

Расчет характеристик катастрофических паводков неизученной реки Цемес (г. Новороссийск, Черноморское побережье России) на основе гидрологической модели «Гидрограф»*

О. М. Макарьева^{1, 2}, Н. В. Нестерова^{2, 3}, Т. А. Виноградова^{2, 4},
И. Н. Бельдиман⁴, А. Д. Колупаева²

¹ Институт мерзлотоведения им. М. П. Мельникова СО РАН,
Российская Федерация, Республика Саха (Якутия), 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36

² Санкт-Петербургский государственный университет,
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

³ Государственный гидрологический институт,
Российская Федерация, 199053, Санкт-Петербург, 2-я линия В. О., 23

⁴ ООО «НПО «Гидротехпроект»»,
Российская Федерация, 199178, Санкт-Петербург, 14-я линия В. О., 97А

Для цитирования: Макарьева, О. М., Нестерова, Н. В., Виноградова, Т. А., Бельдиман, И. Н., Колупаева, А. Д. (2019). Расчет характеристик катастрофических паводков неизученной реки Цемес (г. Новороссийск, Черноморское побережье России) на основе гидрологической модели «Гидрограф». *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 64 (1), 24–43. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.102>

В статье рассматриваются примеры расчета гидрологических характеристик катастрофических паводков на неизученных реках Черноморского побережья России. Как альтернатива стандартным методам расчета предложен метод детерминированного моделирования гидрологических процессов. Для оценки максимальных расходов воды неизученной р. Цемес (г. Новороссийск) применена распределенная гидрологическая модель «Гидрограф». Проведено непрерывное моделирование стока на водосборе р. Цемес за период с 1977–2013 гг. с суточным разрешением, при этом использовался набор параметров модели, верифицированных на изученных водосборах. На основе детальных данных плювиограмм ливневых осадков на метеорологических станциях рассчитаны 1-часовые максимальные расходы воды трех катастрофических паводков на р. Цемес в 1988, 2002 и 2012 гг. и проведено их сравнение с характеристиками максимальных расходов воды, полученных на основе расчетов по стандартной методике СП-33-101-2003. Максимальный смоделированный расход воды паводка 2012 г. составил 361 м³/с и соответствует порядку значений максимального расхода воды 1 %-ной обеспеченности, рассчитанного по СП-33-101-2003. Однако максимальный расход воды, смоделированный на 20 июня 1988 г., составил 688 м³/с, что в 2 раза выше расхода воды 1 %-ной обеспеченности, полученного по методу предельной интенсивности. Анализ результатов моделирования показал, что максимальный расход воды зависит от состояния водосбора в момент выпадения осадков, а это в явном виде нельзя учесть при расчетах с применением вероятностных методов. Рассматривается возможность использования математического моделирования как основы метода расчета вероятного максимального

* Статья подготовлена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований РФФИ, проект № 16-05-00989.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2019

паводка, позволяющего учитывать сочетание самых неблагоприятных метеорологических и стокоформирующих факторов. В качестве перспектив дальнейшего развития методов расчета и прогноза стока отмечается важность разработки методов, основанных на комплексном использовании мезомасштабных атмосферных моделей и детерминированных гидрологических моделей. Разрабатываемые методы оценки характеристик повторяемости и высоты катастрофических паводков можно использовать для решения инженерно-технических задач в условиях изменения климата.

Ключевые слова: детерминированная гидрологическая модель *Гидрограф*, срочный максимальный расход воды, водосборы рек Черноморского побережья, река Цемес, оценка параметров, катастрофические паводки, ливневые осадки.

Введение

Территория Черноморского побережья России характеризуется повышенным риском возникновения опасных природных явлений, в первую очередь формированием катастрофических паводков, вызванных ливневыми осадками. В последние годы число и высота паводков возросли, наиболее значительными среди них оказались события 2002, 2010, 2012–2015 гг. (Воробьев и др., 2003; Панов и др., 2012; Колтерманн и др., 2012; Наводнения..., 2015; Лично приеду..., 2015).

Все наводнения были вызваны экстремальными осадками, сумма и интенсивность которых не наблюдались ранее. В работе (Meredith et al., 2015) на основе региональных моделей климата рассчитаны характеристики ливневых осадков, вызвавших катастрофическое наводнение в Крымске в 2012 г. Ее авторы сделали вывод о том, что основным фактором выпадения осадков в количестве, равном 5-месячной норме, стала температура воды поверхности Черного моря, повысившаяся за последние 30 лет на 2 °С. Более того, численные эксперименты показали, что эффект повышения температуры моря нелинеен и «осадки резко увеличиваются после определенного порога, который как раз был достигнут в начале XXI века» (Перегретое море, 2015).

Высокая плотность населения, интенсивное использование земель для ведения сельского хозяйства, развитая промышленность и инфраструктура региона, его туристическая привлекательность увеличивают риски материальных потерь и человеческих жертв в экстремальных ситуациях. Значительная часть ущерба от стихийных бедствий вызвана повреждением инфраструктуры — смывами участков дорог, гидротехнических сооружений, подтоплением жилых домов, что можно связать не только с неправильной эксплуатацией, но и с ошибками на этапе инженерно-гидрологических изысканий и проектирования (Макарьева и др., 2017).

Используемые в настоящее время методики для расчета срочных максимальных расходов воды в задачах инженерного проектирования основаны на статистической обработке исторических рядов гидрометеорологической информации. Отсутствия в этих рядах в историческом отрезке времени ливней с экстремальными характеристиками становится причиной недооценки рисков опасных гидрологических явлений.

Разработка и использование новых методов оценки гидрологических характеристик стока при проектировании гидротехнических сооружений на реках Черноморского побережья и других паводкоопасных регионов России является приоритетной задачей для исследователей.

В ряде зарубежных стран в качестве альтернативы вероятностным подходам используют метод вероятного максимального паводка (probable maximum flood, PMF) (Асарин и Жиркевич, 2012), суть которого в том, чтобы учесть сочетание самых неблагоприятных метеорологических и стокоформирующих факторов, которые могут привести к формированию максимально возможного расхода воды.

Хотя в действующих нормативных документах существует рекомендация в качестве расхода воды поверочного расчетного случая принимать расход воды, определенный по методике вероятного максимального паводка, в России не разработаны ни методические указания по определению параметров PMF, ни нормативы его применения (Асарин и Жиркевич, 2012).

Цель данной работы — исследовать применимость метода детерминированного моделирования в качестве инструмента для расчета максимально возможных характеристик стока рек Черноморского побережья России (на примере р. Цемес — г. Новороссийск).

В ходе работы были решены следующие задачи:

- 1) оценка параметров гидрологической модели «Гидрограф»;
- 2) верификация разработанного набора параметров модели на изученных водосборах;
- 3) детерминированное моделирование процессов формирования стока неизученного водосбора р. Цемес;
- 4) расчет и оценка характеристик катастрофических паводков 1988, 2002 и 2012 гг. с использованием данных плювиографов;
- 5) сравнение полученного максимального расхода воды с результатами расчета расхода воды 1%-ной обеспеченности согласно рекомендациям норматива (СП-33-101-2003, 2004).

1. Объекты исследования

В качестве объектов исследования выбраны четыре водосбора рек Черноморского побережья площадью от 51 до 265 км², из них три (рек Дюрсо, Адерба и Вулан) обеспечены наблюдениями за стоком воды и один водосбор — р. Цемес (г. Новороссийск) — не изучен (рис. 1, табл. 1).

Климат района влажный субтропический. На метеорологической станции Мархотский перевал (высота 430 м, ряд наблюдений — 1966–2014 гг.) средняя годовая температура воздуха составляет 9,2 °С, годовое количество осадков достигает 903 мм, те же параметры для станции Геленджик (4 м) составляют 13,1 °С и 754 мм. Территория исследования (см. рис. 1) покрыта лиственными лесами, преимущественно дубовыми, и степями. Выбранные реки имеют дождевой тип питания. Максимальный сток формируется при выпадении осадков высокой интенсивности.

2. Гидрологическая модель «Гидрограф»

В работе применялась распределенная детерминированная модель «Гидрограф» (Виноградов, 1988; Виноградов и Виноградова, 2010). В качестве входной информации в ней используются температура и влажность воздуха, осадки. Особенность модели состоит в том, что ее параметры назначаются априорно, а не путем



Рис. 1. Объекты исследования и распределение СФК

калибровки, и в ходе анализа результатов моделирования могут быть откорректированы.

Для оценки параметров в пределах исследуемых водосборов выделяются условно однородные ландшафты — так называемые СФК, по которым систематизируются параметры модели (Нестерова и др., 2018). Все эти водосборы были разделены на два СФК (Ландшафтная карта, 1980): 1) дубовые леса и 2) степи (см. рис. 1). Общая методика выделения СФК описана в работе (Виноградов и Виноградова, 2010). Примеры оценки параметров почвы и растительности СФК для исследуемого региона приведены в работе (Макарьева и др., 2018).

Для расчетов использована комплексная программа распределенной гидрологической модели «Гидрограф» (Макарьева, 2018).

3. Верификация модели «Гидрограф» на изученных водосборах

Для верификации модели «Гидрограф» проведено непрерывное моделирование процессов формирования стока с суточным интервалом для трех изученных створов на реках исследуемого района.

В качестве входной метеорологической информации задавались суточные данные по температуре, влажности воздуха и количеству выпавших осадков с пяти метеостанций исследуемого района:

- 1) Абрау-Дюрсо (93 м),
- 2) Геленджик (4 м),
- 3) Мархотский перевал (430 м),
- 4) Джубга (25 м),
- 5) Новороссийск (7 м).

Таблица 1. Средние значения статистических критериев рассчитанных и наблюдаемых рядов стока и элементов водного баланса для водосборов рек Дюрсо, Адерба, Вулан и Цемес

Код поста	Река — створ	S	Ha/Hm	Период	Qd	$\frac{Qu}{\text{год}}$	Qa	Yo	Ys	P	E	NS1	NS2 год
82003	Дюрсо — свх. Абрау-Дюрсо	51,9	211/531	1966–1977	24,3	$\frac{38,3}{1967}$	0,45	272	291	733	445	0,25	$\frac{0,79}{1966}$
82005	Адерба — пос. Светлый	59,7	380/745	1977–1997	63,0	$\frac{178}{1981}$	0,94	486	515	1081	565	0,30	$\frac{0,64}{1981}$
82010	Вулан — пос. Архипо-Осиповка	265	209/742	1977–2013	422	$\frac{1050}{1980}$	6,23	644	608	1149	543	0,36	$\frac{0,61}{1978}$
—	Цемес — г. Новороссийск	82,6	215/531	1977–2013	—	—	—	—	330	833	503	—	—

Примечание: S — площадь водосбора, км²; Ha и Hm — средняя и максимальная высота водосбора соответственно, м; Qd — максимальный суточный наблюдаемый расход воды, м³/с; Qu — максимальный срочный наблюдаемый расход воды, м³/с и год наблюдения; Qa — средний многолетний наблюдаемый расход воды, м³/с; Yo, Ys, P и E — средние многолетние значения элементов водного баланса: соответственно наблюдаемый и рассчитанный годовой слой стока, осадки, испарение, мм; NS1 и NS2 — медианные и максимальные значения коэффициента Нэша — Сатклифа.

При интерполяции осадков на горные склоны суточные суммы корректировались согласно высотному градиенту осадков. Для расчета градиента были использованы данные о средних многолетних годовых суммах осадков на метеорологических станциях и постах за исторический период наблюдений (Справочник..., 1966; Метеорологический ежегодник, 1964–1983). Принятый высотный градиент для района исследования составил 40 мм на 100 м.

Результатами моделирования стали гидрографы стока воды и значения элементов водного баланса — осадки и расход воды (рис. 2 и 3, табл. 1). Периоды расчета (см. табл. 1) для каждого водосбора определялись по наличию метеорологической и контрольной гидрологической информации.

Один из этапов детерминированного моделирования стока для неизученного водосбора (в данном случае р. Цемес) — оценка адекватности гидрологической модели на изученных водосборах, характеризующихся аналогичными условиями формирования стока. Трудность выполнения данного этапа в настоящем исследовании состоит в том, что изучаемые водосборы сильно различаются по соотношению элементов водного баланса. Например, на водосборе р. Дюрсо, расположенном ближе всех к водосбору р. Цемес, коэффициент стока составляет в среднем 0,37, в то время как для водосбора р. Адербы он равен 0,45, а для р. Вулан — 0,56. Таким образом, достаточно трудно оценить степень репрезентативности изученных бассейнов для водосбора р. Цемес.

Моделирование годового водного баланса дало удовлетворительные результаты. Для водосборов наблюдается несовпадение рассчитанных и наблюдаемых годовых слоев стока в пределах 19–36 мм, что составляет 6–7 % среднего многолетнего значения наблюдаемого стока. Согласно модельным расчетам, испарение на водосборах рек Адерба и Вулан в среднем составляет около 550 мм. На водосборе р. Дюрсо и осадки, и испарение значительно ниже — 733 и 445 мм соответственно.

Для оценки эффективности моделирования ряды рассчитанных расходов воды сравнивались с имеющимися данными наблюдений за стоком на основе критерия Нэша — Сатклиффа (NS) (Nash and Sutcliffe, 1970). Медианные значения NS для суточных расходов воды колеблются от 0,25 до 0,36. Максимальные значения NS в некоторые годы превышают 0,6–0,7, но в целом, если оценивать результаты моделирования по принятым в мировой практике стандартным критериям (например, изложенным в работе (Moriasi et al., 2007)), их следует признать неудовлетворительными. Однако при оценке результатов необходимо учитывать, что процессы формирования стока на каждом из водосборов горных рек Дюрсо, Адерба и Вулан моделировались с использованием входных метеорологических данных единственной метеостанции (разной для каждого водосбора). Эти метеостанции расположены не только за пределами водосбора, но и на значительно более низкой абсолютной высоте. Например, для горного водосбора р. Адербы, средняя высота которого — 340 м, использовались данные ближайшей метеостанции Геленджик, находящейся на абсолютной высоте 4 м. Нерепрезентативные данные об осадках частично обуславливают занижение рассчитанных максимальных расходов воды по сравнению с наблюдаемыми (рис. 2 и 3). Наличие данных хотя бы еще с одной метеорологической станции, расположенной в горной части водосборов, позволяет существенно повысить качество моделирования гидрографов стока в исследуемом

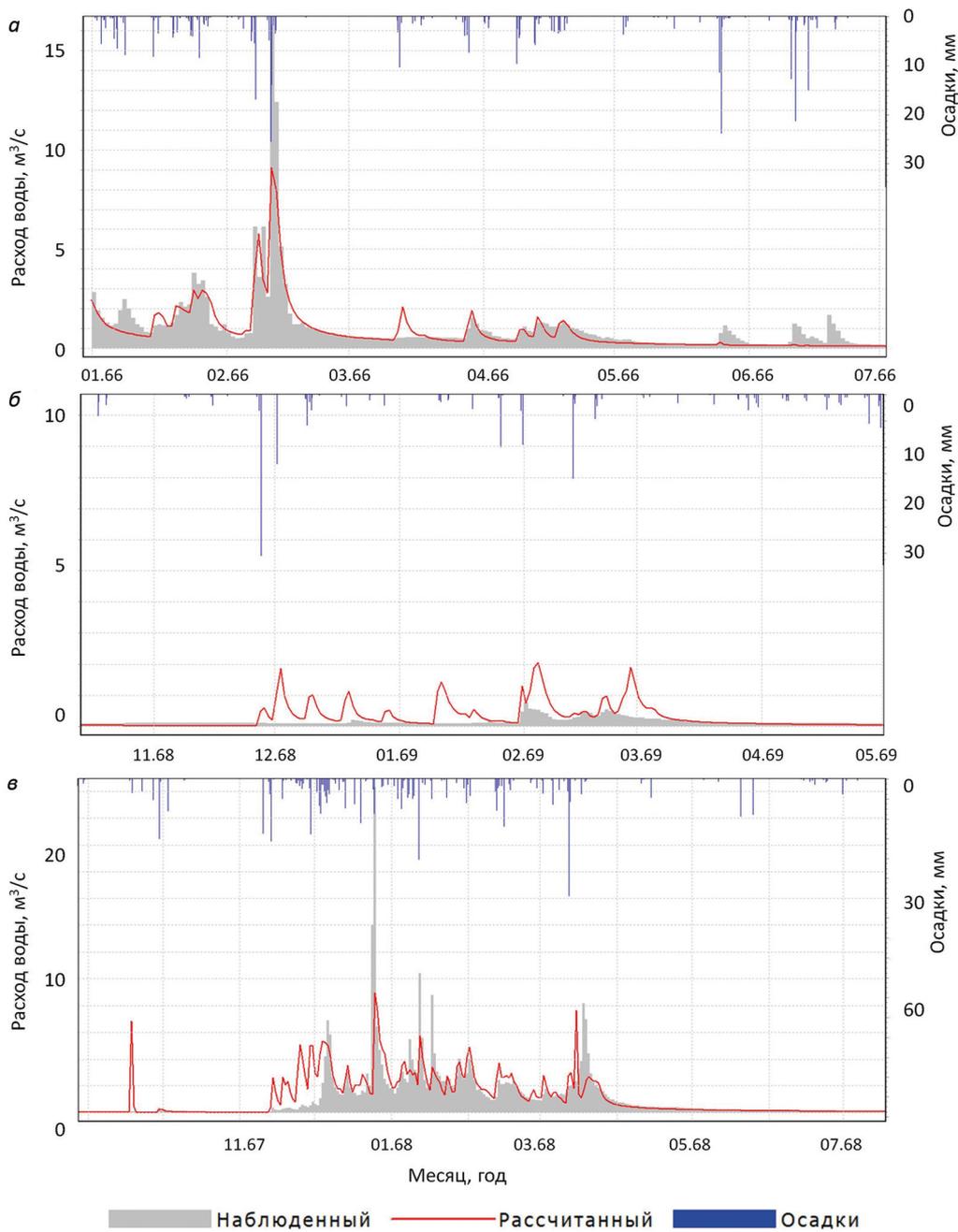


Рис. 2. Суточные рассчитанный и наблюдаемый гидрографы стока в створе р. Дюросо — свх. Абрау-Дюросо:

а—в — примеры соответственно для высокого, низкого и среднего значений NS

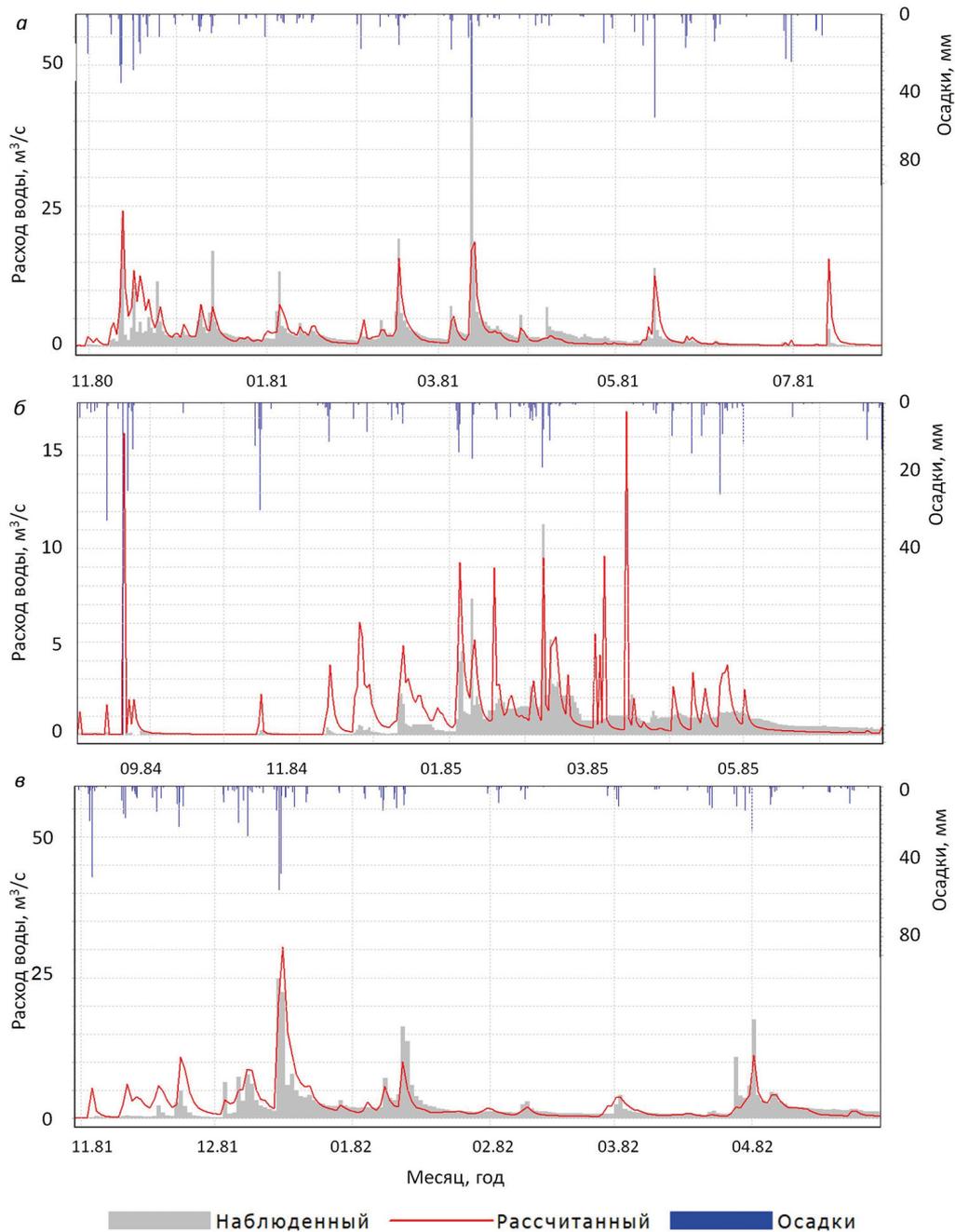


Рис. 3. Суточные рассчитанный и наблюдаемый гидрографы стока в створе р. Адерба — пос. Светлый:

а—в — примеры соответственно для высокого, низкого и среднего значения NS

районе. Так, для водосбора р. Туапсе, для которого при моделировании с суточным шагом использовались данные двух метеорологических станций (Туапсе и Горный), значения NS достигают 0,6 при применении моделей Flood Cycle Model (Белякова и Гарцман, 2017) и «Гидрограф» (Lebedeva et al., 2015; Макарьева и др., 2018).

Ливневые осадки, результатом которых становятся экстремальные паводки, выпадают очень локально, а сеть осадкомерных пунктов редка и в основном приурочена к населенным пунктам на побережье Черного моря России. Таким образом, водосборы малых горных рек исследуемого региона практически не освещены метеорологическими наблюдениями, данные которых необходимы и для калибровки простых сосредоточенных емкостных гидрологических моделей, и для верификации сложных распределенных детерминированных моделей формирования стока на основе использования стандартных критериев. Авторы исследования уверены, что выходом из сложившейся ситуации могут быть разработка и использование сложных распределенных гидрологических систем с априорной оценкой параметров и верификацией результатов расчета, основанной на понимании процессов, а не калибровке параметров моделей. В работе (Макарьева и др., 2018) на примере расчета характеристик катастрофических паводков для водосбора р. Туапсе показано, что сложные модели не уступают «простым» по качеству результатов расчета, а среди преимуществ указаны следующие важные свойства распределенных детерминированных моделей:

- 1) учет пространственного распределения осадков (что, например, может быть перспективным для сопряжения с распределенными климатическими моделями);
- 2) возможность численных экспериментов, обоснованных априорной оценкой параметров вместо калибровки.

Другие причины значительного расхождения рассчитанных и наблюдаемых гидрографов — это и несовершенство модели, и неопределенность значений ее параметров. В работе (Нестерова и др., 2018) показано, что специальные наблюдения на научно-исследовательских водосборах позволяют не только уверенно оценивать параметры, но и совершенствовать алгоритмы гидрологических моделей. В планах авторов настоящей статьи — дальнейшее совершенствование и верификация модели «Гидрограф» на объектах Европейской сети научно-исследовательских водосборов (Euro-Mediterranean Network of Experimental and Representative Basins — ERB)¹, расположенных в схожих с рассматриваемым регионом условиях.

4. Моделирование стока на водосборе неизученной р. Цемес (г. Новороссийск)

Непрерывное моделирование стока на водосборе р. Цемес с суточным расчетным шагом было проведено за период 1977–2013 гг. по данным метеорологической станции Новороссийск. В расчетах использовались наборы параметров гидрологической модели, оцененные и верифицированные на предыдущем этапе исследований. Рассчитанные значения элементов годового водного баланса за период моделирования составили: осадки — 833 мм, испарение — 503 мм, сток — 330 мм

¹ См. <http://erb-network.simdif.com> (дата обращения: 20.08.2019).

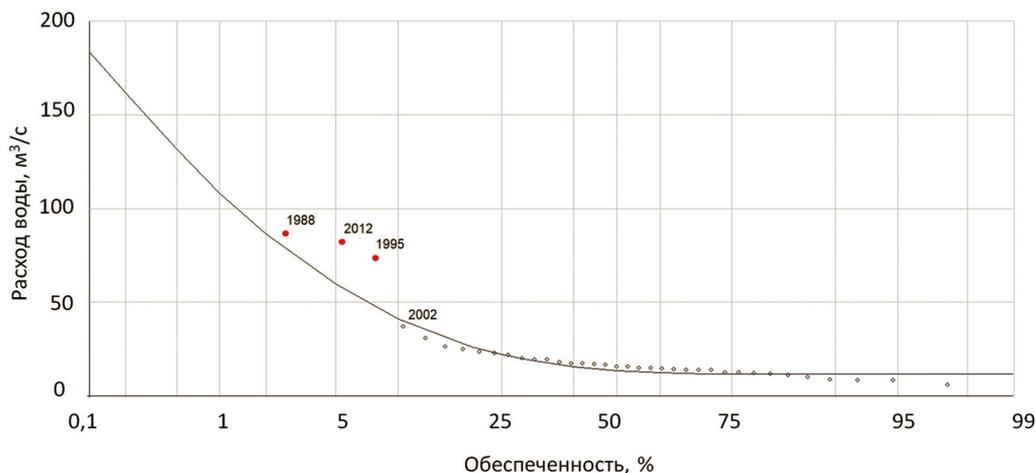


Рис. 4. Кривая обеспеченности рассчитанных максимальных суточных расходов воды в створе р. Цемес — г. Новороссийск (красные точки — значения при паводках 1988, 2012 и 1995 г.)

(см. табл. 1). Максимальный рассчитанный суточный расход воды достиг $86,4 \text{ м}^3/\text{с}$ в период катастрофического паводка 20 июня 1988 г. Паводок с суточным слоем стока $90,4 \text{ мм}$ был сформирован ливневыми осадками, сумма которых составила 188 мм . На рис. 4 приведена кривая вероятности суточных максимальных расходов воды р. Цемес, полученная на основе результатов моделирования (построение выполнено в программе HydroStatCalc-2010 (Рождественский и Лобанова, 2010)). Экстраполяция кривой позволяет оценить суточный расход воды 1 %-ной обеспеченности как $108 \text{ м}^3/\text{с}$, 0,1 %-ной обеспеченности — как $183 \text{ м}^3/\text{с}$.

Моделирование катастрофических паводков на водосборе р. Цемес

Для расчета максимальных срочных расходов воды на водосборе р. Цемес в период прохождения катастрофических паводков 1988, 2002 и 2012 гг. были использованы подробные данные плювиограмм ливневых осадков. За 19–20 июня 1988 г. данные плювиографа на станции Новороссийск были взяты из метеорологического ежегодника и осреднены до равномерного 1-часового интервала, для события 2002 г. использовались данные соседних метеорологических станций Анапа и Джубга, данные за 6–7 июля 2012 г. заимствованы из работы (Болгов и Коробкина, 2013).

20 июня 1988 г. В этот день на исследованной территории наблюдались дожди большой интенсивности, сопровождавшиеся несколькими смерчами. По данным плювиографа метеорологической станции Новороссийск, в течение 4 ч 50 мин выпало $179,4 \text{ мм}$ осадков. Средняя интенсивность их выпадения составила $0,6 \text{ мм/мин}$, максимальная достигала $2,3 \text{ мм/мин}$. Интересно, что по данным работы (Колтерманн и др., 2012) количество осадков на горной метеостанции Мархотский перевал не превысило $7,0 \text{ мм}$ за тот же период наблюдения. Осадки 20 июня выпадали уже на увлажненную поверхность водосбора, так как в предшествующие 3 сут выпало в сумме $97,6 \text{ мм}$ осадков (19 июня — $24,7 \text{ мм}$, 18 июня — $24,5 \text{ мм}$, 17 июня — $48,4 \text{ мм}$), что усугубило масштаб паводка. Подтверждает это рассчитанный запас

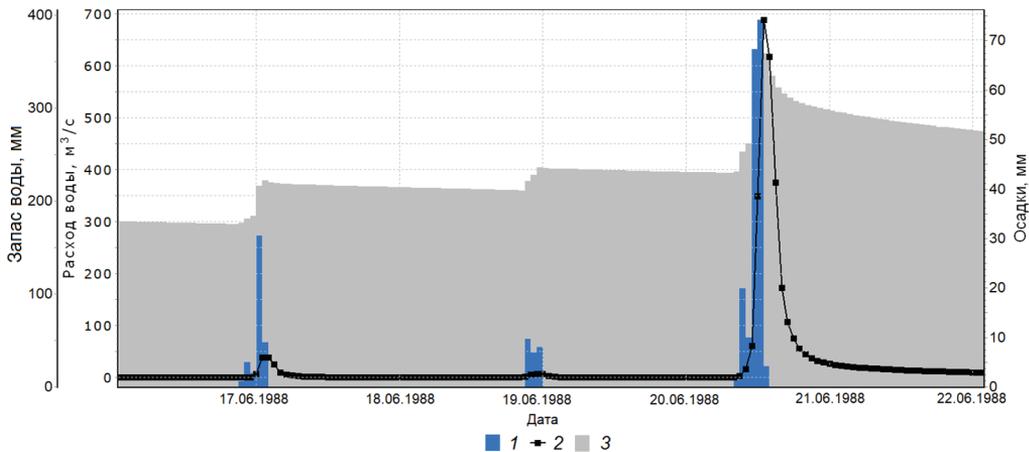


Рис. 5. Развитие паводка с 17 по 22 июня 1988 г. в створе р. Цемес — г. Новороссийск:

1 — осадки; 2 — рассчитанный 1-часовой расход воды; 3 — рассчитанный запас воды на водосборе, мм

воды на водосборе. На рис. 5 видно, что за 3 сут (17–19 июня) до наблюдения катастрофического расхода воды количество влаги на водосборе увеличилось более чем на 70 мм, а 20 июня ее количество достигло рекордных 355 мм. Таким образом, значительная часть выпавших осадков не смогла просочиться в почвогрунты и сформировала максимальный расход воды. Развитие паводка наблюдалось с 11 ч 20 июня. Расход воды в это время составил 61 м³/с. Своего максимума 1-часовой рассчитанный расход воды достиг в 13 ч и составил 688 м³/с (см. рис. 5).

5–9 августа 2002 г. Еще один катастрофический паводок в районе г. Новороссийска наблюдался 5–9 августа 2002 г. В эти дни иногда за 30–50 мин выпадало до 75 мм осадков (Панов и др., 2012). Так же, как и в 1988 г., ливневые осадки усугублялись смерчами, которые приносили на сушу дополнительное количество морской воды. В результате наводнения были затоплены железнодорожный узел в Новороссийске, территории портов и множество зданий, в которых уровень воды на первых этажах превышал 1,5 м (Панов и др., 2012). Всего, по данным МЧС, в Новороссийске было подтоплено 2940 домов, 183 разрушены. Общий ущерб составил 1,5 млрд руб., погибло 58 человек (Панов и др., 2012).

Подробных данных об осадках 5–9 августа 2002 г. на станции Новороссийск не найдено, однако имеются плювиограммы осадков на ближайших станциях Анапа и Джубга. В сумме за несколько дней на этих двух метеостанциях выпало 371 мм осадков. Согласно работе (Воробьев и др., 2003), количество осадков за тот же период в Новороссийске составило 362 мм, что равняется полугодовой норме. Суммарные данные об осадках на метеостанциях Анапа и Джубга были использованы для моделирования максимального расхода воды, который для 7 августа 2002 г. составил 284 м³/с (рис. 6).

6–7 июля 2012 г. Осадки, выпавшие 6–7 июля 2012 г. на Черноморском побережье на участке Геленджик — Новороссийск, а также в Крымском и Абинском районах, не наблюдались ранее за всю историю инструментальных наблюдений. В результате катастрофического паводка в г. Крымске погибли более 170 человек и был нанесен колоссальный материальный ущерб (Панов и др., 2012).

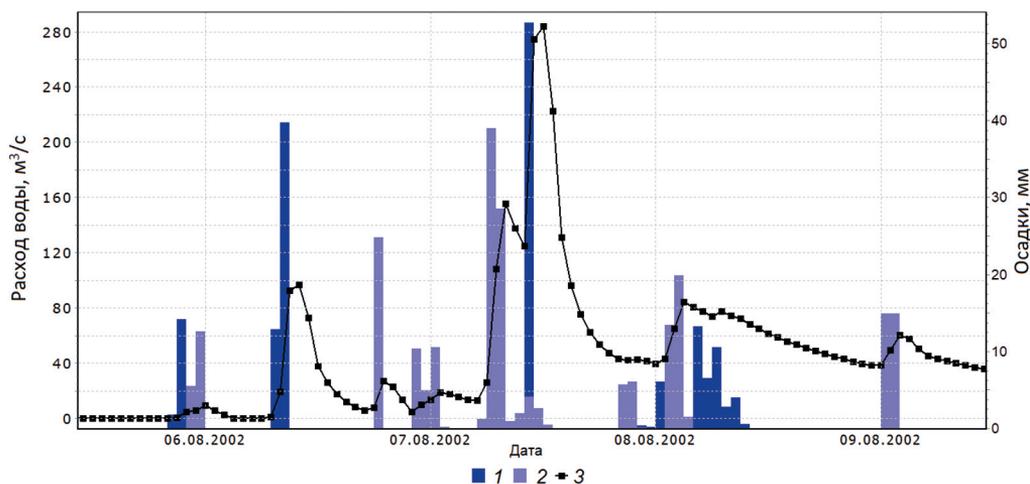


Рис. 6. Развитие паводка 6–9 августа 2002 г. в створе р. Цемес — г. Новороссийск:

1 и 2 — осадки на метеостанциях Анапа и Джубга соответственно; 3 — рассчитанный 1-часовой расход воды

По данным работы (Болгов и Коробкина, 2013), за 1 сут — с 7 ч 6 июля до 7 ч 7 июля 2012 г. — на метеостанции Новороссийск был зафиксирован исторический максимум осадков, достигший 275 мм. Основной объем осадков, сформировавших катастрофический паводок, выпал с 22 ч 6 июля до 3 ч ночи 7 июля. В этот период интенсивность осадков достигала 35–45 мм/ч (0,58–0,75 мм/мин), а их суммарное количество составило 157 мм. По результатам моделирования, всего за 2 ч ливня расход воды возрос с 78 м³/с до своего максимального значения, которое около 4 ч утра 7 июля составило 361 м³/с (рис. 7). Распределение элементов водного баланса во время паводка 6 и 7 июля имело следующий вид: осадки — 156 и 158 мм, сток — 13 и 86 мм соответственно. Сток 7 июля был более высоким, чем сток 6 июля, что обусловлено, как и в случае паводка 1988 г., максимальной влагонасыщенностью почвогрунтов за счет выпадения осадков 6 июля. Несмотря на то что во время паводка 1988 г. выпало в 1,5 раза меньше осадков, чем в 2012 г., более высокие расходы воды в 1988 г. стали результатом более высокой интенсивности выпадения осадков.

5. Расчет максимальных расходов воды дождевых паводков р. Цемес стандартными методами

Согласно рекомендациям СП-33-101-2003, максимальные расходы воды дождевых паводков обеспеченностью 1, 2, 5, и 10% были рассчитаны для р. Цемес двумя способами:

- 1) по редуccionной формуле (метод аналогии),
- 2) по формуле предельной интенсивности (в случае отсутствия рек-аналогов).

Изначально в качестве водосборов-аналогов рассматривались гидрологические посты р. Дюрсо — с. Абрау-Дюрсо и р. Адерба — пос. Светлый. Несмотря на то

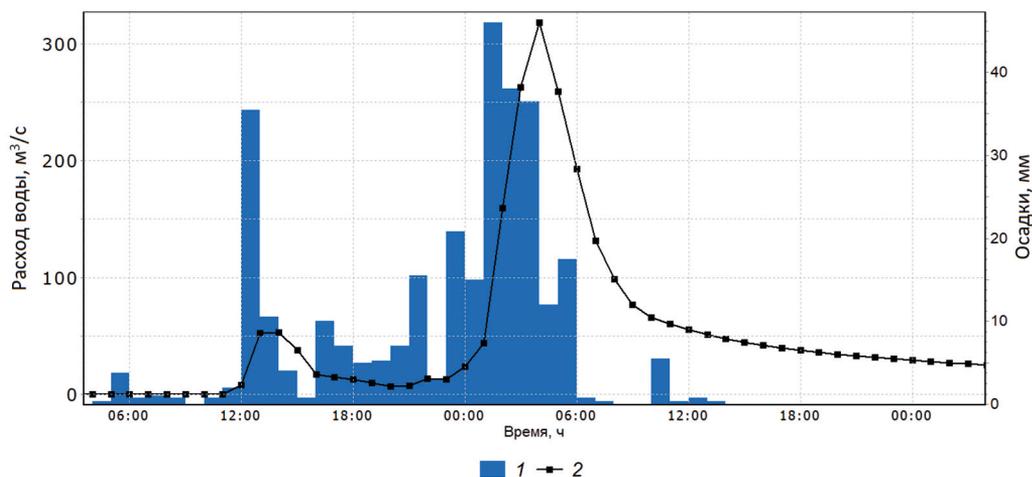


Рис. 7. Развитие паводка 6–7 июля 2012 г. в створе р. Цемес — г. Новороссийск:

1 — осадки; 2 — рассчитанный 1-часовой расход воды

что эти посты расположены в схожих географических условиях и на относительно небольшом удалении друг от друга, корреляционные связи максимальных расходов воды дождевых паводков в створах данных постов отсутствуют, что не позволило продлить короткий ряд наблюдений поста на р. Дюрсо и восстановить пропуски данных поста на р. Адербе. В качестве аналога принят водосбор р. Адегой — ст.-ца Шапсугская (площадь 125 км²), хотя он отделен от побережья Черного моря Мархотским хребтом, высоты которого достигают порядка 700 м, а ряд данных наблюдений на нем нестационарен и неоднороден. Ряд наблюденных максимальных расходов воды составляет 41 год², в него входит зафиксированный в 2012 г. расход воды 463 м³/с.

Суточный слой осадков вероятностью превышения 1% для метеостанции Новороссийск составил 209 мм (2012 г.), ранее этот показатель здесь составлял 180 мм (1988 г.) (Георгиевский и Ткаченко, 2012). В работе (Болгов и Коробкина, 2013) приведены сведения о том, что суточный слой осадков в 2012 г. составил 275 мм. В табл. 2 приведены результаты расчета расходов воды дождевого паводка различ-

Таблица 2. Максимальные расходы воды дождевых паводков (м³/с), рассчитанные по СП-33-101-2003

Способ расчета	Q _{1%}	Q _{2%}	Q _{5%}	Q _{10%}
Как неизученный	267	251	219	197
Как неизученный_Н 275 мм*	378	355	310	280
По аналогу	285	244	184	141

* При условии, что суточный слой осадков в 2012 г. составил 275 мм.

² Наблюдения начаты в 1966 г., однако в некоторые годы были пропуски.

ной обеспеченности по реке-аналогу (редукционной формуле) и как для неизученной реки в случае отсутствия рек-аналогов (по формуле предельной интенсивности).

6. Обсуждение полученных результатов

На основе подробных данных о ходе ливневых осадков были смоделированы гидрографы трех катастрофических паводков 1988, 2002 и 2012 гг. на р. Цемес с 1-часовым временным разрешением. Рассчитанные для этих событий максимальные расходы воды (составившие 688, 284 и 361 м³/с соответственно) можно принять за срочные значения.

Хотя максимальное абсолютное количество осадков выпало при паводке 2012 г., рассчитанный максимальный расход воды приходится на событие 1988 г., что связано с максимальной увлажненностью водосбора на момент выпадения ливневых осадков в этот период. Результаты моделирования указывают на необходимость учитывать состояние водосбора, предшествующее экстремальному гидрологическому событию, так как именно уникальное сочетание стокоформирующих и метеорологических факторов определяет масштабы паводка. Это согласуется с концепцией метода вероятного максимального паводка (PMF).

Рассчитанные при моделировании максимальные расходы воды паводков 2002 и 2012 гг., равные 284 и 361 м³/с, согласуются с порядком расходов воды 1%-ной обеспеченности, рассчитанных, как рекомендует СП-33-101-2003, по редукционной формуле (285 м³/с) и по методу предельной интенсивности (378 м³/с). Таким образом, расход воды 1%-ной обеспеченности мог быть достигнут 2 раза за 11 лет. Однако модельный расход воды для паводка 1988 г., равный 688 м³/с, почти в 2 раза больше расхода воды 1%-ной обеспеченности, рассчитанного по стандартной методике.

В условиях неопределенности климатических изменений и тенденции к изменению характеристик максимальных осадков, не наблюдаемых ранее, использование методов детерминированного моделирования может служить дополнением, а в будущем — и альтернативой используемым в настоящее время методам расчета. В работе (Асарин и Жиркевич, 2012) отмечается, что в настоящее время исследовать поведение динамических систем в критических ситуациях можно путем математического моделирования, которое позволяет получить аналог PMF и использовать его при принятии инженерных решений.

Перспективы развития методов математического моделирования, в том числе для расчета PMF, в настоящее время ограничены отсутствием детальных данных о количестве и интенсивности осадков. Обеспечение территории Краснодарского края сетью метеорологических станций недостаточно, чтобы прогнозировать выдающиеся паводки на малых водосборах. В связи с этим необходимо использовать дополнительные источники данных. Ими могут быть региональные мезомасштабные модели, развитие которых открывает новые возможности для прогноза зон активной конвекции с сильными осадками (Алексеева, 2014). В качестве примера укажем модели MM5 (Fifth-Generation Penn State / NCAR Mesoscale Model) и WRF (Weather Research and Forecasting modeling system), разработанные Национальным центром атмосферных исследований США и для научных иссле-

дований, и для выполнения оперативных прогнозов (Барабанов и др., 2003; Быков и др., 2017).

Результаты моделирования осадков, выпавших в окрестностях г. Новороссийска 6–7 июля 2012 г., проведенного на основе мезомасштабных климатических моделей MM5 и WRF, хорошо согласуются с измерениями на метеостанциях (Шокуров, 2012). Тем не менее в работе (Шокуров, 2012) отмечается, что для прогнозирования катастрофических паводков недостаточно давать прогноз одних только осадков — необходима реалистичная модель речного стока, которая может использовать в качестве входной информации прогнозы, полученные по мезомасштабным моделям.

Заключение

Для оценки максимальных расходов воды неизученной р. Цемес в створе г. Новороссийска применена распределенная детерминированная модель формирования стока «Гидрограф». Оценены основные параметры модели и проведена ее верификация на водосборах, расположенных в сходных физико-географических условиях, для которых есть в наличии ряды наблюдений за стоком воды. Результаты моделирования в условиях высокой неопределенности метеорологических данных приняты удовлетворительными. Проведено моделирование процессов формирования стока для водосбора р. Цемес с суточным расчетным шагом за период 1977–2013 гг. Рассчитанные средние многолетние значения элементов водного баланса составили: осадки — 830 мм, сток — 330 мм, испарение — 500 мм.

Для моделирования гидрографов катастрофических паводков 1988, 2002 и 2012 гг. с часовым временным разрешением использованы детальные данные плювиограмм ливневых осадков на метеорологической станции Новороссийск и близлежащих метеорологических станциях. Максимальные рассчитанные расходы воды паводков в 2002 и 2012 гг., равные 284 и 361 м³/с, соответствуют порядку значений максимального расхода воды 1%-ной обеспеченности, рассчитанных на основе методики СП-33-101-2003, и могли наблюдаться дважды за 11 лет подряд. Модельный максимальный расход воды, равный 688 м³/с для события 1988 г., превышает это же значение в 2 раза. Этот расход воды можно условно принять в качестве расхода воды вероятного максимального паводка (PMF).

Ограниченные возможности применения методов стандартных гидрологических расчетов в связи с изменением климата и гидрологического режима ставят задачу разработки новых подходов для получения максимальных характеристик стока. Основной таких подходов может стать комплексное использование методов математического моделирования гидрологических процессов и мезомасштабных атмосферных моделей.

Авторы благодарны рецензентам за конструктивные замечания, позволившие значительно улучшить статью.

Литература

- Алексеева, А. А., 2014. Подходы к решению проблемы прогнозирования сильных летних осадков. Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации 351, 64–84.
- 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, 53–64.
- Барабанов, В. С., Ефимов, В. В., Шокуров, М. В., 2003. Об использовании мезомасштабной модели для расчета полей приводного ветра и осадков над Черным морем. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря 2(7), 177–189.
- Белякова, П. А., Гариман Б. И., 2017. О перспективах прогнозирования паводков на реках западного Кавказа с использованием воднобалансовой модели FCM, в: 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, 53–57.
- Болгов, М. В., Коробкина, Е. А., 2013. Реконструкция дождевого паводка на реке Адагум на основе математических моделей формирования стока. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление 3, 87–102.
- Быков, А. В., Калинин, Н. А., Шихов, А. Н., 2017. Прогноз опасных и неблагоприятных явлений погоды на среднем Урале с применением мезомасштабной модели WRF. Современные проблемы географии и геологии к 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 223–226.
- Виноградов, Ю. Б., 1988. Математическое моделирование процессов формирования стока (опыт критического анализа). Гидрометеиздат, Ленинград.
- Виноградов, Ю. Б., Виноградова, Т. А., 2010. Математическое моделирование в гидрологии. Академия, Москва.
- Воробьев, Ю. Л., Акимов, В. А., Соколов, Ю. И., 2003. Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы. ДЭКС-Пресс, Москва.
- Георгиевский, В. Ю., Ткаченко Ю. Ю., 2012. Катастрофический паводок в бассейне р. Адагум 6–7 июля 2012 г. и его причины. URL: <http://meteoweb.ru/biblio/27.pdf> (дата обращения: 20.01.2019).
- Колтерманн, К. П., Добролюбов, С. А., Алексеевский, Н. И., 2012. Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей. Триумф, Москва.
- Ландшафтная карта СССР. Масштаб 1 : 2 500 000 (в 1 см 25 км), 1980 / Гудилин, И. С. (под ред.). Гидроспецгеология, Москва.
- Лично приеду в районы Сочи, пострадавшие от паводка, 2015. URL: <http://www.obeschania.ru/documents/promises/sochi-pavodok> (дата обращения: 20.01.2019).
- Макарьева, О. М., 2018. Комплексная программа распределенной гидрологической модели «Гидрограф», в: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018619084. Роспатент, Москва.
- Макарьева, О. М., Бельдиман, И. Н., Лебедева, Л. С., Виноградова, Т. А., Нестерова, Н. В., 2017. К вопросу об обоснованности рекомендации СП 33-101-2003 для расчетов характеристик максимального стока малых рек в зоне распространения многолетней мерзлоты. Инженерные изыскания 6–7, 50–63.
- 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 12(3), 78–89.
- Метеорологический ежемесячник. I–XIII, 1964–1983, 13. Гидрометеиздат. Ростов-на-Дону.
- Наводнения в Краснодарском крае с 2010 года: хронология, 2015. URL: <https://tass.ru/info/2071994> (дата обращения: 20.01.2019).
- 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 1, 18–36.
- Панов, В. Д., Базелюк, А. А., Лурье, П. М., 2012. Реки Черноморского побережья Кавказа: гидрография и режим стока. Донской издательский дом, Ростов-на-Дону.

- Перегретое море, 2015. URL: <http://www.geo.ru/ekologiya/peregretoe-more> (дата обращения: 26.07.2018).
- Рождественский, А. В., Лобанова, А. Г., 2010. Приложения к пособию по определению расчетных гидрологических характеристик. Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург СП 33-101-2003, 2004. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Госстрой России, Москва.
- Справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные 13, 1966. Гидрометеоздат, Ленинград
- Шокуров, М. В., 2012. Численное моделирование катастрофических погодных явлений в Черноморском регионе. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа 2(26), 301–320.
- Lebedeva, L. S., Semenova, O. M., Vinogradova, T. A., Kruchin, M. N., Volkova, N. V., 2015. Proceedings of IAHS 370, 161–165. URL: <https://doi.org/10.5194/piahs-370-161-2015>
- Moriyas, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. ASABE 50(3), 885–900. URL: <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Meredith, E. P., Semenov, V. A., Maraun, D., Park, W., Chernokulsky A. V., 2015. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme. Nature Geosceince 8, 615–620. URL: <https://doi.org/10.1038/NCEO2483>
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models: A discussion of principles. Journal of Hydrology 10(3), 282–290.

Статья поступила в редакцию 16 августа 2018 г.
Статья рекомендована в печать 7 декабря 2018 г.

Контактная информация:

Макарьева Ольга Михайловна — omakarieva@gmail.com; o.makareva@spbu.ru
Нестерова Наталья Вадимовна — nnesterova1994@gmail.com; st012104@student.spbu.ru
Виноградова Татьяна Александровна — vinograd1950@mail.ru; t.vinogradova@spbu.ru
Бельдиман Ирина Никитична — irinabeldiman@gmail.com
Колупаева Александра Дмитриевна — alya.kolupaeva.97@mail.ru

Calculation of catastrophic floods characteristics of ungauged Tsemes River (Novorossiysk, the Black sea coast of Russia) on the basis of hydrological model “Hydrograph”

O. M. Makarieva^{1, 2}, N. V. Nesterova^{2, 3}, T. A. Vinogradova^{2, 4},
I. N. Beldiman⁴, A. D. Kolupaeva²

¹ Melnikov Permafrost Institute SB RAS,
36, ul. Merzlotnaya, Yakutsk, 677010, Russian Federation

² St. Petersburg State University,
7–9, Universitetskaya nab., St. Petersburg, 199034, Russian Federation

³ State Hydrological Institute,
23, 2nd liniya V. O., St. Petersburg, 199053, Russian Federation

⁴ Gidrotehproekt LTD,
97A, 14th liniya V. O., St. Petersburg, 199178, Russian Federation

For citation: Makarieva, O. M., Nesterova, N. V., Vinogradova, T. A., Beldiman, I. N., Kolupaeva, A. D. (2019). Calculation of catastrophic floods characteristics of ungauged Tsemes river (Novorossiysk, the Black sea coast of Russia) on the basis of hydrological model “Hydrograph”. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 64 (1), 24–43. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.102> (In Russian)

The article considers the examples of calculation of catastrophic floods characteristics at ungauged rivers of the Black sea coast of Russia. Mathematical modeling of hydrological processes is proposed as an alternative to the standard methods of assessment of engineering characteristics based on a probabilistic approach in the climate change conditions. The deterministic hydrological model Hydrograph was applied to estimate the maximum water discharges of the ungauged Tsemes river (Novorossiysk). The set of model parameters was developed and verified at studied catchments. Continuous simulations of streamflow were conducted at the Tsemes River with a daily resolution for the period 1977–2013. Using detailed pluviograms data of storm precipitation at Novorossiysk and nearby meteorological stations, 1-hour maximum water discharge of three catastrophic floods on Tsemes river was calculated for flood events in 1988, 2002 and 2012 and compared with the characteristics of maximum discharges obtained on the basis of calculations according to the standard methods SP-33-101-2003 (SP). The maximum simulated discharges in 2002 and 2012 were 284 and 361 m³/s and correspond to maximum discharges of 1% probability calculated on the basis of the SP. However, estimated water discharge for the catastrophic flood in 1988 reached 688 m³/s, which is twice the value of 1% probability estimated with standard methods. The analysis of the simulation results has shown that the maximum discharge depends on the antecedent state of the catchment, which cannot be explicitly taken into account when using probabilistic calculation methods. The possibility of using mathematical modeling as an approach for assessment of probable maximum flood (PMF), which allows taking into account the combination of the most unfavorable meteorological and runoff formation factors that can lead to the occurrence of PMF, is discussed. The development of methods based on the integrated use of mesoscale atmospheric models and deterministic hydrological models is important as a prospect. The developed methods for assessing the frequency and magnitude characteristics of catastrophic floods can be used to solve engineering problems in climate change conditions.

Keywords: deterministic hydrological “Hydrograph” model, instant maximum discharge, Black sea coast river basins, Tsemes river, parameterization, catastrophic floods, storm rainfall.

References

- Alekseeva, A. A.*, 2014. Podkhody k resheniiu problemy prognozirovaniia sil'nykh letnikh osadkov [Approaches to solving the problem of forecasting strong summer precipitation]. *Gidrometeorologicheskii nauchno-issledovatel'skii tsentr Rossiiskoi Federatsii* [The proceedings of the hydrometeorological scientific center of the Russian Federation] 351, 64–84. (In Russian)
- Asarin, A. E., Zhirkevich, A. N.*, 2012. O neobkhodimosti razrabotki metodiki rascheta veroiatnogo maksimal'nogo pavodka (PMF) dlia inzhenerno-gidrologicheskikh raschetov v Rossii [On the need to develop a method of calculating the probable maximum flood for engineering and hydrological calculations in Russia]. *Vodnoe khoziaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water industry of Russia: problems, technologies, management] 4, 53–64. (In Russian)
- Barabanov, V. S., Efimov, V. V., Shokurov, M. V.*, 2003. Ob ispol'zovanii mezomasshtabnoi modeli dlia rascheta polei privodnogo vetra i osadkov nad Chernym morem [On the use of a mesoscale model for the calculation of driving wind and precipitation fields over the Black sea]. *Ekologicheskaiia bezopasnost' pribrezhnoi i shelfovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* [Environmental safety of the coastal and shelf zones of the sea] 2(7), 177–189. (In Russian)
- Belyakova, P. A., Gartsman, B. I.*, 2017. O perspektivakh prognozirovaniia pavodkov na rekakh zapadnogo Kavkaza s ispol'zovaniem modeli vodnogo balansa FCM [On the prospects of flood forecasting on the rivers of the Western Caucasus using the FCM water balance model]. XXII Mezhdunarodnaia nauchno-prakticheskaiia konferentsiia po problemam zashchity naseleniia i territorii ot chrezvychainykh situatsii: “Ekologicheskii posledstviia chrezvychainykh situatsii: aktual'nye problemy i puti resheniia” [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], 53–57. (In Russian)

- Bolgov, M. V., Korobkina, E. A.*, 2013. Rekonstruktsiia dozhdevogo pavodka na reke Adagum na osnove matematicheskikh modelei formirovaniia stoka [Reconstruction of the rain flood on the Adagum river based on mathematical models of flow formation]. *Vodnoe khoziaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water economy of Russia: problems, technologies, management] 3, 87–102. (In Russian)
- Bykov, A. V., Kalinin, N. A., Shikhov, A. N.*, 2017. Prognoz opasnykh i neblagopriiatnykh iavlenii pogody na srednem Urale s primeneniem mezomasshtabnoi modeli WRF [Prediction of dangerous and adverse weather events in the middle Urals using the mesoscale WRF model]. *Sovremennye problemy geografii i geologii k 100-letiiu otkrytiia estestvennogo otdeleniia v Tomskom gosudarstvennom universitete: materialy IV Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Modern problems of geography and Geology to the 100th anniversary of the opening of the natural branch in Tomsk State University: materials of the IV all-Russian scientific-practical conference with international participation], 223–226. (In Russian)
- Georgievsky, V. Yu., Tkachenko, Yu. Yu.*, 2012. Katastroficheskoe navodnenie v basseine reki Adagum 6–7 iul'ia 2012 g. i ego prichiny [Catastrophic flooding in the basin of the Adagum river 6–7 July 2012 and its causes]. URL: <http://meteoweb.ru/biblio/27.pdf> (date accessed: 20.01.2019). (In Russian)
- Koltermann, K. P., Dobrolyubov, S. A., Alexis, N. I.*, 2012. Prirodnye i sotsial'nye riski v beregovoi zone Chernogo i Azovskogo morei [Natural and social risks in the coastal zone of the Black and Azov seas]. *Triumf, Moscow*. (In Russian)
- Landshaftnaya karta SSSR. Masshtab 1 : 2 500 000 (v 1 cm 25 km) [Landscape map of the USSR. Scale 1 : 2,500,000 (in 1 cm 25 km), 1980 / Gudilin, I. S. (Ed.). *Gidrospegeologiya, Moscow*. (In Russian)
- Lebedeva, L. S., Semenova, O. M., Vinogradova, T. A., Kruchin, M. N., Volkova, N. V.*, 2015. Evaluating extreme flood characteristics of small mountainous basins of the Black Sea coastal area, Northern Caucasus. *Proc. IAHS 370*, 161–165. URL: <https://doi.org/10.5194/piahs-370-161-2015>
- Lichno priyedu v rayony Sochi, postradavshiye ot pavodka [I will personally come to the flood-affected areas of Sochi], 2015. URL: <http://www.obeschania.ru/documents/promises/sochi-pavodok> (date accessed: 20.01.2019).
- Makar'eva, O. M.*, 2018. Kompleksnaia programma raspredelennoi gidrologicheskoi modeli "Gidrograf" [Complex program of the distributed hydrological model "Hydrograph"]. In: *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 2018619084* [Certificate of state registration of the computer program No. 2018619084]. *Rospatent, Moscow*. (In Russian)
- Makar'eva, O. M., Beldiman, I. N., Lebedeva, L. S., Vinogradova, T. A., Nesterova, N. V.*, 2017. K voprosu ob obosnovannosti rekomendatsii SP 33-101-2003 dlia raschetov kharakteristik maksimal'nogo stoka malykh rek v zone rasprostraneniia mnogoletnei merzloty (v poriadke diskussii) [On the issue of validity of recommendations from SP 33-101-2003 for assessment of maximum flow characteristics of small river in the permafrost zone]. *Inzhenernye izyskaniia* [Engineering surveys] 6–7, 50–63. (In Russian)
- Makar'eva, O. M., Vinogradova, T. A., Nesterova, N. V., Vinogradov, A. Yu., Beldiman, I. N., Kolupaeva, A. D.*, 2018. Modelirovanie katastroficheskikh pavodkov v basseine r. Tuapse [Modeling of catastrophic floods in the Tuapse river basin]. *Georisk* [Georisk] 12(3), 78–89. (In Russian)
- Meredith, E. P., Semenov, V. A., Maraun, D., Park, W., Chernokulsky, A. V.*, 2015. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme. *Nature Geoscience* 8, 615–620. URL: <https://doi.org/10.1038/NCEO2483>
- Monthly meteorological data. I–XIII, 1964–1983, 13. *Hydrometeoizdat, Rostov-on-Don*. (In Russian)
- Moriyas, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L.*, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *ASABE* 50(3), 885–900. URL: <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Nash, J. E., Sutcliffe, J. V.*, 1970. River flow forecasting through conceptual models: a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3), 282–290.
- Navodneniya v Krasnodarskom kraie s 2010 goda: khronologiya [Floods in the Krasnodar Territory since 2010: chronology], 2015. URL: <https://tass.ru/info/2071994> (date accessed: 20.01.2019).
- Nesterova, N. I., Makar'eva, O. M., Vinogradova, T. A., Lebedeva, L. S.*, 2018. Modelirovanie protsessov formirovaniia stoka zony baikalo-amurskoi magistrali na osnove dannykh poligona "Mogot" [Modelling runoff formation processes at the BAM zone based on the data of the Mogot research site]. *Vodnoe khoziaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie* [Water economy of Russia] 1, 18–36. (In Russian)

- Panov, V.D., Bazelyuk, A.A., Lurie, P.M.*, 2012. Reki Chernomorskogo poberezh'ia Kavkaza: gidrografia i rezhim stoka [Rivers of the Black sea coast of the Caucasus: hydrography and flow regime]. Don, Rostov-on-Don. (In Russian)
- Peregretoye more [Superheated Sea], 2015. URL: <http://www.geo.ru/ekologiya/peregretoe-more> (date accessed: 26.07.2018).
- Rozhdestvensky, A. V., Lobanova, A. G.*, 2010. Applications to the manual on the determination of the calculated hydrological characteristics. State Hydrological Institute, St. Petersburg. (In Russian)
- SP 33-101-2003, 2004. Determination of the main calculated hydrological characteristics, Gosstroy Rossii, Moscow. (In Russian)
- Reference book on climate of the USSR. Issue 3, 1966. Hydrometeoizdat, Leningrad. (In Russian)
- Shokurov, M. V.*, 2012. Chislennoe modelirovanie katastroficheskikh pogodnykh iavlenii v Chernomorskom regione [Numerical simulation of catastrophic weather events at the Black sea region]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shelfovoi zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shelfa* [Environmental safety of coastal and shelf zones and integrated use of shelf resources] 2(26), 301–320. (In Russian)
- Vinogradov, Yu. B.*, 1988. Matematicheskoe modelirovanie protsessov formirovaniia potokov (opyt kriticheskogo analiza) [Mathematical modeling of flow formation processes (critical analysis experience)], Hydrometeoizdat, Leningrad. (In Russian)
- Vinogradov, Yu. B., Vinogradova, T.A.*, 2010. Matematicheskoe modelirovanie v gidrologii [Mathematical modeling in hydrology]. Academy, Moscow. (In Russian)
- Vorobyov, Y.L., Akimov, V.A., Sokolov, Y.I.*, 2003. Katastroficheskie navodneniia nachala XXI veka: uroki i vyvody [Catastrophic floods of the early XXI century: lessons and conclusions], DEKS-Press, Moscow. (In Russian)
- Russian news Agency. URL: <http://tass.ru/info/2071994> (date accessed: 25.07.2018).
- The Euromediterranean Network of Experimental and Representative Basins (ERB). URL: <http://erb-network.simdif.com/> (date accessed: 28.09.2018)/

Received: August 16, 2018
Accepted: December 7, 2018

Author's information:

Olga M. Makarieva — omakarieva@gmail.com; o.makareva@spbu.ru
Nataliia V. Nesterova — nnesterova1994@gmail.com; st012104@student.spbu.ru
Tatiana A. Vinogradova — vinograd1950@mail.ru; t.vinogradova@spbu.ru
Irina N. Beldiman — irinabeldiman@gmail.com
Alexandra D. Kolupaeva — alya.kolupaeva.97@mail.ru