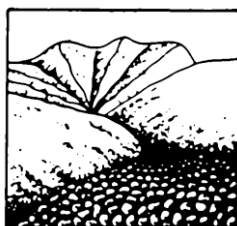


DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection

Proceedings
of the 5th International Conference

Tbilisi, Georgia, 1-5 October 2018



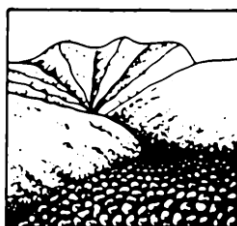
Editors
S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili

Publishing House “Universal”
Tbilisi 2018

СЕЛЕВЫЕ ПОТОКИ: катастрофы, риск, прогноз, защита

Труды
5-й Международной конференции

Тбилиси, Грузия, 1-5 октября 2018 г.



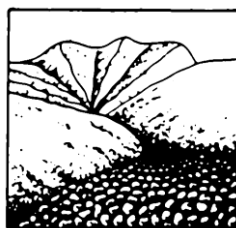
Ответственные редакторы
С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили

Издательство Универсал
Тбилиси 2018

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა

მე-5 საერთაშორისო კონფერენციის
მასალები

თბილისი, საქართველო, 1–5 ოქტომბერი, 2018



რედაქტორები
ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი

გამომცემლობა "უნივერსალი"
თბილისი 2018

УДК 551.311.8
ББК 26.823

Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита. Труды 5-й Международной конференции. Тбилиси, Грузия, 1-5 октября 2018 г. – Отв. ред. С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили. – Тбилиси: Универсал, 2018, 671 с.

Debris Flows: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Proceedings of the 5th International Conference. Tbilisi, Georgia, 1-5 October 2018. – Ed. by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili. – Tbilisi: Publishing House “Universal”, 2018, 671 p.

ღვარცოფები: კატასტროფები, რისკი, პროგნოზი, დაცვა. მე-5 საერთაშორისო კონფერენციის მასალები. თბილისი, საქართველო, 1–5 ოქტომბერი, 2018. გამომცემლობა "უნივერსალი", თბილისი 2018, 671 გვ. პასუხისმგებელი რედაქტორები ს.ს. ჩერნომორეც, გ.ვ. გავარდაშვილი.

Ответственные редакторы С.С. Черноморец, Г.В. Гавардашвили
Edited by S.S. Chernomorets, G.V. Gavardashvili

Верстка: С.С. Черноморец, К.С. Висхаджиева, Е.А. Савернюк
Page-proofs: S.S. Chernomorets, K.S. Viskhadzhieva, E.A. Savernyuk

При создании логотипа конференции использован рисунок из книги С.М. Флейшмана «Селевые потоки» (Москва: Географгиз, 1951, с. 51).
Conference logo is based on a figure from S.M. Fleishman’s book on Debris Flows (Moscow: Geografiz, 1951, p. 51).

ISBN 978-9941-26-283-8

© Селевая ассоциация
© Институт водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава
Грузинского технического университета

© Debris Flow Association
© Ts. Mirtskhulava Water Management Institute
of Georgian Technical University

© ღვარცოფების ასოციაცია
© საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის
ც. მირცხულავას სახელობის წყალთა
მეურნეობის ინსტიტუტი



Моделирование катастрофических паводков в бассейне р. Туапсе

**О.М. Макарьева^{1, 2, 3, 4}, Т.А. Виноградова^{1, 2}, Н.В. Нестерова^{2, 4},
А.Ю. Виноградов¹, И.Н. Бельдиман¹, А.Д. Колупаева²**

¹ООО «НПО «Гидротехпроект», г. Санкт-Петербург, Россия,
omakarieva@gmail.com, vinograd1950@mail.ru, gd@npogtp.ru,
irinabeldiman@gmail.com

²Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург,
Россия, nnesterova1994@gmail.com, alya.kolupaeva.97@mail.ru

³Институт Мерзлотоведения им. М.П. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

⁴Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

Целью исследования является оценка применимости гидрологической модели «Гидрограф» для расчета срочных максимальных расходов воды в бассейнах малых рек Черноморского побережья Кавказа на примере р. Туапсе. В рамках работы выполнена схематизация водосбора р. Туапсе, систематизированы параметры гидрологической модели «Гидрограф» для его основных ландшафтов и проведено непрерывное моделирование процессов формирования стока с суточным шагом за период с 1966-2013 гг. Медианное значение критерия эффективности Нэша-Сатклиффа при моделировании гидрографов стока с расчетным шагом сутки составило 0.60 для периода продолжительностью 32 года, что позволило оценить полученные результаты как удовлетворительные. Оцифрованные данные pluviографов об осадках для двух метеорологических станций Горный и Туапсе в пределах исследуемого бассейна за период с 1980 по 2011 годы использованы для моделирования максимальных срочных расходов воды, в том числе трех выдающихся паводков (1991, 2005, 2010). Проведены численные эксперименты с данными о пространственном распределении осадков для расчета срочного расхода катастрофического паводка 1 августа 1991 года. Оценены величины срочных и суточных расходов для паводка в июне 2005 года, когда наблюдения за стоком на р. Туапсе не проводились. На основе результатов моделирования сделан вывод об ошибках в опубликованных данных о срочном и суточных расходах во время паводка в октябре 2010 года. Результаты работы подтверждают принципиальную возможность применения метода детерминированного гидрологического моделирования для расчета срочных максимальных расходов воды в бассейнах малых рек Черноморского побережья Кавказа. Новизна предлагаемого подхода заключается в учете основных факторов формирования стока при расчете экстремальных характеристик водного режима для исследуемого региона, в том числе и для неизученных бассейнов.

*модель Гидрограф, срочный максимальный расход воды, данные pluвиографа,
река Туапсе, оценка параметров*

Modeling of catastrophic floods in the basin of the river Tuapse

**O.M. Makarieva^{1, 2, 3, 4}, T.A. Vinogradova^{1, 2}, N.V. Nesterova^{2, 4},
A.Yu. Vinogradov¹, I.N. Beldiman¹, A.D. Kolupaeva²**

¹“Gidrotehproekt” Ltd, St. Petersburg, Russia, omakarieva@gmail.com,
vinograd1950@mail.ru, gd@npogtp.ru, irinabeldiman@gmail.com

²Saint-Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, nnesterova1994@gmail.com,
alya.kolupaeva.97@mail.ru



³Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russia

⁴State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

The aim of the study is to evaluate the applicability of the hydrological model Hydrograph for estimation of instant maximum water discharge at the basins of the small rivers of the Black Sea coast of the Caucasus by the example of the Tuapse river. The parameters of hydrological model were assessed and systematized for main landscapes of the basin and continuous simulation of flow formation processes with daily time step was conducted for the period 1966-2013. The median value of the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient was 0.60 for the whole period, which allowed to evaluate the results as satisfactory. Digitized precipitation data of pluviographs for Gorny and Tuapse meteorological stations located within the research basin for the period from 1980 to 2011 were used to simulate maximum instant discharges, including those for three outstanding floods (1991, 2005, 2010). Numerical experiments were carried out with the data on spatial distribution of precipitation to simulate instant maximum discharge for the catastrophic flood occurred on August 1, 1991. The values of instant and daily discharges were estimated for significant flood in June 2005, for which observational flow data is not available. Based on the modeling results, it was concluded that published flow discharges data during the flood in October 2010 was inadequate. The results of the study confirm the possibility to apply the method of deterministic hydrological modeling for assessment of instant maximum water discharges at small rivers of the Black Sea coast of the Caucasus. The novelty of the proposed approach is direct consideration of main runoff formation processes when calculating extreme characteristics of water regime for studied region, including unexplored basins.

Hydrograph model, instant maximum discharge, pluviograph data, the Tuapse river, parametrization

Введение

Бассейны малых рек побережья Черного моря являются одним из паводкоопасных регионов России. Катастрофические ливни, приводящие к формированию экстремальных паводков, очень локальны, синхронность формирования особо высоких пиков расходов часто не прослеживается на сопредельных водосборах. Природные факторы формирования стока совместно с ливневым характером осадков обуславливают малое время добегания волн паводков, быстрый подъем и спад уровня воды и многократное увеличение расходов воды [Алексеевский и др., 2016].

Большое количество работ посвящены катастрофическим паводкам и наводнениям в районе исследования [Асарин, Жиркевич, 2012; Базелюк, Лурье, 2014; Мельникова, 2006; Ткаченко, Волосухин, 2013 и др.], в них в основном дается описание этих явлений на основе имеющейся гидрометеорологической информации. Существуют также методические разработки по расчету и моделированию процессов формирования паводков (Белякова, 2015; Секурова, 2014) и краткосрочного прогнозирования паводкового стока [Бориц и др., 2015]. В [Бориц и др., 2015] представлен развернутый обзор методов прогноза, применяемых за рубежом, и отмечается практическая невозможность их использования в нашей стране из-за отсутствия прогноза сплошных полей осадков, необходимых для качественного прогноза стока.

Проблемой региона также является оценка срочных максимальных расходов воды в задачах инженерного проектирования. При прохождении высоких паводков гидрологические посты часто разрушаются, в том числе и в результате заторных явлений, вызванных карчеходом [Панов и др., 2012]. В таких случаях величина максимального расхода, определенная по меткам высоких вод, имеет неоднозначный характер.



Целью данного исследования является оценка применимости метода детерминированного гидрологического моделирования для а) расчета срочных максимальных расходов воды при отсутствии наблюдений и б) уточнения их величин при приближительных методах их определения во время катастрофических паводков в бассейнах малых рек Черноморского побережья Кавказа. В качестве объекта исследования выбран водосбор р. Туапсе.

В рамках работы были поставлены и решены следующие задачи: параметризация гидрологической модели «Гидрограф» для основных ландшафтов бассейна р. Туапсе, расчеты стока на суточном интервале и оценка эффективности моделирования, сбор и систематизация данных плювиографов ближайших к водосбору метеорологических станций и постов, расчеты срочных расходов выдающихся паводков (1991, 2005, 2010) в бассейне р. Туапсе с использованием детальных данных об осадках, сравнение полученных результатов с «наблюденными» величинами.

Объект исследования

В качестве объекта исследования выбран пункт в бассейне реки Туапсе – г. Туапсе (код гидрологического поста 82013, площадь 351 км²), расположенный на Черноморском побережье Северного Кавказа. Климат района исследования влажный субтропический. На метеорологической станции Туапсе (2 м, 1966-2014) средняя годовая температура воздуха составляет 13.9°C, годовое количество осадков достигает 1436 мм, те же величины для станции Горный (325 м) составляют 10.1 и 1720 мм. Основная доля осадков выпадает в зимний период. Среднегодовое количество стока р. Туапсе составляет 1200 мм. Максимальный срочный расход был «зафиксирован» в 1991 году и составил 2300 м³/с.

Природные условия территории типичны для лесостепной зоны предгорий Главного Кавказского хребта. Средняя высота водосбора составляет 365 м, максимальная и минимальная – 1425 (г. Лысая) и 18 м. Бассейн преимущественно занят смешанными, дубово-грабовыми и еловыми лесами (Рис. 1).

Реки исследуемого района имеют дождевой тип питания с характерным паводковым режимом стока. Паводки на реках наблюдаются в течение всего года. На территории Туапсинского района ежегодно фиксируется прохождение сильных ливневых осадков, которые приводят к наводнениям [Панов и др., 2012].

Гидрологическая модель «Гидрограф»

В исследовании была использована детерминированная гидрологическая модель «Гидрограф». Модель представляет собой математическую систему с распределенными параметрами, описывающую процессы формирования стока в бассейнах с различными физико-географическими характеристиками [Виноградов, 1988; Виноградов, Виноградова, 2010; Vinogradov et al., 2011]. Модель зарекомендовала себя работоспособным инструментом исследования и прогноза гидрологических процессов [Semenova et al., 2013], в том числе на неизученных речных бассейнах [Виноградов и др., 2014]. Алгоритмы модели сочетают физически-обоснованные и концептуальные подходы в описании процессов наземного гидрологического цикла, что позволяет сохранить баланс между сложностью расчетных схем и ориентацией на ограниченную входную информацию для моделирования. Выпадение и задержание осадков, накопление, уплотнение и стаивание снежного покрова, динамика влаги и тепла в снеге и в верхних горизонтах грунта, включая промерзание и протаивание, описываются в модели в явном виде. Подземное питание, склоновая и русловая трансформация стока, ветровое перераспределение снега, испарение рассчитываются концептуальными методами, которые показали свою эффективность в различных условиях. Использование в качестве входной информации небольшого числа метеорологических характеристик (температура и влажность воздуха, осадки) позволяет применять модель на



малоизученных речных бассейнах. Результатом моделирования служат суточные расходы воды в замыкающем створе, а также водные балансы водосборов, в том числе и неизученных, и различные переменные состояния ландшафтов. Это позволяет оценивать соответствие результатов расчетов природным процессам. Расчетный интервал модели – сутки и менее.

Параметризация модели «Гидрограф» для бассейна р. Туапсе

В целях подготовки к моделированию была проведена схематизация водосбора р. Туапсе и систематизированы параметры модели «Гидрограф» для его основных ландшафтов. Водосбор р. Туапсе был покрыт регулярной гексагональной сеткой, узлами которой являются репрезентативные точки (РТ), а также разделен на четыре стокоформирующих комплекса (СФК) [Виноградов, Виноградова, 2010]: смешанные, дубово-грабовые, еловые леса, а также городские агломерации (рис.1).

Для каждого СФК были оценены параметры растительности, склонов, подземного питания, а также разработаны типичные почвенные профили. Каждый профиль разбит на 10 расчетных слоев почвы (РСП) по 10 см. Профиль имеет уникальный набор параметров, который позволяет описать вертикальное движение влаги в разрезе почвенной колонки. В число таких параметров входят: плотность почвы, или ее удельная масса; пористость, находящаяся в зависимости от удельной и объемной масс почвенных частиц; максимальная водоудерживающая способность, которая в среднем для данных профилей изменялась от 50 мм в первом РСП до 20 мм в нижнем; параметр влажности завядания; удельная массовая теплоемкость и удельная массовая теплопроводность пород; коэффициент фильтрации, являющийся мерой водопроницаемости системы почво-грунтов. Данный коэффициент наиболее важен при учете формирования паводков и колеблется от 10 мм/мин в верхних слоях почвы до 0,5 мм/мин в нижних слоях. Для СФК, характеризующего городские условия формирования стока, коэффициент фильтрации верхнего РСП установлен в значение 0 мм/мин (формирование быстрого поверхностного стока).

В качестве входной метеорологической информации задавались суточные данные по температуре и влажности воздуха и количеству выпавших осадков по двум метеостанциям, расположенным в пределах или непосредственной близости от исследуемого водосбора: Горный (324 м) и Туапсе (2 м) (рис. 1).

При интерполяции осадков из метеорологических станций в РТ применялся метод нормирования суточных сумм осадков по их годовой среднемноголетней величине. Предварительное назначение годовых норм осадков для всех РТ проводилось на основе выявленных локальных зависимостей осадков от высоты местности. Для построения зависимостей количества осадков от высоты местности использовались суточные данные о количестве осадков на метеорологических станциях, а также данные климатических справочников о распределении осадков на метеорологических постах региона за исторический период наблюдений [Метеорологический..., 1964]. Для исследуемого водосбора градиент увеличения осадков принят равным 120 мм на 100 м.

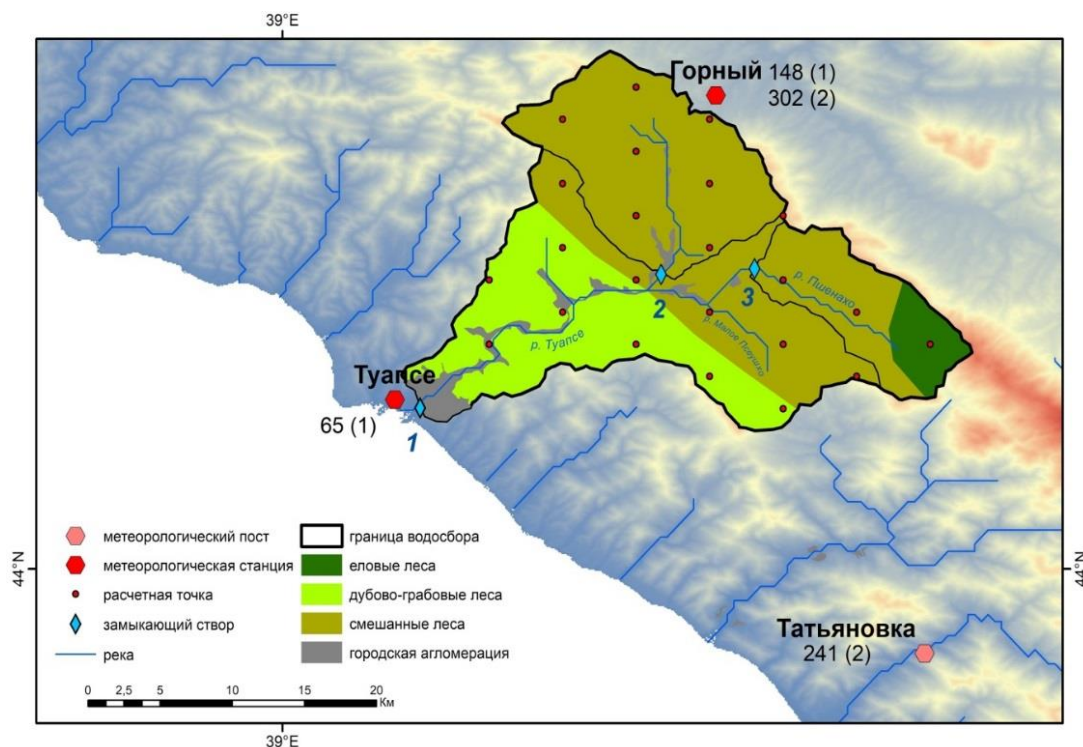


Рис. 1. Схема бассейна р. Туапсе и распределение стокоформирующих комплексов; 1 - р. Туапсе - г. Туапсе; 2 - р. Туапсе - выше устья р. Пшенахо; 3 - р. Пшенахо - выше с. Анастасиевка. Около метеостанций указано количество осадков (мм), выпавших в паводок 1991 г. по данным (1) - метеорологических ежемесячников [Метеорологический..., 1964]; (2) – [Панов и др., 2012]

Результаты моделирования с суточным расчетным шагом

Непрерывное моделирование процессов формирования стока с суточным шагом было проведено для бассейна р. Туапсе за период с 1966 по 2013 гг. Результатами моделирования стали гидрографы стока и значения элементов водного баланса.

Для оценки эффективности расчетов стока воды ряды рассчитанных расходов воды сравнивались с наблюдаемыми значениями на основе величины критерия Нэша-Сатклиффа (NS) [16]. На Рис. 2 приведено графическое сравнение рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока – представлены примеры хороших ($NS > 0.60$), удовлетворительных ($0.30 < NS < 0.60$) и неудовлетворительных ($NS < 0.30$) результатов. Обобщенные статистики и элементы водного баланса для всего периода расчета представлены в Таблице 1.

Несовпадение рассчитанных и наблюдаемых среднегодовых слоев стока составляет 38 мм или чуть более 3%. Осадки и испарение в бассейне р. Туапсе по результатам расчета составляют 1805 и 567 мм. Медианная величина критерия эффективности NS для суточных расходов воды достигает 0.60, средняя, максимальная и минимальная – 0.57, 0.78 и 0.20 соответственно. На основе анализа критерия NS и сравнения рассчитанных и наблюдаемых элементов водного баланса результаты моделирования стока в бассейне р. Туапсе могут быть признаны удовлетворительными.



Таблица 1. Значения статистических критериев и элементов водного баланса для бассейна р. Туапсе

Код поста	Река-створ	S	Период сравнения (наличия данных о стоке)	Y _o	Y _s	P	E	NS (av/med)	NS (max, год)	NS (min, год)
82013	р. Туапсе – г. Туапсе	351	1966-1991, 1994-1996, 2009-2010, 2013-2014	1200	1238	1805	567	0.57/ 0.60	0.78 (1981)	0.2 (1972)

S – площадь водосбора, км²; Y_o и Y_s – наблюдаемый и рассчитанный среднееголетний годовой слой стока, мм; P – осадки, мм; E – общее испарение, мм; av – среднее значение NS; med – значение медианы NS; max и min – максимальное и минимальное значение NS.

Моделирование выдающихся паводков на р. Туапсе с использованием данных плювиографов. Численные эксперименты с осадками

В настоящее время в РФ наблюдения за осадками производятся раз в 12 часов [Автоматизированная...], что не позволяет использовать стандартную метеорологическую информацию для расчетов срочных расходов воды в тех регионах, где формирование максимальных расходов воды обусловлено ливнями высокой интенсивности. Однако, значительная часть метеорологических станций оборудована плювиографами, а сведения об отдельных выдающихся ливнях публикуются в метеорологических ежемесячниках.

Авторами были собраны данные плювиографов для метеорологических станций Горный и Туапсе за период 1980-1992 и 1997-2011 [Метеорологический..., 1964]. Данные были осреднены до равномерного часового интервала и использованы для моделирования отдельных выдающихся паводков на р. Туапсе в 1991, 2005 и 2010 годах.

1991 год. Исторический паводок на р. Туапсе был зафиксирован 1 августа 1991 года, когда среднесуточный и срочный расходы воды были оценены по меткам высоких вод как 635 и 2300 м³/с соответственно [Панов и др., 2012]. Результатом ливневых осадков и выхода смерчей на берег стало резкое повышение уровня воды и формирование катастрофического селевого потока [Шнытарков и др., 2013].

По данным плювиографов на станциях Горный и Туапсе общее количество осадков за период с 1.40 ночи до 8.30 утра 1 августа 1991 года составило 148.1 и 65 мм соответственно. Средние и максимальные значения интенсивности осадков достигли 0.62 и 1.47 мм мин⁻¹ для станции Горный и 0.17 и 1.17 мм мин⁻¹ – для станции Туапсе.

Было проведено моделирование паводка с использованием данных плювиографов (Табл. 2, вариант 1). Общий рассчитанный суточный слой осадков для всего водосбора с учетом высотного градиента составил 155 мм, что практически совпадает с наблюдаемым суточным слоем стока 156 мм (согласно опубликованному суточному расходу) (рис. 3).

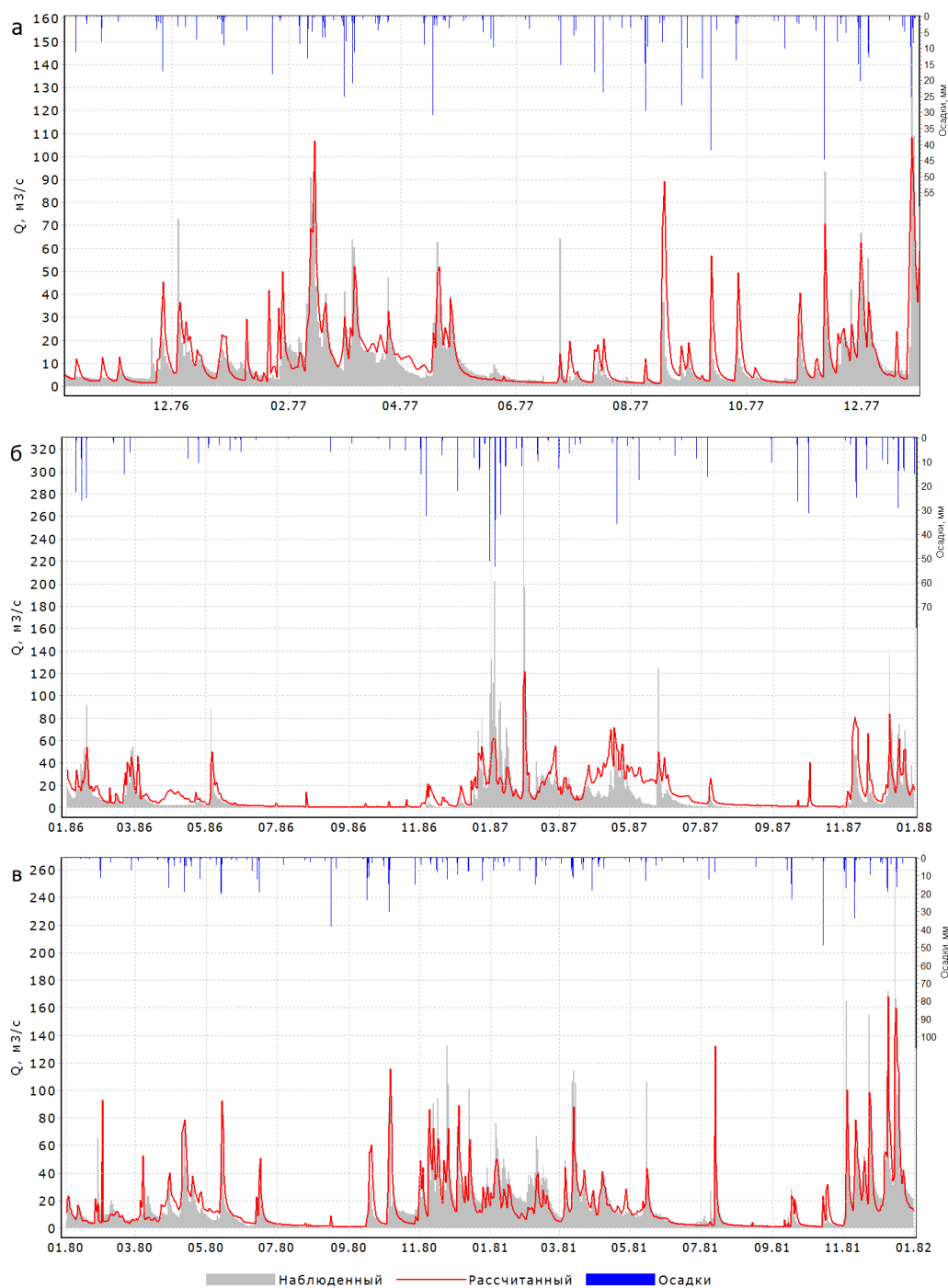


Рис. 2. Суточные рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока р. Туапсе – г. Туапсе, m^3/s : а – NS=0.78 (высокий), б – NS=0.20 (низкий), в – NS=0.60 (удовлетворительный)

Максимальный рассчитанный 1-часовой расход воды составил $890 \text{ m}^3/\text{s}$, суточный – $182 \text{ m}^3/\text{s}$, рассчитанный слой стока за сутки – 45 mm . Таким образом, рассчитанные величины расходов воды оказались в три и более раза ниже наблюдаемых. Вычислялось также распределение элементов водного баланса – согласно результатам моделирования, после длительного бездождевого периода потери на насыщение почвы влагой составили 82 mm , суммарные потери на испарение с почвенного покрова и емкости перехвата растительностью 7 mm , приток в подземные и почвенные стоковые элементы составил около 18 mm (Таблица 2). Модельные эксперименты с количеством



выпавших осадков показывают, что для формирования паводка наблюдаемой величины количество осадков должно быть в два раза больше.

В.Д. Панов и соавторы [Панов и др., 2012] приводят дополнительную информацию о паводке 1991 года. Во-первых, они сообщают, что основной объем паводка был сформирован левобережными притоками, рр. Пшенахо и Малое Псеушко (рис. 1). Во-вторых, в [Панов и др., 2012] приводятся суммы осадков 1 августа для метеорологического поста Татьянавка (96 м) – 241 мм и на водомерном посту с. Горное на реке Пшиш – 302 мм (рис. 1). Таким образом, расхождения данных о величине осадков на двух пунктах наблюдений (метеорологическая станция Горный и гидрологический пост с. Горное), находящихся в одном поселке, составляют почти 50 %.

Нами были проведены дополнительные два варианта расчета с использованием данных об осадках, описанных выше. Во втором варианте мы использовали пост Татьянавку (240 мм) и с. Горное (302 мм). В третьем варианте дополнительно к исходным данным плувиографов использовалась сумма осадков на посту Татьянавка. Рассчитанные слои осадков и стока за паводок составили 242/148 для второго и 180/62 мм для третьего вариантов. Срочный и суточный расход р. Туапсе в створе г. Туапсе составили 4200/600 и 1680/250 м³с⁻¹ соответственно. В [Панов и др., 2012] приводятся оценки для створов р. Туапсе выше устья р. Пшенахо и р. Пшенахо выше с. Анастасиевка (створы 2 и 3 на рис. 1). Площади водосборов этих створов определены ориентировочно по описаниям положения постов и картам и составляют 110 и 58.6 км². Результаты расчетов максимальных расходов воды по трем вариантам входных данных об осадках для створов 2 и 3 также представлены в Табл. 2 и на рис. 3.

На основании анализа полученных результатов представляется возможным сделать вывод о третьем варианте как наиболее близком к действительности распределении осадков.

2005 год. 17-18 июня 2005 года на метеостанции Горный было зафиксировано рекордное количество осадков – за 13 часов выпало 291 мм осадков, средняя и максимальная интенсивность их выпадения составила 0.36 и 1.90 мм мин⁻¹. В те же сутки в течение 6.5 часов на метеостанции Туапсе выпало 48.8 мм осадков. В следующие дни осадки продолжались и суммарно за период 17-24 июня составили 444 мм и 81.5 мм для метеостанций Горный и Туапсе соответственно.

В период 1997-2008 гг. наблюдения за расходами воды на гидрологическом посту р. Туапсе не проводились. Таким образом, неизвестно, насколько локальны были выпавшие 17 июня осадки, а также какой величины паводок они вызвали. Однако, в ночь с 21 на 22 июня 2005 года был зафиксирован сход селевого потока на железнодорожное полотно в районе разъезда Водопадный Северо-Кавказской железной дороги на участке Туапсе-Сочи, который был обусловлен выпадением в предшествующий период большого числа осадков [Колтерманн и др., 2012].

На рис. 4 приводится график рассчитанного гидрографа стока, элементов водного баланса и переменных состояний бассейна р. Туапсе за период 16 – 21 июня 2005 года. Максимальные рассчитанные 1-часовой и суточный расходы воды 17 июня 2005 года достигли соответственно 1316 и 191 м³с⁻¹. Согласно результатам моделирования количество выпавших на водосбор осадков в период 17-18 июня составило 206 мм, слой стока – 82 мм (таблица 2).

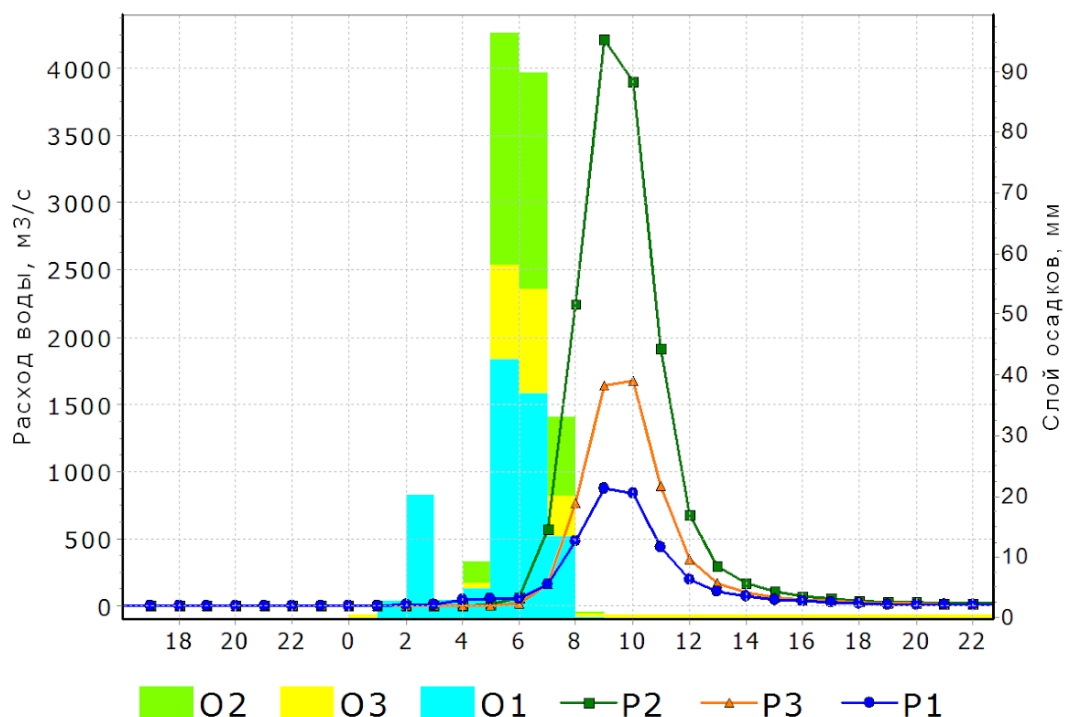


Рис. 3. Результаты моделирования выдающегося паводка на р.Туапсе - 1 августа 1991 г.; О и Р 1, 2, 3 - рассчитанные слои осадков и гидрографы паводкового стока для вариантов расчета 1-3 (расчетный шаг 1 час)

Таблица 2. Рассчитанные и наблюдаемые величины расходов воды и слоев стока катастрофических паводков в бассейне р.Туапсе.

Дата	Рассчитанный					Наблюдаемый			
	Q1h	Qd	Pd	Hd	M	Qa	Qd	Hd	M
01.08.1991 (1 вариант)	890 390* 180^	182	155	45	2.54 3.55* 3.07^	2300 870* 1475^	635	156	6.55 7.91* 25.2^
01.08.1991 (2 вариант)	4200 1470* 820^	600	242	148	12.0 13.4* 14.0^				
01.08.1991 (3 вариант)	1680 380* 590^	250	180	62	4.79 3.46* 10.1^				
17.06.2005	1316	191	206 (17-18.06)	82 (17-18.06)	3.75	-	-	-	-
16.10.2010	375	113	72	33	1.07	1630	579	142	4.64

*р. Туапсе выше устья р. Пшенахо (створ 2 Рис. 1), р. Пшенахо выше с. Анастасиевка (створ 3 Рис. 1). Q1h - 1-часовой расход воды, $\text{м}^3 \text{с}^{-1}$; Qd - суточный расход воды, $\text{м}^3 \text{с}^{-1}$; Pd - суточный слой выпавших осадков, мм; Hd - суточный слой стока, мм; M - модуль стока срочного расхода воды, $\text{м}^3 \text{км}^{-2} \text{с}^{-1}$; Qa - срочный расход воды, $\text{м}^3 \text{с}^{-1}$

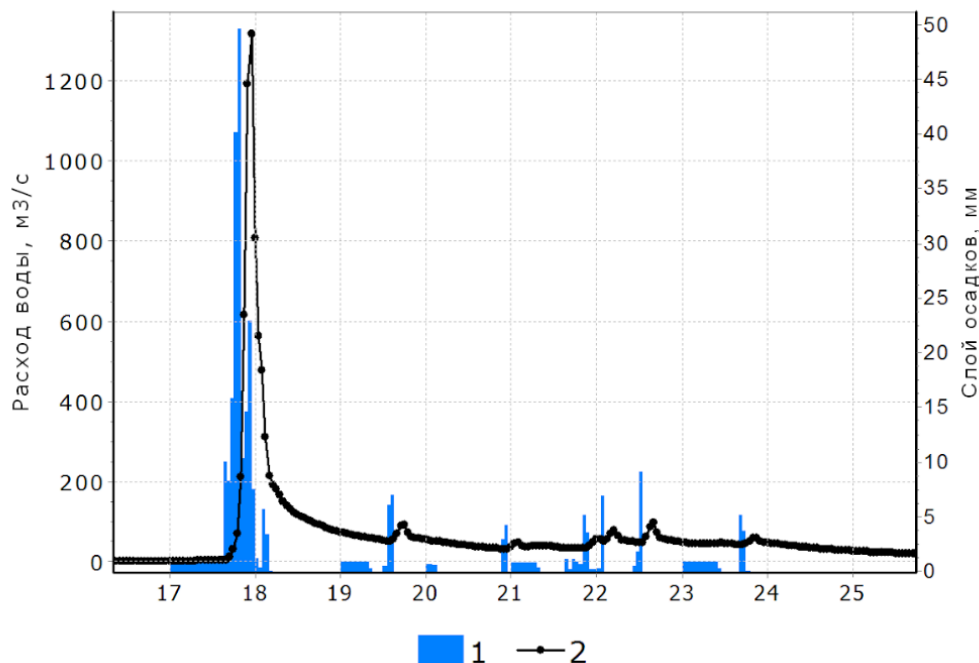


Рис. 4. Результаты моделирования выдающегося паводка на р.Туапсе - 16-23 июля 2005 г. 1 – 1-часовые осадки (мм), 2 – рассчитанный 1-часовой гидрограф стока ($\text{м}^3 \text{с}^{-1}$)

2010 год. 15-18 октября 2010 г. в Краснодарском крае произошло крупное наводнение, вызванное мощными проливными дождями и подъемом уровня рек Черноморского побережья. Особенно пострадал Туапсинский район, где было введено чрезвычайное положение. Сумма ущерба, по оценкам местных властей, составила около 2,5 млрд. рублей [Информационное..., 1994].

Для моделирования стока в этот период использовались метеоданные суточного разрешения, так как данных pluviографа для этих станций не оказалось.

16 октября на станциях Туапсе и Горный выпали 93.3 и 43.9 мм осадков соответственно. По данным [10] рост уровня воды начался в 23 часа 15 октября, а максимальные значения были достигнуты уже к 2-3 часам ночи 16 октября. Таким образом, можно предположить, что осадки выпали в течение нескольких часов. Был сформирован паводок, близкий по значениям к событию 1991 года. Наблюдаемые суточный и срочный расходы воды составили 579 (слой 142 мм) и $1630 \text{ м}^3 \text{с}^{-1}$ соответственно [Автоматизированная...].

По данным [Панов и др., 2012] значительные разрушения и подтопления домов начались гораздо раньше паводка на реках и были вызваны сильным склоновым стоком, сформированным ливнем очень высокой интенсивности. Склоновый сток способствовал сносу деревьев и кустарников в русла рек, в свою очередь карчеход вызвал заторные явления перед мостовыми переходами [Технический..., 2011].

Расчет расхода паводка 16 октября 2010 г. на р. Туапсе проведен на основе суточных данных об осадках на метеорологических станциях Туапсе и Горный, но продолжительность их выпадения принята равной два часа со средней интенсивностью 0.4 и 0.2 мм мин⁻¹.

Средний по водосбору рассчитанный слой осадков составил 56 мм. Рассчитанные срочный и суточный расходы воды достигли 375 и $113 \text{ м}^3 \text{с}^{-1}$ (таблица 2, рис. 5). Слой стока за сутки составил 28 мм, из них 8 мм – поверхностный. Таким образом, 16 октября наблюдаемый слой стока превысил слой осадков в два раза. На рис. 6 представлен график сравнения суточных рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока. В период с января по май, рассчитанные и наблюдаемые величины совпадают удовлетворительно



как по амплитуде, так и по фазе. Начиная с паводка 15-16 октября, наблюдаемые величины в разы превышают рассчитанные. В целом за период с 1 октября по 31 декабря в бассейне р. Туапсе по расчетам выпали 531 мм осадков, наблюдаемый и рассчитанные слои стока за тот же период составили 1698 и 380 мм соответственно (рис. 6). Очевидно, что наблюдаемые расходы воды, начиная с периода начала паводка 15-16 октября 2010 года, значительно завышены. Скорее всего, это касается и величины срочного расхода за этот год.

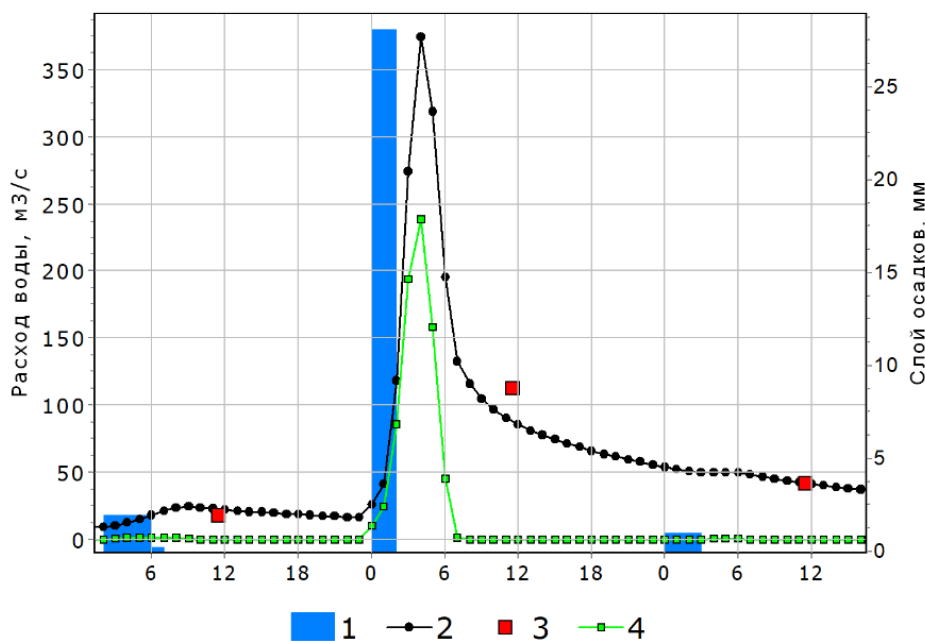


Рис. 5. Результаты моделирования выдающегося паводка на р.Туапсе - 16 октября 2010 г; 1 – 1-часовые осадки (мм), 2 – рассчитанный 1-часовой гидрограф стока ($\text{м}^3 \text{с}^{-1}$), 3 - рассчитанный суточный гидрограф стока ($\text{м}^3 \text{с}^{-1}$), 4 - гидрограф поверхностного стока ($\text{м}^3 \text{с}^{-1}$)

Обсуждение

В России при определении параметров расчетного паводка предпочтение отдается вероятностным методам [СП 33-101-2003]. В последние десятилетия в стране произошло значительное сокращение гидрометеорологической сети. Например, на Черноморском побережье Кавказа от Новороссийска до Сочи в 1985 году действовали 18 гидрологических постов, а в 2015 году их осталось только 11. При этом ряды наблюдений за стоком в последние годы часто отрывочны. Так, для р. Туапсе отсутствуют данные за 1992-1993, 1997-2008, 2011-2012 гг. Одновременно отмечается значительное увеличение максимальных расходов воды, достигающее 1.5-2.0 раз, на всех реках региона по сравнению с периодом до 1971 года [Панов и др., 2012].

Активное развитие региона требует адекватных методов оценки гидрологических характеристик стока при проектировании сооружений на реках. Возможность использования традиционных методов (например, [СП 33-101-2003]), основанных на подборе реки-аналога и экстраполяции данных наблюдений, становится неочевидной – данные наблюдений не охватывают всего спектра гидрометеорологических и физико-географических условий и их изменений.

В ряде стран, прежде всего в США, используются методы моделирования вероятного (возможного) максимального паводка с учетом как метеорологических факторов, так и состояния водосбора (например, степень увлажнения в предшествующий паводку период).



В РФ одним из препятствий к использованию гидрологических моделей в задачах расчета инженерных характеристик стока является общепринятое в среде проектировщиков мнение о том, что гидрологические модели не приспособлены к расчету срочных расходов из-за слишком продолжительного расчетного шага (обычно, сутки).

Результаты исследования на примере р. Туапсе опровергают данное мнение и показывают, что гидрологическая модель «Гидрограф», при наличии метеорологических данных детального разрешения (например, данных pluviографов), может использоваться в задаче оценки срочных расходов воды на малых водосборах в случае отсутствия наблюдений (2005 год), или уточнения их величин, когда опубликованные данные о расходах носят неопределенный характер (случай 2010 года). Применение методов моделирования позволяет также проводить численные эксперименты с входными метеорологическими данными в условиях их недостаточности (пример 1991 года).

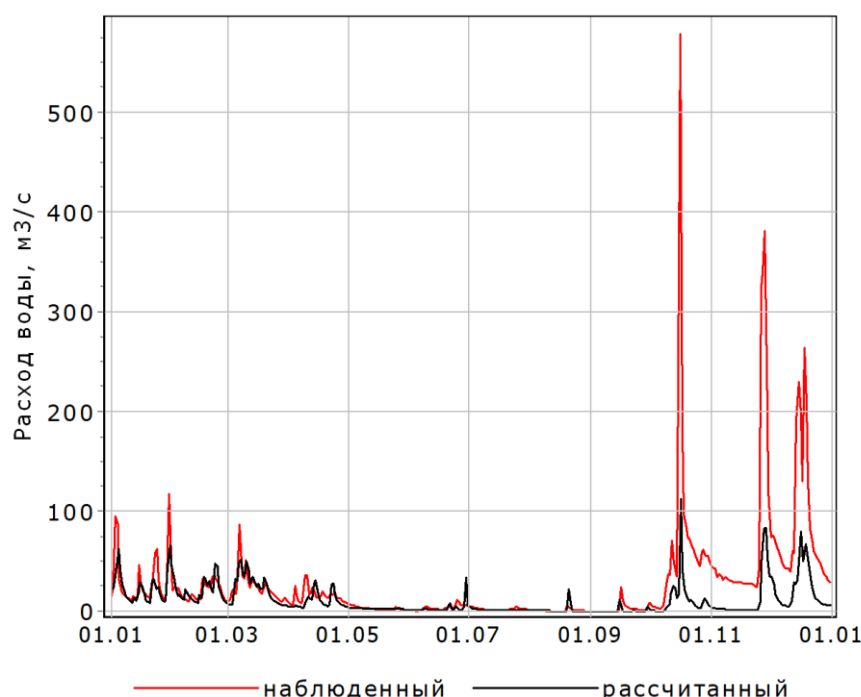


Рис. 6. Рассчитанный и наблюдаемый суточный гидрограф стока на реке Туапсе ($\text{м}^3/\text{с}$), 2010.

Заключение

Целью исследования является оценка применимости гидрологической модели «Гидрограф» для расчета срочных максимальных расходов воды в бассейнах малых рек Черноморского побережья Кавказа на примере р. Туапсе. В рамках исследования были решены следующие задачи:

1. Выполнена схематизация водосбора р. Туапсе и систематизированы параметры гидрологической модели Гидрограф для его основных ландшафтов.
2. Проведено непрерывное моделирование процессов формирования стока в бассейне р. Туапсе с суточным шагом за период с 1966 по 2013 гг. Получены суточные гидрографы стока и распределение элементов водного баланса. Медианное значение критерия эффективности Нэша-Сатклиффа при моделировании с расчетным шагом



сутки составило 0.60 для периода продолжительностью 32 года, что позволило оценить полученные результаты как удовлетворительные.

3. Оцифрованы данные pluвиографов для двух метеорологических станций в пределах бассейна р. Туапсе – г. Туапсе и Горный за период с 1980 по 2011 годы.

4. Рассчитаны максимальные срочные расходы воды в бассейне р. Туапсе для трех катастрофических паводков (1991, 2005, 2010) с использованием данных pluвиографов.

5. Проведены численные эксперименты, в которых использовались дополнительные сведения об осадках, вызвавших катастрофический паводок 1 августа 1991 года. Так сумма суточных осадков на метеостанции Горный отличается в два раза (или на 150 мм) согласно разным источникам.

6. Оценены величины срочных и суточных расходов для паводка в июне 2005 года, когда наблюдения за стоком на р. Туапсе не проводились.

Результаты моделирования паводка в октябре 2010 года показали недостоверность опубликованных данных о срочном и суточных расходах. Невязка водного баланса за период 1.10 - 31.12.2010 составила около 1000 мм.

В целом, результаты работы подтверждают принципиальную возможность применения метода детерминированного гидрологического моделирования для расчета срочных максимальных расходов воды в бассейнах малых рек Черноморского побережья Кавказа. Новизна предлагаемого подхода заключается в учете основных процессов формирования стока и создании методики расчета и прогноза возможных изменений экстремальных характеристик водного режима для исследуемого региона, в том числе и для неизученных бассейнов.

На настоящий момент ограниченность данных об осадках не позволяет использовать методы моделирования для массовых расчетов рядов срочных расходов воды, однако имеющиеся в наличии данные pluвиографов чрезвычайно полезны для анализа факторов формирования катастрофических паводков и совершенствования методов математического моделирования. В будущем, при переходе на оснащение метеорологических станций автоматическими приборами (как уже произошло в Приморском крае), возможности методов моделирования могут быть расширены.

Проект выполнен при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ, проект № 16-05-00989.

Список литературы

- Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) <https://gmvo.skniivh.ru>
- Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Колтерманн П.К., Торопов П.А., Школьный Д.И., Белякова П.А. (2016). Наводнения на Черноморском побережье Краснодарского края. – Водные ресурсы, 43(1): 3-17. doi: 10.7868/S032105961601003X.
- Асарин А.Е., Жиркевич А.Н. (2012). О необходимости разработки методики расчета вероятного максимального паводка для инженерно-гидрологических расчетов в России. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. Екатеринбург: РосНИИВХ, 4: 53-64.
- Базелюк А.А., Лурье П.М. (2014). Катастрофические паводки и наводнения на юге России: Причины возникновения и оценка последствий. Сб. тр. Третьей конф. «Речной сток: пространственно-временная изменчивость и опасные гидрологические явления». Москва: Ин-т водных проблем РАН, 44-60.
- Белякова П.А. (2015). Паводковый сток Российских рек Черноморского побережья Кавказа: Дисс. канд. геогр. наук. Москва: МГУ, 217 с.
- Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. (2015). Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани. Тр. Гидрометеорологического науч. исс. центра. Спец. вып. 356. 247 с.
- 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 <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных>.



- Виноградов Ю. Б., Виноградова Т.А., Журавлев С.А., Журавлева А.Д. (2014). Математическое моделирование гидрографов стока с неизученных бассейнов рек полуострова Ямал. Вестник СПбГУ. 7: Геология. География. 3: 71-81.
- Виноградов Ю.Б. (1988). Математическое моделирование процессов формирования стока (опыт критического анализа). Л.: Гидрометеиздат, 312 с.
- Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. (2010). Математическое моделирование в гидрологии. М.: Изд. Центр «Академия», 297 с.
- Информационное агентство России. <http://tass.ru/info/2071994>, дата обращения 06.04.2018
- Колтерманн К.П., Добролюбов С.А., Алексеевский Н.И. (ред.) (2012). Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей.
- Мельникова Т.Н. (2006). Максимальный сток дождевых паводков рек Северо-Западного Кавказа. Вестник Адыгейского гос. уни-та. 2: 237-240.
- Метеорологический ежемесячник. (1964 – 1983), I-XIII, т. 13. Гидрометеиздат. Ростов-на-Дону.
- Панов В.Д. Базелюк А.А., Лурье П.М. (2012). Реки Черноморского побережья Кавказа: гидрография и режим стока. Ростов-на-Дону: Донской издательский дом. 605 с.
- Секурова З.А. (2014). Характеристики дождевого стока с поверхности Черноморской территории Северо-Западного Кавказа: дис. канд.тех. наук. Санкт-Петербург.: СПбГАСУ, 188 с.
- СП 33-101-2003 (2004). Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России. 73 с.
- Технический отчет ГУ «КЦГМС» (2011). Об уникальных опасных явлениях 15-16 октября 2010 г на территории Краснодарского края, выразившихся в выпадении очень сильных дождей, сильных ливней и в прохождении катастрофических паводков на Черноморском побережье и в предгорьях Туапсинского и Апшеронского районов. Краснодар. 198 с.
- Ткаченко Ю.Ю., Волосухин В.А. (2013). Прогнозирование параметров паводков на реках Краснодарского края. Гидротехника. №4. с. 16-20.
- Шныпарков А.Л., Колтерманн П.К., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Перов В.Ф. (2013). Селевой риск на Черноморском побережье Кавказа. Геориск, 4: 20-25
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles. J. Hydrol. 10(3): 282–290.
- Semenova O., Lebedeva L., Vinogradov Yu. (2013). Simulation of subsurface heat and water dynamics, and runoff generation in mountainous permafrost conditions, in the Upper Kolyma River basin, Russia. Hydrogeology Journal, 21(1): 107-119. doi:10.1007/s10040-012-0936-1
- Vinogradov Y.B., Semenova O.M. Vinogradova T.A. (2011). An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system. Hydrological Processes, 25: 1055-1073. doi: 10.1002/hyp.7901