

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАВОДОЧНОГО СТОКА ПРИ ВЫПАДЕНИИ СИЛЬНЫХ ДОЖДЕЙ В ЗОНЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД*

© 2018 г. М.В. Болгов¹, Е.А. Бояринцев², М.К. Филимонова¹

¹ ФГБУН «Институт водных проблем РАН», Москва, Россия

² Одесский государственный экологический университет, г. Одесса, Украина

Ключевые слова: бассейн Амура, дождевые паводки, формирование стока, математическая модель, расчетная схема, многолетнемерзлые грунты, деятельный слой, водобалансовые станции, единичный гидрограф, склоновое регулирование, генезис стока, подповерхностное стекание.



М.В. Болгов



Е.А. Бояринцев



М.К. Филимонова

Рассматриваются особенности формирования стока дождевых паводков и подход к их моделированию для малых водосборов зоны распространения многолетнемерзлых пород. В каче-

стве исходных данных использованы сведения о сильных дождях и вызванных ими паводках, полученные по данным наблюдений на экспериментальных водосборах Колымской и Бомнакской стоковых станций.

На основе имеющихся представлений о динамике деятельного слоя многолетнемерзлых пород и результатов экспериментальных исследований, выполненных в разные годы, предложена математическая модель, позволяющая учитывать аккумулирующую роль талого слоя грунта и мохового покрова. Для учета особенностей формирования дождевого стока использована моделирующая система НЕС-НМС, позволяющая воспроизводить ход паводочного стока с временной дискретностью 1 час в специфических условиях склонового регулирования на основе метода единичного гидрографа Кларка.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 16-05-00766 А.

Выяснение условий формирования больших паводков является достаточно сложной задачей по причине ограниченности информации о редких гидрологических событиях, наблюдаемых в разнообразных изменяющихся природных условиях. Однако в отдельных случаях удастся предложить более простую расчетную схему, поскольку рядом факторов формирования можно пренебречь ввиду их незначительного эффекта. Обоснование такой упрощенной схемы формирования стока является существенным этапом при оценке так называемых предельных максимумов стока, определяемых при проектировании особо ответственных гидротехнических сооружений.

Обсуждаемая в статье гидрологическая задача состоит в выяснении особенностей формирования стока в зоне вечной мерзлоты путем сбора и анализа данных специализированных наблюдений на водобалансовых станциях в горных условиях бассейна р. Амур и его моделирования на основе программной системы НЕС–HMS [1, 2] с интервалом дискретности 1 час.

На территории Российской Федерации в зоне распространения многолетнемерзлых пород функционировали две стоковые станции: Колымская в верхней части бассейна р. Колыма и Бомнакская в бассейне р. Зей. Бомнакская станция прекратила свое существование после строительства Зейского водохранилища в 70-е годы прошлого века. На Колымской станции в последние десятилетия объем наблюдений и экспериментальных работ резко сократился, станция фактически перестала функционировать как водобалансовый полигон. Колымская станция находится вне бассейна Амура, но условия формирования стока на станции схожи с условиями зоны распространения многолетнемерзлых грунтов на изучаемом водосборе бассейна Амура. Это обстоятельство позволяет использовать данные наблюдений на Колымской станции при определении структуры и назначении параметров модели формирования стока горных районов бассейна р. Амур. Имеющиеся результаты наблюдений на стоковых станциях представляют уникальную возможность верификации моделей формирования стока, выяснения механизмов его формирования.

Анализ условий формирования стока в условиях криолитозоны и расчет его потерь

Колымская воднобалансовая станция (КВБС) является единственным в мире исследовательским гидрологическим полигоном, расположенным в горных условиях с повсеместным распространением низкотемпературных многолетнемерзлых пород. Особенностью исследуемых гидрологических условий криолитозоны является то, что водно-энергетический баланс толщи сезонно талого или деятельного слоя, является определяющим для гидрофизических и геокриологических процессов, которые, в свою очередь, формируют гидрологические характеристики склонов.

Начиная с момента схода снежного покрова, начинается оттаивание почвогрунтов, которое продолжается до середины августа – начала сентября. Мощность деятельного слоя зависит от характера подстилающей поверхности, экспозиции склона, высоты местности. Наиболее глубокое оттаивание приурочено к приводораздельной части бассейна и достигает в условиях КВБС 1,8–2,0 м. В нижней части склона на переувлажненных прирусловых участках оттаивание не превышает 0,2–0,3 м.

В горных условиях рассматриваемого региона слой сезонного оттаивания представлен продуктами выветривания и подстилается мерзлыми породами. Поверхностный склоновый сток в таких условиях не образуется даже в случае высокой интенсивности осадков и происходит подповерхностным путем по контакту с кровлей мерзлоты, которая является водупором. По этому водупору просочившаяся влага стекает по направлению уклона и попадает в первичную гидрографическую сеть. Поверхность мерзлоты представлена сильнольдистыми породами и характеризуется сложной топографией.

Под слоем мохово-лишайниковой дернины и толщей рыхлого чехла располагается хорошо разработанная микроручейковая сеть, которая прослеживается практически до водораздела, но не фиксируется даже на крупномасштабных картах. За счет водообразования при оттаивании деятельного слоя сток на мельчайших водосборах отмечается даже при длительном отсутствии осадков. Поверхностный склоновый сток (ливневой, по классификации А.Н. Бефани [3]) здесь практически не формируется.

Особый интерес представляют результаты экспериментальных исследований формирования стока с помощью искусственного дождевания. Такие работы были выполнены в 1965 г. Е.Д. Гопченко на опытных площадках территории Бомнакской стоковой станции [4, 5]). Результаты исследований показали, что для возникновения стока с опытных площадок в зависимости от предшествующего увлажнения и мощности мохового покрова необходимо от 1 до 85 мм. Е.Д. Гопченко продемонстрировал, что большая аккумуляция влаги в толще мха обуславливает растянутую во времени водоотдачу, в результате чего спад гидрографа с площадки метровой ширины может продолжаться до 1,5–2 часов и более. Представленные в [4–7] и других работах экспериментальные данные, а также результаты обследования территорий Колымской и Бомнакской стоковых станций, позволили авторам вышеупомянутых работ сделать вывод, что формирование как дождевых, так и снеговых паводков происходит подавляющим образом в форме подповерхностного стекания.

В рассматриваемых условиях распространения многолетнемерзлых пород поверхностное задержание и впитывание в подстилающий горизонт

практически отсутствуют, единственным видом потерь стока являются потери на перехват почвенным и растительным покровом и на восполнение дефицита насыщения. Расчет общих потерь паводочного стока в зоне многолетнемерзлых пород осуществляется методом оценки дефицита насыщения почвенного слоя и постоянных потерь, при котором осуществляется учет непрерывного изменения содержания влаги для рассматриваемого слоя почвы [1, 2]. Метод оценки дефицита насыщения реализован в рассматриваемой моделирующей системе в сочетании с моделью растительного покрова, характеризуемого эвапотранспирацией. За счет механизма эвапотранспирации слой почвы высыхает между событиями осадков, но при расчете единичных паводков, формирующихся в течении суток, потерями на испарение можно пренебречь.

Трансформация стока на склонах и русловых системах

Результаты анализа условий формирования стока на водосборах водобалансовых станций и его моделирования позволили выбрать для дальнейших расчетов метод единичного гидрографа Кларка [2, 8]. В этом методе расчет гидрографа выполняется в два этапа. Вначале расчет трансформации поступающих на склоны подбассейна осадков в сток осуществляется на основе кривой добегаания, а затем получаемый гидрограф преобразуется с помощью модели линейного резервуара, что обеспечивает учет эффекта аккумуляции воды на всем подбассейне. Для характеристики максимального времени добегаания в подбассейне используется известное представление о времени концентрации стока, а верифицируемые емкостные коэффициенты (параметры зависимости расхода от объема аккумулярованной воды), используемые в модели линейного резервуара, позволяют учитывать упомянутые дополнительные эффекты аккумуляции воды на подбассейне.

Для моделирования потоков в открытых руслах и каналах для рассматриваемых условий используется традиционный метод Маскингам или модифицированный метод моделирования трансформации паводочной волны в виде каскада емкостей. Для речных русел, форма поперечных сечений которых допускает аппроксимацию в виде каналов трапециевидальной, прямоугольной, треугольной или круглой формы, расчеты трансформации волны, в соответствии с рекомендациями по использованию системы HEC-HMS, выполняются с помощью модели кинематической волны.

Разработка модели формирования паводочного стока с использованием данных наблюдений Бомнакской воднобалансовой станции

На территории водобалансовой станции Бомнак в соответствии с существовавшими ранее пунктами наблюдений выделены 5 водосборов

(рис. 1): ручей Холодный, ручей Петровский, ручей Сумгинский, ручей Безымянный, ручей Лог №2. При формировании структуры модели водосборы ручьев Холодный и Петровский были разбиты на 4 и 2 подбассейна соответственно.

В результате анализа гидрографической сети и структуры водосборной площади для моделирования стока предложена расчетная схема бассейна в виде подводосборов и соединяющих их русел (рис. 1). В табл. 1 приведены сведения о водосборах и указаны значения параметров, использованных в расчетах.

На рис. 2 представлены результаты расчетов гидрографов паводочного стока и сопоставление рассчитанных и наблюдаемых значений расходов воды для исследованных водосборов ручьев в паводок 11–12 июня 1966 г.

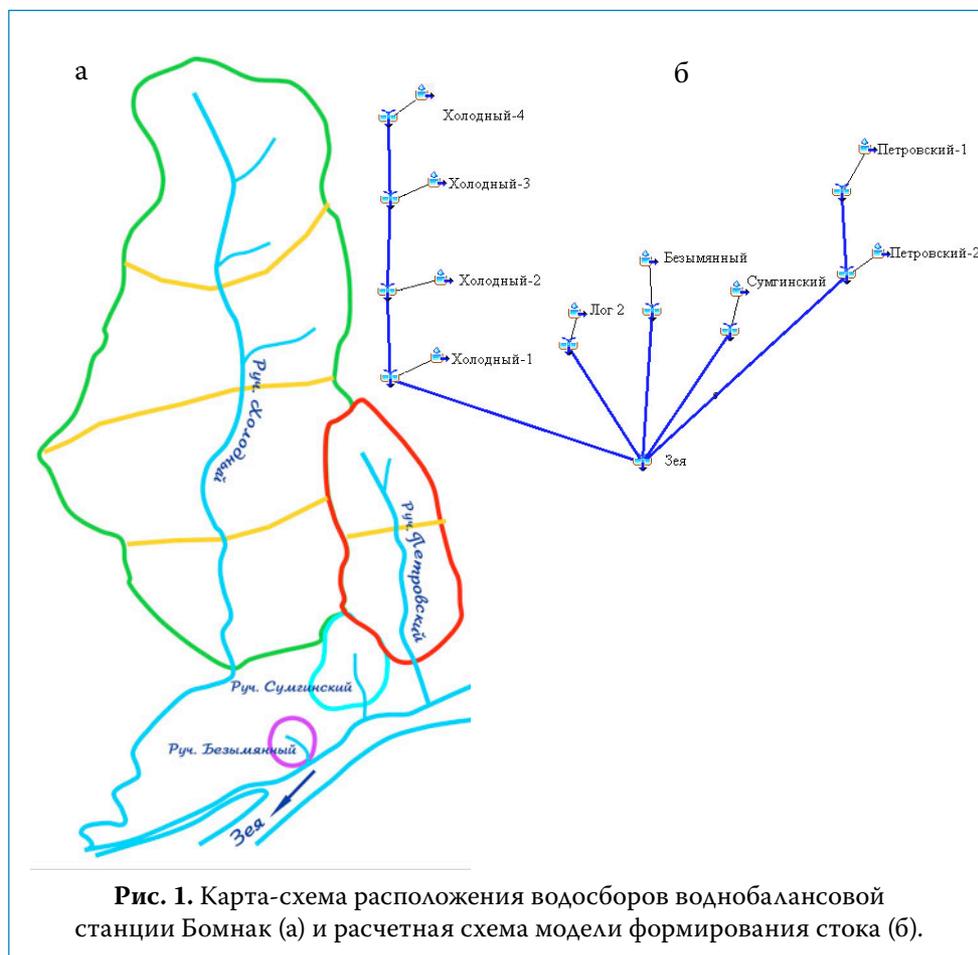
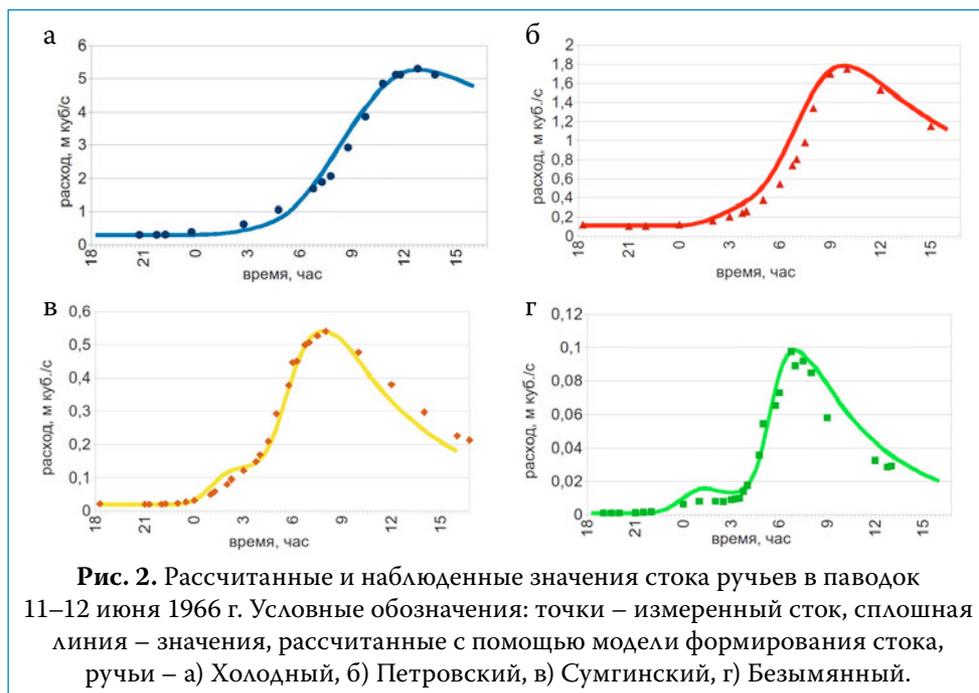


Таблица 1. Сведения о водосборах Бомнакской воднобалансовой станции

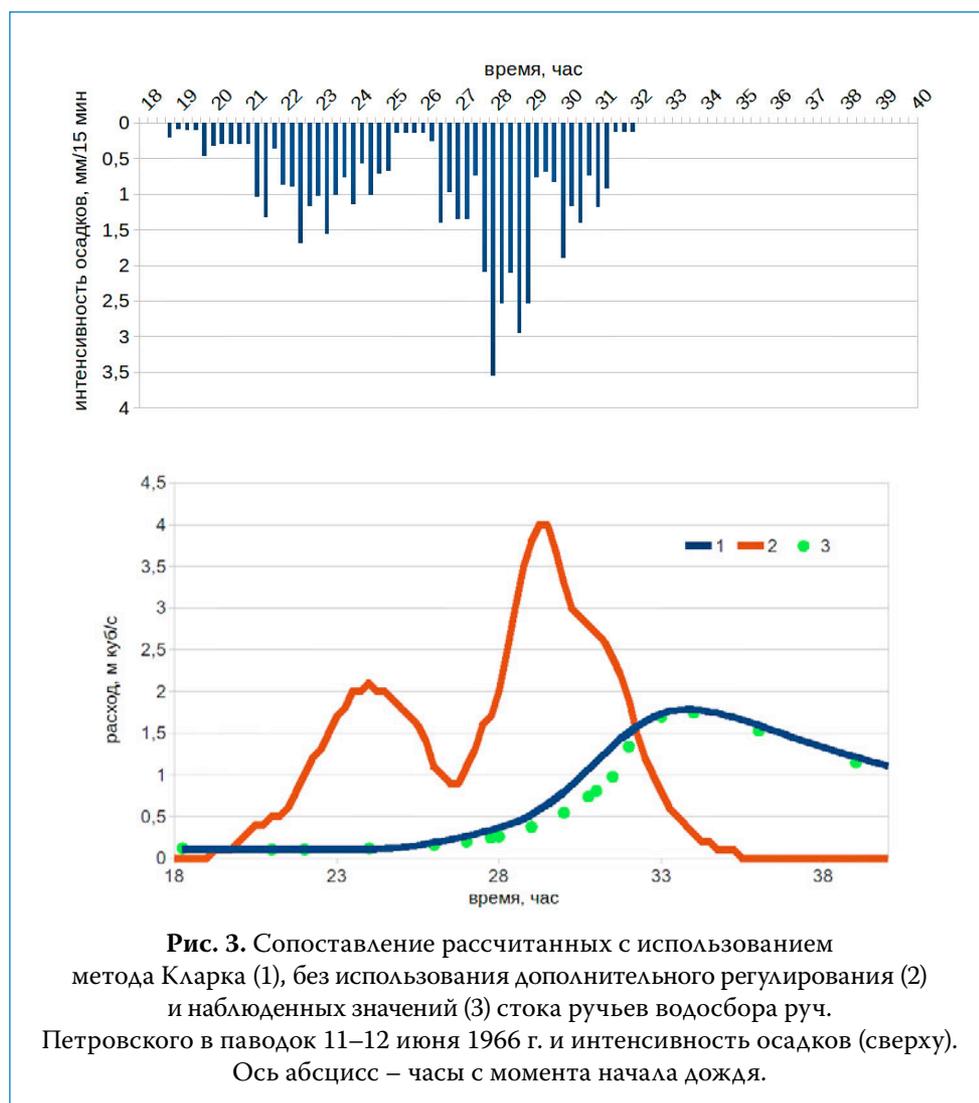
Название водотока (ручья)	Холодный	Петров-ский	Сумгин-ский	Безымян-ный
Площадь водосбора (км ²)	17,8	3,23	0,72	0,2
Длина водотока (км)	7,0	3,0	0,76	0,3
Средний уклон водотока (м/км)	15,9	24,6	50,8	125
Средний уклон водосбора (м/км)	45,6	46,5	60,8	81,8
Параметры потерь стока				
Начальный дефицит насыщения почвенного слоя (мм)	12	12	10	4
Максимальный дефицит (мм)	12	12	20	10
Постоянные потери стока (мм/час)	1,7	1,5	1,8	4
Доля непроницаемых поверхностей (% покрытия)	0	0	0	0
Параметры метода трансформации (метода единичного гидрографа Кларка)				
Время концентрации стока (час)	8	5	3	2,5
Емкостной коэффициент (час)	20	10	6	5
Базовый сток: среднемесячные значения (м куб./с)	0,3	0,11	0,02	0,0011

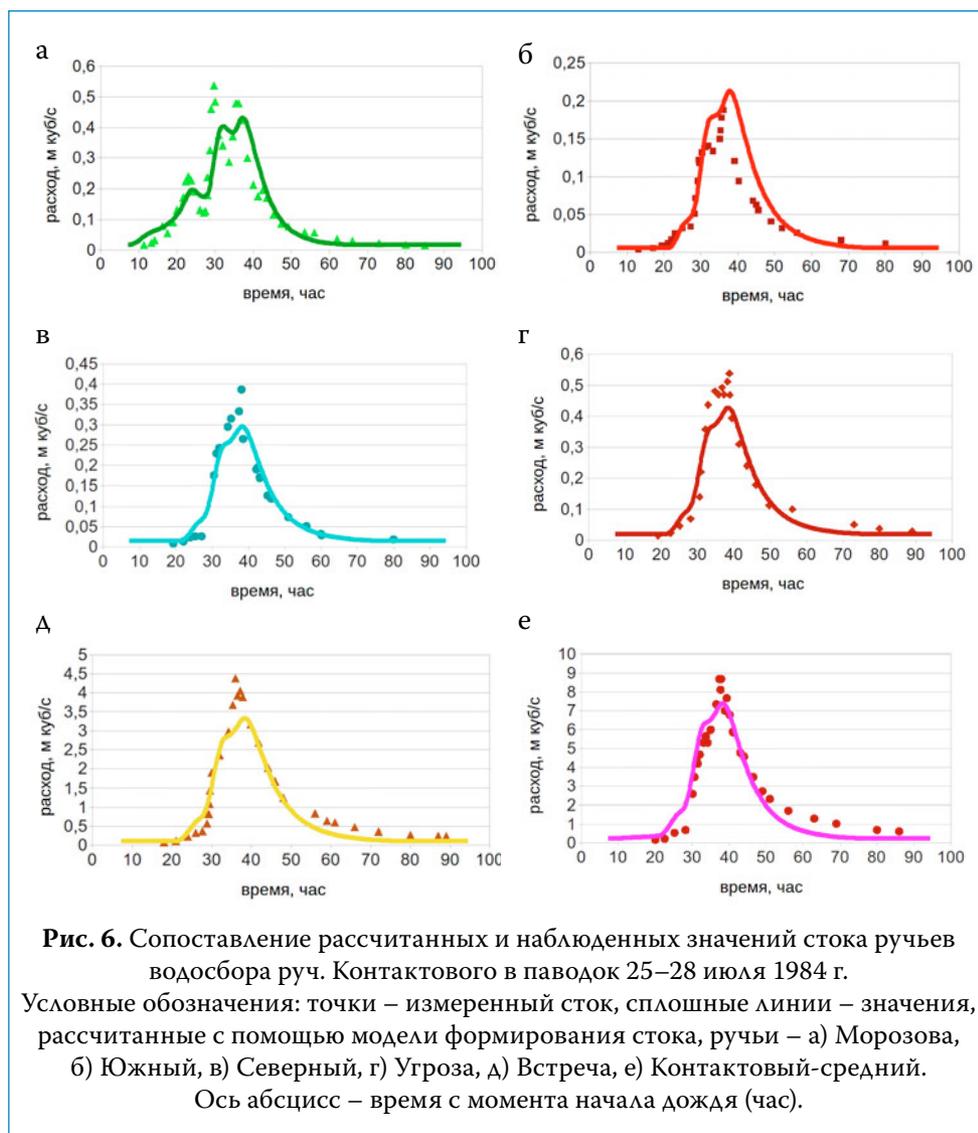


Разработка модели формирования паводочного стока с использованием данных наблюдений на Колымской воднобалансовой станции

На территории Колымской воднобалансовой станции, в соответствии с имеющейся структурой наблюдательной сети, выделены 25 подводосборов (рис. 4). Выделенные подбассейны представлены на схеме (рис. 5.).

На рис. 6 приведены результаты моделирования стока на водосборах Колымской воднобалансовой станции по результатам наблюдений в наиболее сильный паводок 25–28 июля 1984 г.





Рассмотренные выше результаты моделирования получены для водосборов, размеры которых соответствуют представлениям о стокоформирующих элементах, т. е. допускающих представление в виде ограниченного набора склонов и элементарных русел. Для последующего перехода к моделированию стока с существенно более крупных водосборов необходимо дать оценку возможности увеличения размеров расчетных элементов (площадей подводосборов) модели формирования стока в связи с имеющимися

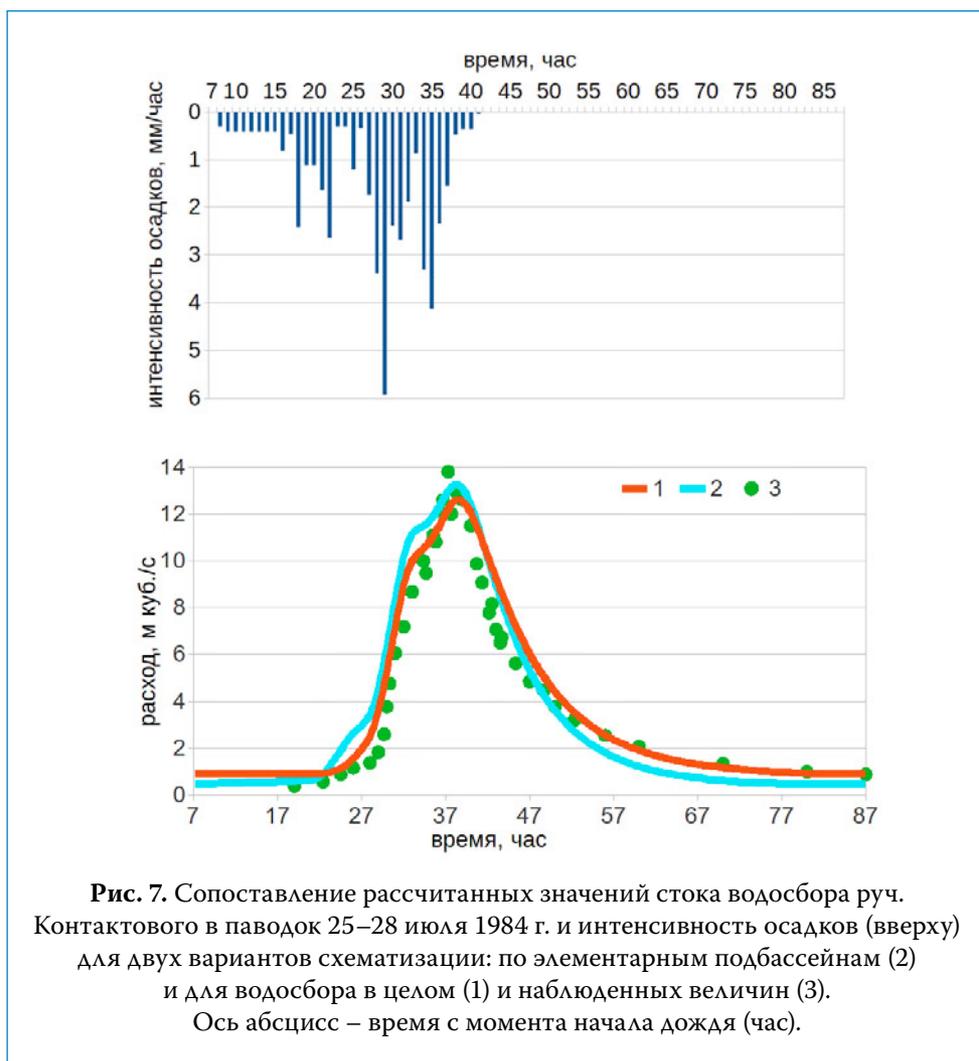


Рис. 7. Сопоставление рассчитанных значений стока водосбора ручья Контактowego в паводок 25–28 июля 1984 г. и интенсивность осадков (вверху) для двух вариантов схематизации: по элементарным подбассейнам (2) и для водосбора в целом (1) и наблюдаемых величин (3).
Ось абсцисс – время с момента начала дождя (час).

ограничениями на объемы вычислительных ресурсов. Для этой цели был выполнен вычислительный эксперимент, заключающийся в представлении водосбора ручья Контактowego Нижний в виде одного подбассейна с осреднением величин осадков. Результаты расчетов (хорошее совпадение расчетных и смоделированных гидрографов) показали (рис. 7), что в рассматриваемых природно-климатических условиях вполне возможно рассчитывать сток по более крупным подбассейнам. Данный результат позволяет несколько упростить расчетную схему модели формирования стока для крупного водосбора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задача, решаемая в данной работе, заключается в разработке подхода к моделированию паводочного стока с временной дискретностью 1 час в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов для последующей оценки предельных максимумов стока.

Сложность проблемы моделирования паводков заключается в значительном разнообразии условий их формирования. Неопределенность прогноза (расчета) стока определяется не только статистическим характером выпадения дождевых осадков, но и условиями на т. н. подстилающей поверхности, определяющими генезис формирования паводков. Большое разнообразие природно-климатических условий на территории Российской Федерации определяет и различия в расчетных схемах для разных зональных условий. В частности, для зоны распространения многолетнемерзлых пород нельзя ограничиться чисто поверхностным стеканием, а необходимо учитывать регулирующую роль мохового покрова. Для учета дополнительной регулирующей функции склона рекомендован метод единичного гидрографа Кларка, позволивший для исследованных случаев выпадения сильных дождей получить приемлемые результаты моделирования дождевых паводков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. HEC-HMS <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>.
2. *Straub T.D., Melching Ch.S., and Kocher K.E.* Equations for Estimating Clark Unit-Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois. Water-Resources Investigations Report 00–4184. Urbana, Illinois, 2000. 30 p.
3. *Бэфани А.Н., Бэфани Н.Ф., Гопченко Е.Д.* Региональные модели формирования паводочного стока на территории СССР. Обзорная информация. Вып. 2. ВНИГМИ МЦД. Обнинск, 1981. 36 с.
4. *Бояринцев Е.А.* Азональные факторы формирования дождевого стока на территории Колымской ВБС. Труды ДВНИГМИ, 1988. Вып. 135. С. 67–93.
5. *Бояринцев Е.А., Гопченко Е.Д.* Исследование пространственно-временных закономерностей сезонного протаивания деятельного слоя горных склонов зоны многолетней мерзлоты в летний период // Метеорология, климатология и гидрология. Вып. 29. Киев, 1993. С. 13–24.
6. *Бояринцев Е.А., Сербов Н.Г., Болгов М.В.* Влияние подстилающей поверхности на формирование годового стока малых рек зоны многолетней мерзлоты (по материалам Колымской воднобалансовой станции) // Труды VI Всероссийского гидрологического съезда. Секция 5. Гидрофизические явления и процессы. Формирование и изменчивость речного стока, гидрологические и водохозяйственные расчеты. М., 2006. С. 44–48.

7. Гопченко Е.Д. Экспериментальные исследования процессов формирования дождевого стока в условиях многолетней мерзлоты. Вып. 5. Киев: Изд-во Киевского ун-та, 1969. С. 218–223.
8. Clark C.O. Storage and the unit hydrograph: Transactions: American Society of Civil Engineers. Vol. 110. 1945. P. 1419–1488.

Сведения об авторах:

Болгов Михаил Васильевич, д-р техн. наук, заведующий лабораторией моделирования поверхностных вод, ФГБУН «Институт водных проблем РАН»; Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: bolgovmv@mail.ru

Бояринцев Евгений Львович, канд. геогр. наук, доцент кафедры гидрологии суши Одесского государственного экологического университета, Украина, 65016, Одесса, ул. Львовская, 15; e-mail: e@bo.od.ua

Филимонова Мария Константиновна, главный специалист, ФГБУН «Институт водных проблем РАН», Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3; e-mail: maria_filimonova@mail.ru