаликовский А.В., Лепихин А.П., Тиунов А.А., Курганович К.А., Морозов М.Г. Наводнения в Иркутской области 2019 года // Водное хозяйство России. 2019. № 6. С. 48–65.

Motovilov Y., Gottschalk L., Engeland L., Rodhe A. Validation of a distributed hydrological model against spatial

observation // Agric. Forest Meteor. 1999. V. 98–99. P. 257–277.

Catastrophic Floods in the Angara River Basin in 2019: Modeling the Conditions of Formation and Water Regime of Rivers

Yu. G. Motovilov^{1,*}, A. N. Gelfan^{1,2}, and V. O. Polyanin¹

¹Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Russia

*e-mail: motol49@yandex.ru

The main factors of extraordinary rainfall floods formation on the Angara River left tributaries in the summer of 2019, which caused catastrophic floods in the Irkutsk oblast, were investigated. On the basis of information modeling system, the core of which is a physically based model of runoff formation ECOMAG, a spatial distributed regional hydrological model was developed. The model performance was evaluated against the long-term (35 years) data of hydrometeorological observations in the five river basins of the region. It was found that the simulated stream flow hydrographs and the peak flow values fit satisfactorily (in terms of the assigned statistical criteria) to the corresponding observations. Based on the spatial modeling results, fields of the hydrological cycle characteristics (precipitation, snow water equivalent, soil moisture) in the upper Angara basin in the summer of 2019 were analyzed. It was shown that the main factors in the formation of catastrophic floods on the Iya River were extreme precipitation combined with small losses of runoff for infiltration into preliminary saturated soils. The simulated peak flow discharge on the river near city of Tulun exceeded the historical maximum by 40% and amounted to 5640 m³/s. The spatial and temporal peculiarities of the two flood waves formation on the studied Angara River left tributaries in 2019 were analyzed.

Keywords: flood, rainfall flood, Angara River basin, Iya River, city of Tulun, hydrological modeling

REFERENCES

- Bednaruk S.E., Motovilov Yu.G. Technology of information support in the management of water reservoirs cascades. *Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo*, 2017, no. 7, pp. 22–35. (In Russ.).
- Bulygina O.N., Veselov V.M., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M. *Opisanie massiva srochnykh dannykh ob osnovnykh meteorologicheskikh parametrah na stantsiyakh Rossii. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii bazy dannykh № 2014620549* [Description of the Urgent Data on the Main Meteorological Parameters at Russian Stations. Certificate of State Registration of the Database no. 2014620549]. 2014. Available at: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#opisanie-massiva-dannyh> (accessed: 20.01.2020).
- Irkutskaya letopis'* [Irkutsk Chronicle]. Tr. Vostochno-Sibirskogo otdela Russkogo geograficheskogo obshchestva [Proc. of the East Siberian Dep. of the Russ. Geogr. Soc.]. Irkutsk, 1914, no. 8. 418 p.
- Makar'eva O.M. Results of flood modeling on the Iya River–Tulun. Nestandartnaya Gidrologiya, 2019. Available at: https://vk.com/@other_hydrology-rezultaty-modelirovaniya-pavodka-na-reke-iya-tulun (accessed: 20.01.2020). (In Russ.).
- Misyurkeev Yu.A., Marasanov M.G., Kichigina N.V. Flooding risk of the Irkutsk oblast and analysis of damages from them. In *Vodnye resursy baikal'skogo regiona: problemy formirovaniya i ispol'zovaniya na rubezhe tysyacheletii. Mat. nauchn.-prakt. konf.* [Water Resources of the Baikal Region: Problems of Formation and Use at the Turn of the Millennium. Mat. Sci.-Appl. Conf.]. Timofeev S.S., Ed. Irkutsk: Irkutsk. Gos. Univ., 1998, pp. 153–156. (In Russ.).
- Motovilov Yu.G., Gelfan A.N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachakh gidrologii rechnykh basseinov* [Runoff Generation Models in River Basin Hydrology]. Moscow: RAN, 2018. 300 p.
- Motovilov Y., Gottschalk L., Engeland L., Rodhe A. Validation of a distributed hydrological model against spatial observation. *Agric. Forest Meteor.*, 1999, vols. 98–99, pp. 257–277.
- Razumov V.V., Razumova N.V., Pchelkin V.I. The magnitude and the risk of flooding in the Siberian region of Russia. *Nauka. Innovatsii. Tekhnologii*, 2015, no. 4, pp. 103–144. (In Russ.).
- Resursy poverkhnostnykh vod SSSR* [Surface Water Resources of the USSR]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1972, vol. 16, no. 2. 400 p.
- Seliverstov Yu.G. *Sayany i gory Tuvy* [Sayan and Mountains of Tuva]. 2003. Available at: <http://www.geogr.msu.ru/avalanche/regions/als/sa.doc/sa.htm> (accessed: 20.01.2020).
- Shalikovskii A.V., Lepikhin A.P., Tiunov A.A., Kurganovich K.A., Morozov M.G. The 2019 floods in Irkutsk oblast. *Vodnoe Khozyaistvo Rossii*, 2019, no. 6, pp. 48–65. (In Russ.).
- Zadonina N.V., Levi K.G. *Khronologiya prirodnnykh i sotsial'nykh fenomenov v Sibiri i Mongolii* [Chronology of Natural and Social Phenomena in Siberia and Mongolia]. Irkutsk: Irkutsk. Gos. Univ., 2008. 759 p.
- Zaikov B.D. *Vysokie polovod'ya i pavodki na rekakh SSSR za istoricheskoe vremya* [High Rainfall and Snowmelt Floods on the Rivers of the USSR During Historical Time]. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1954. 135 p.