

Том XII | 3/2018  
Vol. XII

GeoRisk

ISSN 1997-8669 (Print)  
ISSN 2587-8220 (Online)

# ГеоРиск



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:



Саморегулируемая организация



5-я конференция «Селевые потоки: катастрофы, риск, прогноз, защита»: международный форум в Грузии и перспективы сотрудничества  
**ЧЕРНОМОРЕЦ С.С.**

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

6

Гидравлический расчет противоселевого сооружения с донной решеткой для гашения кинетической энергии несвязного селевого потока с целью трансформации его в обыкновенный наносонесущий поток

**НАТИШВИЛИ О.Г.**

Национальная академия наук Грузии

**ГАВАРДАШВИЛИ Г.В.**

Институт водного хозяйства им. Ц. Мирцхулава Грузинского технического университета

10

Концепция проектируемого мониторинга селевой опасности в Иле Алатау

**МЕДЕУ А.Р., БЛАГОВЕЩЕНСКИЙ В.П., РАНОВА С.У., СТЕПАНОВ Б.С.,**

Институт географии Министерства образования и науки Республики Казахстан

**АСКАРОВА М.А.**

Казахский национальный университет им. Аль-Фараби

16

Особенности формирования селей и селевая опасность Тункинских гольцов

(Республика Бурятия, Россия)

**РЫБЧЕНКО А.А., КАДЕТОВА А.В., КОЗЫРЕВА Е.А.**

Институт земной коры СО РАН

24

Моделирование катастрофических паводков в бассейне р. Туапсе

**МАКАРЬЕВА О.М.**

Институт мерзлотоведения им. М.П. Мельникова СО РАН, Санкт-Петербургский государственный университет

**ВИНОГРАДОВА Т.А.**

Санкт-Петербургский государственный университет, ООО «НПО «Гидротехпроект»»

**НЕСТЕРОВА Н.В.**

Санкт-Петербургский государственный университет, Государственный гидрологический институт

**ВИНОГРАДОВ А.Ю., БЕЛЬДИМАН И.Н.**

ООО «НПО «Гидротехпроект»»

**КОЛУПАЕВА А.Д.**

Санкт-Петербургский государственный университет

34

Дождевые сели 4 сентября 2017 г. в северной части острова Парамушир, Курильские острова

**КОТЕНКО Т.А., КОТЕНКО Л.В.**

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

46

Прорывы ледниковых и подледниковых озер в районе холмов Ларсеманн (Восточная Антарктида) в 2017–2018 гг.

**ПОПОВ С.В.**

АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция», Санкт-Петербургский государственный университет

**БОРОНИНА А.С., ПРЯХИНА Г.В., ГРИГОРЬЕВА С.Д., СУХАНОВА А.А., ТЮРИН С.В.**

Санкт-Петербургский государственный университет

56

Ледниковые озера Иле (Заилийского) Алатау: состояние, современные изменения, вероятные риски

**КАПИЦА В.П., УСМАНОВА З.С., СЕВЕРСКИЙ И.В., БЛАГОВЕЩЕНСКИЙ В.П., КАСАТКИН Н.Е.**

Институт географии Министерства образования и науки Республики Казахстан

**ШАХГЕДАНОВА М.В.**

Университет г. Реддинг

68

Селевые потоки 14–15 августа 2017 г. в бассейне р. Герхожан-Су (Центральный Кавказ): условия и причины формирования, динамика, последствия

**ДОКУКИН М.Д., БЕККИЕВ М.Ю., КАЛОВ Р.Х., ХАДЖИЕВ М.М.**

Высокогорный геофизический институт

**БОГАЧЕНКО Е.М.**

Кабардино-Балкарский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды — филиал Северо-Кавказского УГМС

**САВЕРНЮК Е.А.**

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

82

Защита от селевых потоков на о. Сахалин

**КАЗАКОВА Е.Н., КАЗАКОВ Н.А.**

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, научно-исследовательский центр «Геодинамика»

96

Фото на обложке: Селевый взрыв в верховьях р. Арзыл-Су (Кавказ). Фото с квадрокоптера. © С.С. Черногорца, 23.08.2018 г.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ПАВОДКОВ В БАССЕЙНЕ р. ТУАПСЕ

УДК 556.5



## МАКАРЬЕВА О.М.\*

Институт мерзлотоведения им. М.П. Мельникова СО РАН,  
г. Якутск, Россия; Санкт-Петербургский государственный  
университет, г. Санкт-Петербург, Россия,  
omakarjeva@gmail.com

Адреса: ул. Мерзлотная, д. 36, г. Якутск, 677010, Россия;  
Университетская наб., д. 7–9, г. Санкт-Петербург, 199034,  
Россия

## ВИНОГРАДОВА Т.А.

Санкт-Петербургский государственный университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия; ООО «НПО «Гидротехпроект»»,  
г. Санкт-Петербург, Россия, vinograd1950@mail.ru

Адрес: 14-ая линия В.О., д. 97, г. Санкт-Петербург, 199178,  
Россия

## НЕСТЕРОВА Н.В.

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия;  
Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия,  
nnesterova1994@gmail.com

Адрес: 2-ая линия В.О., д. 23, г. Санкт-Петербург, 199053, Россия

## ВИНОГРАДОВ А.Ю.

ООО «НПО «Гидротехпроект»», г. Санкт-Петербург, Россия, gd@npoftp.ru

## БЕЛЬДИМАН И.Н.

ООО «НПО «Гидротехпроект»», г. Санкт-Петербург, Россия, irinabeldiman@gmail.com

## КОЛУПАЕВА А.Д.

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

**Аннотация:** целью исследования является оценка потенциальной возможности применения 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 четырех основных ландшафтов, а также проведено моделирование процессов формирования стока с суточным шагом за период с 1966 по 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 об осадках, полученные по pluviографам двух метеорологических станций «Горный» и «Туапсе» в пределах исследуемого бассейна за период с 1980 по 2011 гг., использованы для моделирования максимальных срочных расходов воды трех выдающихся паводков (1991, 2005, 2010 гг.). Проведены численные эксперименты с данными о пространственном распределении осадков для расчета срочного расхода катастрофического паводка 1 августа 1991 г. Оценены величины срочных и суточных расходов для паводка в июне 2005 г., когда наблюдения за стоком на р. Туапсе не проводились. Результаты расчета элементов водного баланса показали, что возможны невязки в опубликованных данных срочных и суточных расходов, а также всего периода наблюдений с 15 октября по 31 декабря 2010 г. Невязка водного баланса за период 1.10–31.12.2010 г. составила около 1 000 мм. Результаты работы подтверждают 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.

**Ключевые слова:** модель «Гидрограф»; срочный максимальный расход воды; данные pluвиографа; река Туапсе; оценка параметров; катастрофические паводки; ливневые осадки

**Ссылка для цитирования:** Макарьева О.М., Виноградова Т.А., Нестерова Н.В., Виноградов А.Ю., Бельдиман И.Н., Колупаева А.Д., 2018. Моделирование катастрофических паводков в бассейне р. Туапсе. Геориск, Том XII, № 3, с. 34–45.

# MODELING OF CATASTROPHIC FLOODS IN THE TUAPSE RIVER BASIN

## OLGA M. MAKARIEVA\*

Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russia; Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia, omakarieva@gmail.com  
Addresses: Bld. 36, Merzlotnaya St., 677010, Yakutsk, Russia; Bld. 7–9, Universitetskaya Emb., 199034, Saint-Petersburg, Russia

## TATIANA A. VINOGRADOVA

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia; "Gidrotehproekt" LLC, Saint-Petersburg, Russia, vinograd1950@mail.ru  
Address: Bld. 97, 14th line of Vasilyevsky Island, 199178, Saint-Petersburg, Russia

## NATALIIA V. NESTEROVA

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia; State Hydrological Institute, Saint-Petersburg, Russia, nnerova1994@gmail.com  
Address: Bld. 23, 2nd line of Vasilyevsky Island, 199053, Saint-Petersburg, Russia

## ALEXEI Yu. VINOGRADOV

"Gidrotehproekt" LLC, Saint-Petersburg, Russia, gd@npogtp.ru

## IRINA N. BELDIMAN

"Gidrotehproekt" LLC, Saint-Petersburg, Russia, irinabeldiman@gmail.com

## ALEXANDRA D. KOLUPAEVA

Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia, alya.kolupaeva.97@mail.ru

**Abstract:** the aim of the study is to evaluate the applicability of the hydrological model "Hydrograph" for estimation of instant maximum water discharge at the small river basins of the Caucasus Black Sea coast 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 evaluating 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.

**Key words:** "Hydrograph" model; instant maximum discharge; pluviograph data; the Tuapse River; parametrization; catastrophic floods; storm rainfall

**For citation:** Makarieva O.M., Vinogradova T.A., Nesterova N.V., Vinogradov A.Yu., Beldiman I.N., Kolupaeva A.D., 2018. Modeling of catastrophic floods in the Tuapse River basin. Georisk, Vol. XII, No. 3, pp. 34–45.

## Введение

Бассейны малых рек побережья Черного моря являются одним из паводкоопасных регионов России. Катастрофические ливни, приводящие к экстремальным паводкам, очень локальны, синхронность 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 [1].

Большое количество работ посвящено катастрофическим паводкам и наводнениям в районе исследования [2, 3, 9, 14 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 и краткосрочному прогнози-

рованию паводкового стока [4, 6, 15]. В [7] 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 [12]. В таких случаях величина максимального расхода, определенная по меткам высоких вод, имеет неоднозначный характер.

Целью данного исследования является оценка потенциальной возможности применения метода детерминированного гидрологического моделирования для: а) расчета срочных максимальных расходов воды при отсутствии наблюдений за стоком и б) уточнения

их величин при приблизительных 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 бассейна р. Туапсе, расчеты стока на суточном интервале за продолжительный период (48 лет) и оценка эффективности моделирования, сбор и систематизация данных pluвиографов ближайших к водосбору метеорологических станций, расчеты срочных (1-часовых) расходов катастрофических паводков (1991, 2005, 2010 гг.) 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 р. Туапсе —

г. Туапсе (код гидрологического поста 82013, площадь 351 км<sup>2</sup>), расположенный на Черноморском побережье Северного Кавказа. Климат района исследования влажный субтропический. На метеорологической станции «Туапсе» (2 м н.у.м., 1966–2014 гг.) средняя годовая температура воздуха достигает 13,9°C, годовое количество осадков — 1 436 мм, те же величины для станции «Горный» (325 м н.у.м.) составляют 10,1 и 1 720 мм соответственно. Основная доля осадков выпадает в зимний период. Среднегодовое количество стока р. Туапсе достигает 1 200 мм. Максимальный срочный расход был «зафиксирован» в 1991 г. и составил 2 300 м<sup>3</sup>/с.

Природные условия территории типичны для лесостепной зоны предгорий Главного Кавказского хребта. Средняя высота водосбора составляет 365 м, максимальная и минимальная — 1 425 (г. Лысая) и 18 м соответственно. 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 [12].

#### Гидрологическая модель «Гидрограф»

В исследовании была использована детерминированная гидрологическая модель «Гидрограф». Она представляет собой математическую систему с распределенными параметрами, описывающую процессы формирования стока в бассейнах с различными физико-географическими характеристиками [8, 19]. Модель зарекомендовала себя работоспособным инструментом исследования и прогноза гидрологических процессов в различных условиях формирования стока [11, 18]. 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

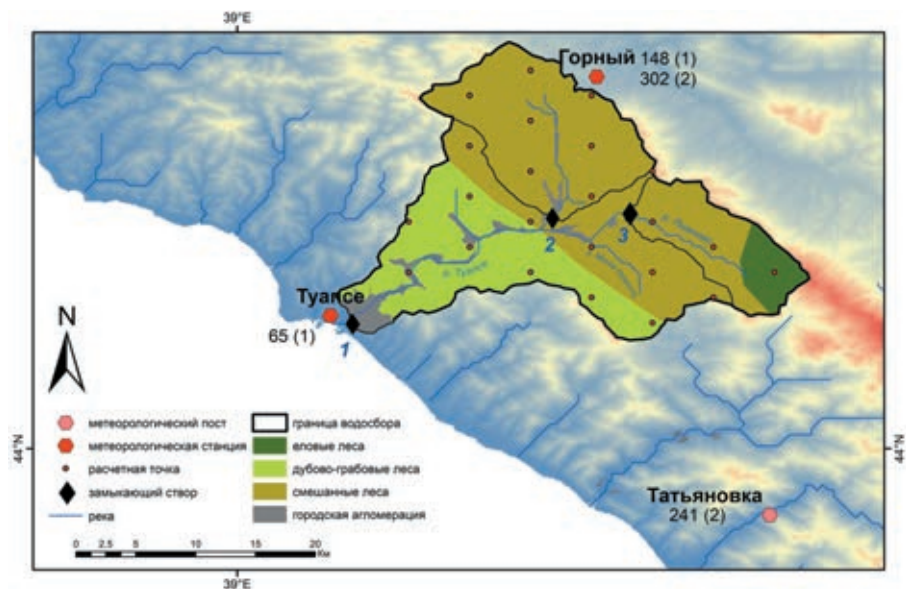


Рис. 1. Схема бассейна р. Туапсе и распределение стокоформирующих комплексов. **Обозначения:** 1 — р. Туапсе — г. Туапсе; 2 — р. Туапсе — выше устья р. Пшенахо; 3 — р. Пшенахо — выше с. Анастасиевка. Около метеостанций указано количество осадков (мм), выпавших в паводок 1991 г. по данным (1) — метеорологических ежемесячников<sup>1</sup>; (2) — В.Д. Панова и др. [12]

Fig. 1. Scheme of the Tuapse River basin and distribution of runoff formation complexes / Runoff gauges. **Designations:** 1 — Tuapse Rver — Tuapse city; 2 — Tuapse River — above the Pshenakho River mouth; 3 — Pshenakho River — above Anastasievka village. The numbers next to meteorological stations (red hexagons) indicate the amount of precipitation (mm) during the flood of 1991, according to (1) — meteorological monthly reports<sup>1</sup>; (2) — V.D. Panov et al. [12]

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. Для расчетов ис-

пользована комплексная программа распределенной гидрологической модели «Гидрограф», разработанная О.М. Макарьевой [13].

#### 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)<sup>2</sup>: смешанные, дубово-грабовые, еловые леса, а также городские агломерации (см. рис. 1).

Для каждого СФК были оценены параметры растительности, склонов, подземного питания, а также на основе информации о типах почв [22] и их свойствах<sup>3</sup> разработаны характерные почвенные профили. Каждый профиль разбит

<sup>1</sup> Метеорологический ежемесячник. I–XIII, 1964–1983, Том 13. Гидрометеоздат, Ростов-на-Дону.

<sup>2</sup> Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А., 2010. Математическое моделирование в гидрологии. Издательский Центр «Академия», Москва.

<sup>3</sup> Дрыгина Т.Ф. (ред.), 1967. Справочник агрогидрологических свойств почв Северного Кавказа, Волгоградской и Астраханской областей. Гидрометеорологическое издательство, Ленинград.

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 почвы; коэффициент фильтрации, являющийся мерой водопроницаемости почвенного профиля. Численные эксперименты показали, что наиболее чувствительным параметром при учете формирования паводков является коэффициент фильтрации. Принятые значения колеблются 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 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 н.у.м.) и «Туапсе» (2 м н.у.м.) (см. рис. 1).

При интерполяции осадков из метеорологических станций в РТ применялся метод нормирования суточных сумм осадков по их годовой средне-многолетней величине. Предварительное назначение годовых норм осадков для всех РТ проводилось на основе выявленных локальных зависимостей осадков от высоты местности. Для построения этих зависимостей 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<sup>1</sup>. Для исследуемого водосбора градиент увеличения осадков принят равным 120 мм на 100 м. При интерполяции температуры воздуха из метеорологических станций в РТ учитывался высотный градиент, в среднем составивший  $-0,9^{\circ}\text{C}$  на 100 м высоты. Годовой ход градиента был рассчитан

на основе данных станций «Горный» и «Туапсе».

Следуя подходам Ю.Б. Виноградова [8, 19], при использовании модели «Гидрограф» ряды данных по стоку не делились на два периода — калибровки и верификации. Вместо этого вся возможная информация использовалась для корректировки параметров модели, определенных априори.

### **Результаты моделирования с суточным расчетным шагом**

Моделирование процессов формирования стока с суточным шагом было проведено для бассейна р. Туапсе за период 1966–2013 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-Сатклифа (NS) [17]. 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 табл. 1.

Несовпадение рассчитанных и наблюдаемых среднесуточных слоев стока составляет 38 мм или чуть более 3%. Осадки и испарение в бассейне р. Туапсе по результатам расчета составляют 1 805 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. Среднее квадратическое отклонение (СКО) за весь период расчета составило  $12,6 \text{ м}^3/\text{с}$ . На основе анализа критерия NS и сравнения рассчитанных и наблюдаемых элементов водного баланса результаты моделирования стока в бассейне р. Туапсе могут быть признаны удовлетворительными.

### **Моделирование выдающихся паводков на р. Туапсе с использованием данных плевниографов. Численные эксперименты с осадками**

В настоящее время в РФ наблюдения за осадками производятся раз в 12 ч [21], 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 плевниографами, а сведения об отдельных выдающихся ливнях публикуются в метеорологических ежемесячниках.

Авторами были собраны данные плевниографов для метеорологических станций «Горный» и «Туапсе» за период 1980–1992 и 1997–2011<sup>1</sup> гг. Данные были осреднены до равномерного часового интервала и использованы для моделирования отдельных выдающихся паводков на р. Туапсе в 1991, 2005 и 2010 гг.

**1991 год.** Исторический паводок на р. Туапсе был зафиксирован 1 августа 1991 г., когда среднесуточный и срочный расход воды были оценены по меткам высоких вод как  $635$  и  $2\,300 \text{ м}^3/\text{с}$  соответственно [10]. В результате выпадения ливневых осадков и выхода смерчей на берег резко повысился уровень воды и сформировался катастрофический селевой поток [16].

По данным плевниографов на станциях «Горный» и «Туапсе», общее количество осадков за период с 1:40 ночи до 8:30 утра 1 августа 1991 г. составило 148,1 и 65 мм соответственно. Средние и максимальные значения интенсивности осадков достигли соответственно 0,62 и 1,47 мм/мин для станции «Горный» и 0,17 и 1,17 мм/мин для станции «Туапсе».

Было проведено моделирование паводка с использованием данных плевниографов (табл. 2, 1 вариант). 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).

Максимальный рассчитанный 1-часовой расход воды составил  $890 \text{ м}^3/\text{с}$ , суточный —  $182 \text{ м}^3/\text{с}$ , рассчитанный слой стока за сутки — 45 мм. 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 безжелевого периода потери на насыщение почвы влагой составили 82 мм, суммарные потери на испарение с почвенного покрова и емкости перехвата растительностью — 7 мм, приток в подземные и почвенные стоковые элементы — около 18 мм (см. табл. 2). Модельные экспе-



**Рис. 2.** Суточные рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока р. Туапсе — г. Туапсе, м<sup>3</sup>/с: а — NS = 0,78 (высокий), б — NS = 0,20 (низкий), с — NS = 0,60 (удовлетворительный)

**Fig. 2.** Daily simulated and observed runoff hydrographs of the Tuapse River — Tuapse city, m<sup>3</sup>/s: a — NS = 0.78 (high), b — NS = 0.20 (low), c — NS = 0.60 (satisfactory)

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

В.Д. Панов и др. [12] приводят дополнительную информацию о паводке 1991 г. Во-первых, они сообщают, что основной его объем был сформирован левыми притоками — рр. Пшенахо и Ма-

лое Псеушко (см. рис. 1). Во-вторых, в [14] приводятся суммы осадков 1 августа для метеорологического поста «Татьяновка» (96 м) — 241 мм — и на водном посту с. Горное на р. Пшиш —

Таблица 1

Table 1

### Значения элементов водного баланса и статистических критериев для бассейна р. Туапсе — г. Туапсе

#### The values of water balance elements and statistical criteria for the Tuapse River basin — Tuapse city

Период сравнения (наличия данных о стоке)	$Y_0$ , мм	$Y_s$ , мм	$P$ , мм	$E$ , мм	NS (av/med)	NS (max, год)	NS (min, год)	СКО, м <sup>3</sup> /с
1966–1991, 1994–1996, 2009–2010, 2013	1 200	1 238	1 805	567	0,57/0,60	0,78 (1981)	0,20 (1972)	12,6

Примечание:  $Y_0$  и  $Y_s$  — наблюдаемый и рассчитанный среднегодовой 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; СКО — среднеквадратическое отклонение рассчитанных гидрографов от наблюдаемых, м<sup>3</sup>/с

Таблица 2

Table 2

### Расчитанные и наблюдаемые величины расходов воды и слоев стока катастрофических паводков в бассейне р. Туапсе

#### Simulated and observed values of water discharge and runoff of catastrophic floods at the Tuapse River basin

Дата	Расчитанный					Наблюдаемый			
	$Q_{1h}$ , м <sup>3</sup> /с	$Q_d$ , м <sup>3</sup> /с	$P_d$ , мм	$H_d$ , мм	$M$ , м <sup>3</sup> ·км <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>	$Q_a$ , м <sup>3</sup> /с	$Q_d$ , м <sup>3</sup> /с	$H_d$ , мм	$M$ , м <sup>3</sup> ·км <sup>-2</sup> ·с <sup>-1</sup>
01.08.1991 (1 вариант)	890 390* 180**	182	155	45	2,54 3,55* 3,07**	2 300 870* 1475**	635	156	6,55 7,91* 25,2**
01.08.1991 (2 вариант)	4 200 1 470* 820**	600	242	148	12,0 13,4* 14,0**			—	
01.08.1991 (3 вариант)	1 680 380* 590**	250	180	62	4,79 3,46* 10,1**			—	
17.06.2005	1 316	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

Примечание 1: цифры со \* — р. Туапсе выше устья р. Пшенахо (створ 2 на рис. 1), цифры с \*\* — р. Пшенахо выше с. Анастасиевка (створ 3 на рис. 1).

Примечание 2:  $Q_{1h}$  — 1-часовой расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $Q_d$  — суточный расход воды, м<sup>3</sup>/с;  $P_d$  — суточный слой выпавших осадков, мм;  $H_d$  — суточный слой стока, мм;  $M$  — модуль стока срочного расхода воды, м<sup>3</sup>·км<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>;  $Q_a$  — срочный расход воды, м<sup>3</sup>/с.

302 мм (см. 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 около 100%.

Авторами были проведены два дополнительных варианта расчета с использованием данных об осадках, описанных выше. Во втором варианте использовали данные поста «Татьяновка» (241 мм) и с. Горное (302 мм). В третьем варианте дополнительно к исходным данным плювиографов была использована сумма осадков на посту «Татьяновка». Рассчитанные слои осад-

ков и стока за паводок составили 242/148 для второго и 180/62 мм для третьего вариантов. Срочный и суточный расходы р. Туапсе в створе г. Туапсе составили 4 200/600 и 1 680/250 м<sup>3</sup>/с соответственно. В [14] 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 км<sup>2</sup>. 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.

Таким образом, третий вариант распределения осадков позволяет воспроизводить максимальные расходы, близкие к значениям, определенным по меткам высоких вод.

**2005 год.** 17–18 июня 2005 г. на метеостанции «Горный» было зафиксировано рекордное количество осадков — за 13 ч выпало 291 мм осадков, средняя и максимальная интенсивность их выпадения составили 0,36 и 1,90 мм/мин соответственно. В те же сутки в течение 6,5 ч 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 метео-



станций «Горный» и «Туапсе» соответственно.

В период 1997–2008 г. 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 г. был зафиксирован сход селевого потока на железнодорожное полотно в районе разезда Водопадный Северо-Кавказской железной дороги на участке Туапсе — Сочи, который был обусловлен выпадением в предшествующий период большого количества осадков [9].

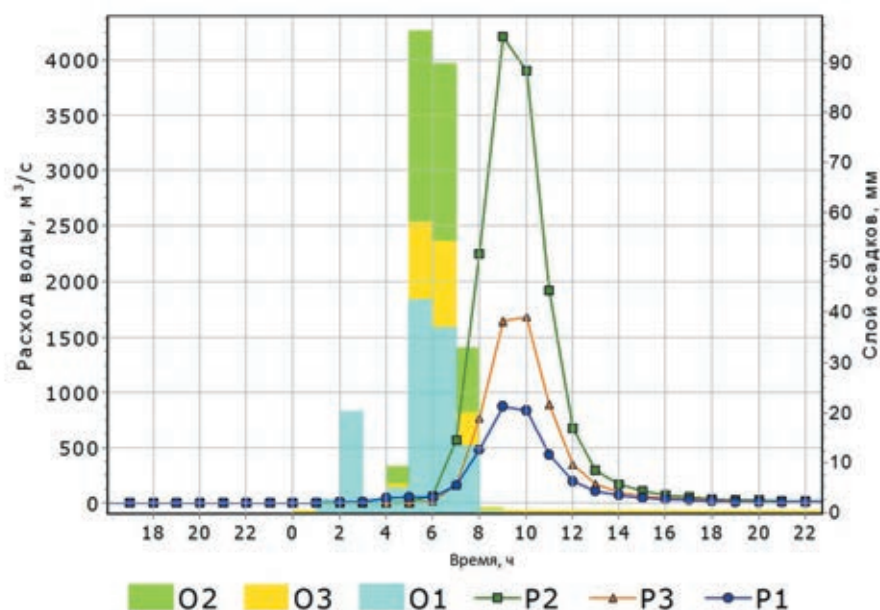
На рис. 4 приводится график рассчитанного гидрографа стока, элементов водного баланса и переменных состояний бассейна р. Туапсе за период 16–21 июня 2005 г. Максимальные рассчитанные 1-часовой и суточный расходы воды 17 июня 2005 г. достигли соответственно 1 316 и 191 м<sup>3</sup>/с. Согласно результатам моделирования, количество выпавших на водосбор осадков в период 17–18 июня составило 206 мм, слой стока — 82 мм (см. табл. 2).

**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 [23].

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

16 октября на станциях «Туапсе» и «Горный» выпало 93,3 и 43,9 мм осадков соответственно. По данным [12], подъем 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 г. Наблюденные суточный и срочный расходы воды составили 579 (слой 142 мм) и 1 630 м<sup>3</sup>/с соответственно [20].

По данным [14], значительные разрушения и подтопления домов начались гораздо раньше паводка на реках и были вызваны сильным склоновым стоком, сформированным ливнем очень



**Рис. 3.** Результаты моделирования выдающегося паводка на р. Туапсе, 31 июля — 1 августа 1991 г.; O и P 1, 2, 3 — рассчитанные слои осадков и гидрографы паводкового стока соответственно для вариантов расчета 1–3 (расчетный шаг — 1 ч)

**Fig. 3.** Results of modeling the outstanding high water on the Tuapse River, July 31 — August 1, 1991; O and P 1, 2, 3 — simulated precipitations and floodwater hydrographs correspondently for 1–3 simulation variants (calculated step — 1 hour)

высокой интенсивности. Склоновый сток способствовал сносу деревьев и кустарников в русла рек, в свою очередь карчеход вызвал заторные явления перед мостовыми переходами [24].

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.

Средний по водосбору рассчитанный слой осадков составил 56 мм. Рассчитанные срочный и суточный расходы воды достигли 375 и 113 м<sup>3</sup>/с соответственно (см. табл. 2, рис. 5). Слой стока за сутки составил 28 мм, из них 8 мм — поверхностный. Таким образом, 16 октября наблюденный слой стока превысил слой осадков в два раза. На рис. 6 представлен график сравнения суточных рассчитанных и наблюденных гидрографов стока. В период с января по май рассчитанные и наблюденные величины совпадают удовлетворительно как по амплитуде, так и по фазе. Начиная с паводка 15–16 октября, наблюденные величины в разы превышают рассчитанные. В целом за период с 1 октября по 31 декабря в бассейне р. Туапсе по расчетам выпало 531 мм осадков, наблюденный и рассчитанные слои стока за тот же период составили 1 698 и

380 мм соответственно (см. рис. 6). Значительное расхождение элементов водного баланса, а также факт отсутствия наблюдений за стоком в течение 2011 и 2012 гг., позволяют высказать предположение о возможной невязке в опубликованных данных срочных и суточных расходов, а также всего периода наблюдений с 15 октября по 31 декабря 2010 г.

## Обсуждение

### Результаты моделирования

В работе [6] приводятся результаты моделирования суточных гидрографов стока бассейна р. Туапсе за теплый период на основе использования модели паводочного цикла Flood Cycle Model. Периоды калибровки и верификации модели в случае [6] составили 7–8 лет, а величина NS для этих периодов указана как 0,72 и 0,59. Критерии NS для суточных расходов, полученные в настоящем исследовании, одного порядка с результатами [6].

В работах [5, 15] оцениваются результаты моделирования для 8 речных створов Черноморского побережья на основе использования региональной модели формирования стока, по словам самих авторов [15] представляющей набор регрессионных уравнений, параметры которых не имеют четкой физической интерпретации, или модель «черного ящи-

ка». Регрессионная зависимость имеет 13 параметров. В [15] наборы параметров определены для каждой половины месяца, то есть для всего года требуются 24 набора по 13 параметров. Значение СКО, полученное в настоящем исследовании для р. Туапсе, составило 12,6; в [15] — 14,2 м<sup>3</sup>/с.

В целом результаты моделирования по любым моделям в рассматриваемом регионе критически зависят от количества осадкомерных пунктов [5]. Однако не подтверждаются выводы [15] о преимуществах использования «простых» моделей перед сложными.

Достоинствами представленных результатов являются:

1) Продолжительный непрерывный период моделирования (в случае р. Туапсе — 48 лет, оценка критерия NS — 32 года) в течение круглого года без разделения на сезоны с единым набором параметров.

2) Учет пространственного распределения входных метеорологических данных.

3) Априорная оценка параметров. Разбор гидрометеорологической ситуации 1991 г. показал несоответствие водного баланса катастрофического паводка по данным пунктов наблюдений сети Росгидромет, когда слой стока практически в два раза превысил слой наблюдаемых осадков. Не очевидно, как рассматриваются такие случаи и их влияние на величины параметров при калибровке параметров модели FCM [5] и регрессионных зависимостей [15].

#### Методы расчета срочных расходов воды при инженерном проектировании

В России при определении параметров расчетного паводка предпочтение отдается вероятностным методам. В последние десятилетия в стране произошло значительное сокращение гидрометеорологической сети. Например, на Черноморском побережье Кавказа от Новороссийска до Сочи в 1985 г. действовали 18 гидрологических постов, а в 2015 г. 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 г. [9].

Активное развитие региона требует адекватных методов оценки гидрологи-

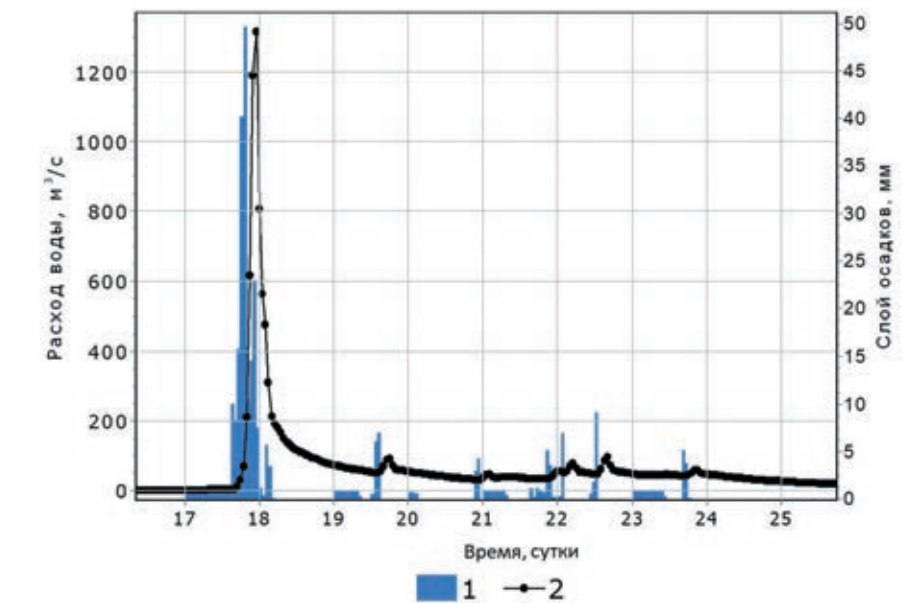


Рис. 4. Результаты моделирования выдающегося паводка на р. Туапсе 16–23 июня 2005 г. Обозначения: 1 — 1-часовые осадки (мм), 2 — рассчитанный 1-часовой гидрограф стока (м<sup>3</sup>/с)

Fig. 4. Results of modeling of the outstanding high water on the Tuapse River — June 16–23, 2005. Designations: 1 — 1-hour precipitations (mm), 2 — simulated 1-hour flow hydrograph (m<sup>3</sup>/s)

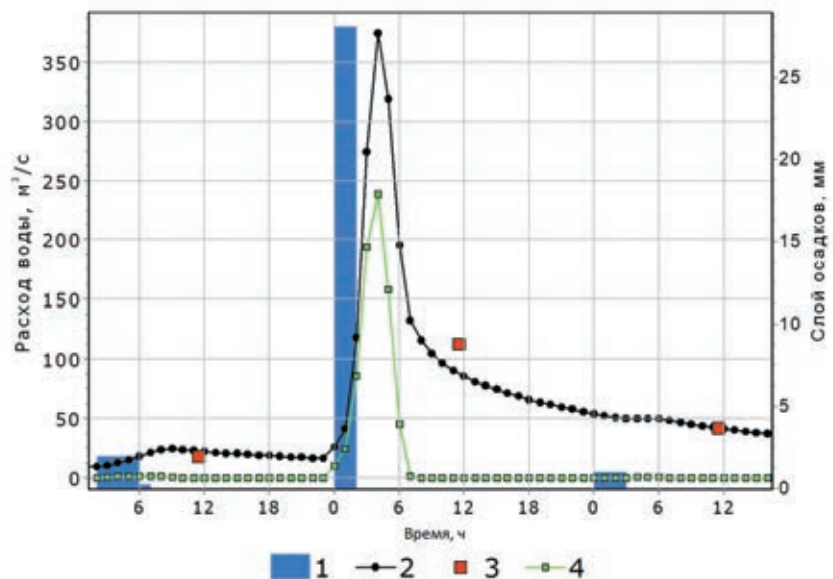


Рис. 5. Результаты моделирования выдающегося паводка на р. Туапсе, 15–16 октября 2010 г. Обозначения: 1 — 1-часовые осадки (мм), 2 — 1-часовой гидрограф стока (м<sup>3</sup>/с), 3 — суточный гидрограф стока (м<sup>3</sup>/с), 4 — гидрограф поверхностного стока (м<sup>3</sup>/с)

Fig. 5. Results of modeling of the outstanding flood on the Tuapse River, October 15–16, 2010. Designations: 1 — 1-hour precipitation (mm), 2 — simulated 1-hour runoff hydrograph (m<sup>3</sup>/s), 3 — simulated daily runoff hydrograph (m<sup>3</sup>/s), 4 — surface runoff hydrograph (m<sup>3</sup>/s)

ческих характеристик стока при проектировании сооружений на реках. Возможность использования традиционных методов (например, СП 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик»), основанных на подборе реки-аналога и экстраполяции данных наблюдений, становит-

ся 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 метеорологи-

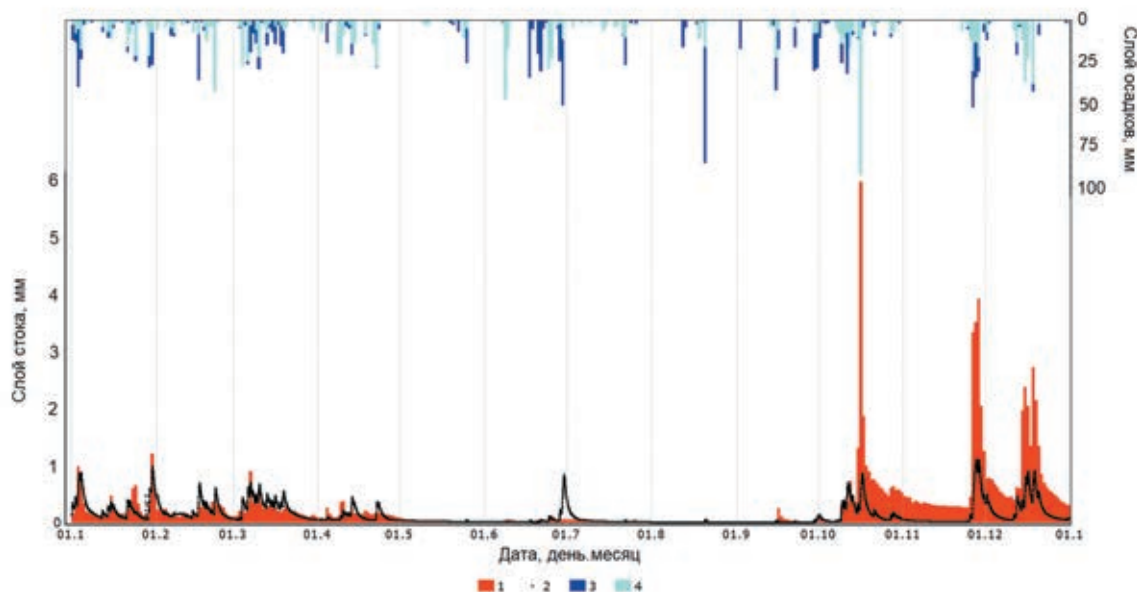


Рис. 6. Осадки и сток в бассейне р. Туапсе (мм), 2010 г. Обозначения: 1 — наблюдаемый сток, 2 — рассчитанный сток, 3 — осадки на метеостанции «Горный», 4 — осадки на метеостанции «Туапсе»

Fig. 6. Precipitation and streamflow in the Tuapse River basin (mm), 2010. Designations: 1 — observed streamflow, 2 — simulated streamflow, 3 — precipitation at meteorological station “Gorny”, 4 — precipitation at meteorological station “Tuapse”

ческих факторов, так и состояния водосбора (например, степень увлажнения в предшествующий паводку период).

В Российской Федерации 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 г.) или уточнения их величин, когда опубликованные данные о расходах могут носить неопределенный характер (случай 2010 г.). Применение методов моделирования позволяет также проводить численные эксперименты с входными метеорологическими данными в условиях их недостаточности (пример 1991 г.).

## Заключение

Для оценки потенциальной возможности применения гидрологической

модели «Гидрограф» для расчета срочных максимальных расходов воды в бассейнах малых рек Черноморского побережья Кавказа на примере р. Туапсе были решены следующие задачи:

1. Выполнена схематизация водосбора р. Туапсе, и выделены четыре стокоформирующих комплекса, систематизированы параметры гидрологической модели «Гидрограф» для основных ландшафтов.
2. Проведено 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. Сравнение с результатами, полученными с использованием модели паводочного цикла Flood Cycle Model [5] и региональной модели формирования стока [14], показало, что использование сложной распределенной гидрологической модели типа «Гидрограф» возможно и целесообразно в условиях водосборов Черноморского побережья. Критерии результатов расчета в большей степени зависят от входной информации об осадках, а их

значения для модели «Гидрограф» не ниже, чем для остальных моделей.

3. Рассчитаны 1-часовые расходы воды в бассейне р. Туапсе для трех катастрофических паводков (1991, 2005, 2010 гг.) с использованием данных pluвиографов, двух метеорологических станций в пределах рассматриваемого бассейна.
4. Проведены численные эксперименты, в которых использовались дополнительные сведения об осадках, вызвавших катастрофический паводок 1 августа 1991 г. Так, сумма суточных осадков на метеостанции «Горный» отличается в два раза (или на 150 мм) согласно разным источникам.
5. Оценены величины срочных и суточных расходов для паводка в июне 2005 г., когда наблюдения за стоком на р. Туапсе не проводились.


Результаты расчета элементов водного баланса показали, что возможны невязки в опубликованных данных срочных и суточных расходов, а также всего периода наблюдений с 15 октября по 31 декабря 2010 г. Невязка водного баланса за период 1.10–31.12.2010 г. составила около 1 000 мм.

В целом, результаты работы подтверждают потенциальную 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. Авторы благодарны трем рецензентам за конструктивные замечания.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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, Том 43, № 1, с. 3–17, <https://doi: 10.7868/S032105961601003X>.
2. 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, № 4, с. 53–64.
3. Базелюк А.А., Лурье П.М., 2014. Катастрофические паводки и наводнения на юге России: Причины возникновения и оценка последствий. Речной сток: пространственно-временная изменчивость и опасные гидрологические явления, Сборник трудов Третьей конференции, Москва, 2014, с. 44–60.
4. Белякова П.А., Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М., 2013. Прогноз максимального стока рек Черноморского побережья Кавказа. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, № 6, с. 4–16.
5. Белякова П.А., Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М., 2013. Краткосрочное прогнозирование стока рек Черноморского побережья Кавказа. Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации, № 349, с. 122–141.
6. Белякова П.А., Гарцман Б.И., 2017. О перспективах прогнозирования паводков на реках западного Кавказа с использованием воднобалансовой модели FCM. Экологические последствия чрезвычайных ситуаций: актуальные проблемы и пути их решения, Материалы XXII Международной научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, Ногинск, 2017, с. 53–57.
7. 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. Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра, спецвыпуск, № 356.
8. Виноградов Ю.Б., 1988. Математическое моделирование процессов формирования стока (опыт критического анализа). Гидрометеоздат, Ленинград.
9. Колтерманн П.К., Добролюбов С.А., Алексеевский Н.И., 2012. Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей, под ред. П.К. Колтерманна. Триумф, Москва.
10. Мельникова Т.Н., 2006. Максимальный сток дождевых паводков рек Северо-Западного Кавказа. Вестник Адыгейского государственного университета, № 2, с. 237–240.
11. Нестерова Н.В., Макарьева О.М., Виноградова Т.А., Лебедева Л.С., 2018. Моделирование процессов формирования стока зоны Байкало-Амурской магистрали на основе данных полигона «Могот». Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, № 1, с. 18–36.
12. Панов В.Д., Базелюк А.А., Лурье П.М., 2012. Реки Черноморского побережья Кавказа: гидрография и режим стока. Донской издательский дом, Ростов-на-Дону.
13. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018619084 «Комплексная программа распределенной гидрологической модели “Гидрограф”», правообладатель О.М. Макарьева, дата регистрации 30.07.2018.
14. Ткаченко Ю.Ю., Волосухин В.А., 2013. Прогнозирование параметров паводков на реках Краснодарского края. Гидротехника, № 4, с. 16–20.
15. Христофоров А.В., Юмина Н.М., Белякова П.А., 2015. Прогноз паводкового стока рек Черноморского побережья Кавказа с заблаговременностью одни сутки. Вестник Московского университета. Серия 5. География, № 3, с. 50–57.
16. Шньпарков А.Л., Колтерманн П.К., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Перов В.Ф., 2013. Селевой риск на Черноморском побережье Кавказа. Геориск, № 4, с. 20–25.
17. Nash J.E., Sutcliffe J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. Journal of Hydrology, Vol. 10, No. 3, pp. 282–290.
18. 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, Vol. 21, No. 1, pp. 107–119, <https://doi:10.1007/s10040-012-0936-1>.

19. Vinogradov Yu.B., Semenova O.M., Vinogradova T.A., 2011. An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system. *Hydrological Processes*, No. 25, pp. 1055–1073, <https://doi:10.1002/hyp.7901>.
20. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО), 2018. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 06.04.2018).
21. Бульгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М., 2014. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549, URL: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> (дата обращения: 06.04.2018).
22. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России, 2018. URL: <http://atlas.mcx.ru/materials/egrpr/content/3sem.html> (дата обращения: 06.04.2018)
23. Информационное агентство России, 2018. URL: <http://tass.ru/info/2071994> (дата обращения: 06.04.2018).
24. Информационное агентство России, 2015. Наводнения в Краснодарском крае с 2010 года: хронология. URL: <http://tass.ru/info/2071994> (дата обращения: 23.07.2018).

## REFERENCES

1. Alekseevsky N.I., Magritsky D.V., Koltermann P.K., Toropov P.A., Shkolny D.I., Belyakova P.A., 2016. Floods on the Black Sea coast of the Krasnodar Territory. *Water Resources*, Vol. 43, No. 1, pp. 3–17, <https://doi:10.7868/S032105961601003X>. (in Russian)
2. Asarin A.E., Zhirkevich A.N., 2012. On the need to develop a methodology for calculating the likely maximum flood for engineering and hydrological simulating in Russia. *Water sector of Russia: problems, technologies, management*, No. 4, pp. 53–64. (in Russian)
3. Bazeliuk A.A., Lurie P.M., 2014. Catastrophic floods and floods in the south of Russia: Causes of occurrence and impact assessment. *River runoff: spatio-temporal variability and dangerous hydrological phenomena*, Proceedings of the Third Conference, Moscow, 2014, pp. 44–60. (in Russian)
4. Belyakova P.A., Borsch S.V., Khristoforov A.V., Yumina N.M., 2013. Forecast of the maximum flow of rivers of the Black sea coast of the Caucasus. *Water sector of Russia: problems, technologies, management*, No. 6, pp. 4–16. (in Russian)
5. Belyakova P.A., Borsch S.V., Khristoforov A.V., Yumina N.M. 2013. Short-term forecasting of river flow on the Black sea coast of the Caucasus. *Proceedings of the Hydrometeorological research center of the Russian Federation*, No. 349, pp. 122–141. (in Russian)
6. Belyakova P.A., Gartsman B.I., 2017. On the prospects of flood forecasting on the rivers of the Western Caucasus using the FCM water balance model. *Ecological consequences of emergency situations: actual problems and ways of their solution*, Proceedings of the XXII International scientific-practical conference on the protection of population and territories from emergency situations, Noginsk, 2017, pp. 53–57. (in Russian)
7. Borshch S.V., Simonov Yu.A., Khristoforov A.V., 2015. Flood forecasting and early warning system for floods on the rivers of the Black Sea coast of the Caucasus and the Kuban basin. *Proceedings of the Hydrometeorological Research Center, special issue*, No. 356. (in Russian)
8. Vinogradov Yu.B., 1988. *Mathematical modeling of flow formation processes (experience of critical analysis)*. Gidrometeoizdat, Leningrad. (in Russian)
9. Koltermann P.K., Dobrolyubov S.A., Alekseevsky N.I., 2012. Natural and social risks in the coastal zone of the Black and Azov Seas, in P.K. Koltermann (ed.). *Triumph*, Moscow. (in Russian)
10. Melnikova T.N., 2006. The maximum runoff of rain floods in the rivers of the North-Western Caucasus. *Bulletin of the Adyge State University*, No. 2, pp. 237–240. (in Russian)
11. Nesterova N.V., Makarieva O.M., Vinogradova T.A., Lebedeva L.S., 2018. Modelling runoff formation processes at the BAM zone based on the data of the “Mogot” research site. *Water sector of Russia: problems, technologies, management*, No. 1, pp. 18–36. (in Russian)
12. Panov V.D., Bazelyuk A.A., Lurie P.M., 2012. *The rivers of the Black Sea coast of the Caucasus: hydrography and flow regime*. Donskoy Publishing House, Rostov-on-Don. (in Russian)
13. Certificate of state registration of the computer program No. 2018619084 “Complex program of the distributed hydrological model “Hydrograph”, right holder O.M. Makarieva, registration date 30.07.2018. (in Russian)
14. Tkachenko Yu.Yu., Volosukhin V.A., 2013. Forecasting of flood parameters on the rivers of the Krasnodar territory. *Hydrotechnics*, No. 4, pp. 16–20. (in Russian)
15. Khristoforov A.V., Yumina N.M. Belyakova P.A., 2015. Forecast of flood flow of rivers of the Black sea coast of the Caucasus in advance of one day. *Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography*, No. 3, pp. 50–57. (in Russian)
16. Shnyarkov A.L., Coltermann P.K., Seliverstov Yu.G., Sokratov S.A., Perov V.F., 2013. The mudflow risk on the Black Sea coast of the Caucasus. *Georisk*, No. 4, pp. 20–25. (in Russian)
17. Nash J.E., Sutcliffe J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10, No. 3, pp. 282–290.

18. 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*, Vol. 21, No. 1, pp. 107–119, <https://doi:10.1007/s10040-012-0936-1>.
19. Vinogradov Yu.B., Semenova O.M., Vinogradova T.A., 2011. An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system. *Hydrological Processes*, No. 25, pp. 1055–1073, <https://doi:10.1002/hyp.7901>.
20. Automated information system of state monitoring of water objects (AIS GMVO), 2018. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (accessed: 6 April 2018). (in Russian)
21. Bulygina O.N., Veselov V.M., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M., 2014. Description of an array of urgent data on the main meteorological parameters at Russian stations. Certificate of state registration of the database No. 2014620549, URL: [http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#description of the data array](http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#description%20of%20the%20data%20array) (accessed: 6 April 2018). (in Russian)
22. Unified state register of soil resources of Russia, 2018. URL: <http://atlas.mcx.ru/materials/egrpr/content/3sem.html> (accessed: 6 April 2018) (in Russian)
23. Information agency of Russia, 2018. URL: <http://tass.ru/info/2071994> (accessed: 6 April 2018). (in Russian)
24. Information Agency of Russia, 2015. Floods at the Krasnodar Territory since 2010: chronology. URL: <http://tass.ru/info/2071994> (accessed: 23 July 2013). (in Russian)

### Информация об авторах

#### МАКАРЬЕВА ОЛЬГА МИХАЙЛОВНА

Старший научный сотрудник лаборатории подземных вод и геохимии криолитозоны Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия; доцент кафедры гидрологии суши Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург, Россия;

#### ВИНОГРАДОВА ТАТЬЯНА АЛЕКСАНДРОВНА

Доцент кафедры гидрологии суши Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург, Россия; старший научный сотрудник ООО «НПО «Гидротехпроект»», к.г.н., г. Санкт-Петербург, Россия

#### НЕСТЕРОВА НАТАЛИЯ ВАДИМОВНА

Аспирант кафедры гидрологии суши Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета; младший научный сотрудник отдела экспериментальной гидрологии и моделирования гидрологических процессов Государственного гидрологического института, г. Санкт-Петербург, Россия

#### ВИНОГРАДОВ АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ

Генеральный директор ООО «НПО «Гидротехпроект»», д.т.н., г. Санкт-Петербург, Россия

#### БЕЛЬДИМАН ИРИНА НИКИТИЧНА

Ведущий инженер ООО «НПО «Гидротехпроект»», г. Санкт-Петербург, Россия

#### КОЛУПАЕВА АЛЕКСАНДРА ДМИТРИЕВНА

Студентка кафедры гидрологии суши Института наук о Земле Санкт-Петербургского государственного университета, г. Санкт-Петербург, Россия

### Information about the authors

#### OLGA M. MAKARIEVA

Senior research scientist of the Laboratory of the Permafrost Groundwater and Geochemistry, Melnikov Permafrost Institute, PhD (Candidate of Science in Technics), Yakutsk, Russia; associate professor of the Land Hydrology Department, Institute of Earth Sciences, Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

#### TATIANA A. VINOGRADOVA

Associate professor of the Land Hydrology Department, Institute of Earth Sciences, Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia; senior research scientist of the "Gidrotehproekt" LLC, PhD (Candidate of Science in Geography), Saint-Petersburg, Russia

#### NATALIIA V. NESTEROVA

Postgraduate student of the Land Hydrology Department, Institute of Earth Sciences, Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia; junior research scientist of the State Hydrological Institute, Saint-Petersburg, Russia

#### ALEXEI Yu. VINOGRADOV

General Director of the "Gidrotehproekt" LLC, DSc (Doctor of Science in Technics), Saint-Petersburg, Russia

#### IRINA N. BELDIMAN

Leading engineer of the "Gidrotehproekt" LLC, Saint-Petersburg, Russia

#### ALEXANDRA D. KOLUPAEVA

Student of the Land Hydrology Department, Institute of Earth Sciences, Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, Russia

[www.geomark.ru](http://www.geomark.ru)