

# ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБЗОРЫ

DOI:10.21513/2410-8758-2023-4-386-402

УДК 51-7+ 551.311.2+551.4+556.51

## О моделировании склонового стока на горных и предгорных водосборах

*К.Н. Анахаев<sup>1,2)\*</sup>, В.В. Беликов<sup>2)\*\*</sup>*

<sup>1)</sup> Институт прикладной математики и автоматизации  
Кабардино-Балкарского научного центра  
Российской академии наук (ИПМА КБНЦ РАН),

Россия, Кабардино-Балкарская Республика, 360000, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89А

<sup>2)</sup> Институт водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН),  
Россия, 119333, г. Москва, ул. Губкина, д. 3

Адрес для переписки: \*anaha13@mail.ru, \*\*belvv@bk.ru

**Реферат.** В условиях высотной изменчивости климатических и географических характеристик горных и предгорных территорий проблема изучения склонового (дождевого) стока имеет важное значение для определения параметров как паводковых, так и селевых потоков. Горные территории отличаются сложной геоморфологией, малыми площадями водосборов, большими уклонами русел водотоков, наличием наносоводных и селевых потоков с заторно-волновым характером их движения и др. Поэтому оценка паводковой и селевой опасности горных водотоков является важным и актуальным вопросом в обеспечении безопасности жизнедеятельности на данных территориях. Эта оценка создает основу для геофизического моделирования склонового стока. В работе представлены расчетные результаты максимальных значений ливневого и селевого расходов для региона Центрального Кавказа (с основными реками Баксан, Чегем, Черек), показывающие достаточно близкое соответствие (со средней погрешностью + 4.6%) с известными базовыми значениями ливневых расходов для 16 водотоков, а также с независимыми данными МГУ им. М.В. Ломоносова для р. Ашамба Краснодарского края. Впервые вычислены также указанные параметры еще для 16 водотоков – притоков основных рек региона. Предложена зависимость для нахождения максимального (волнового) расхода селевого потока с учетом 16 гидрографических особенностей водосборного бассейна и селевого русла водотока, учитывающая их изменения во времени.

**Ключевые слова.** Моделирование, горные водотоки, водосборная площадь, длина реки, дождевой сток, максимальный ливневый расход, расход селевого потока.

## On the modeling of slope runoff at mountain and foothill catchments

K.N. Anakhaev<sup>1,2)\*</sup>, V.V. Belikov<sup>2)\*\*</sup>

<sup>1)</sup> Institute of Applied Mathematics and Automation of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (IPMA KBNC RAS), 89A, Shortanova st., 360000, Nalchik, Kabardino-Balkarian Republic, Russian Federation

<sup>2)</sup> Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (IVP RAS), 3, Gubkina str., 119333, Moscow, Russian Federation

Correspondence address: \*anaha13@mail.ru, \*\*belvv@bk.ru

**Abstract.** In conditions of high-altitude variability of climatic and geographical characteristics of mountainous and foothill territories, the problem of studying slope (rain) runoff is important for determining the parameters of both flood and mudflow flows. Mountain territories are characterized by complex geomorphology, small catchment areas, large slopes of watercourses, the presence of sediment and mudflow flows with a sluggish-wave nature of their movement, etc. Therefore, the assessment of flood and mudflow hazards of mountain watercourses is an important and urgent issue in ensuring the safety of life in these territories. This assessment forms the basis for geophysical modeling of slope runoff. The paper presents the calculated results of the maximum values of stormwater and mudflow flows for the Central Caucasus region (with the main rivers Baksan, Chegem, Cherek), showing a fairly close correspondence (with an average error of + 4.6%) with the known basic values of stormwater flows for 16 watercourses, as well as with independent data from Lomonosov Moscow State University for the Ashamba river of the Krasnodar Territory. For the first time, these parameters were also calculated for another 16 watercourses – tributaries of the main rivers of the region. A dependence is proposed for finding the maximum (wave) flow rate of a mudflow, taking into account 16 hydrogeomorphological features of the catchment basin and the mudflow channel of the watercourse, taking into account their changes over time.

**Keywords.** Modeling, mountain watercourses, catchment area, river length, rain flow, maximum storm flow rate, mudflow rate.

### Введение

В условиях высотной изменчивости климатических и географических характеристик горных и предгорных территорий проблема изучения склонового (дождевого) стока имеет важное значение для определения параметров как паводковых, так и селевых потоков. Множество работ, посвященных данной проблеме, относятся, как правило, к равнинным местностям (Иогансон, 1959), горные же водосборные территории отличаются рядом особенностей, в том числе:

- 
- относительно малыми площадями водосборов и большими уклонами русел (и склонов) водотоков-притоков 1 и 2 порядка основных рек (Непорожний, 1947) и возможностями возникновения в них паводковых и селевых потоков;
  - более быстрым поступлением расходов воды в замыкающие створы;
  - возможностью выпадения дождевых осадков заданной обеспеченности одновременно на всей водосборной территории водотока;
  - большой (иногда предельной) насыщенностью наносоводных и селевых потоков твердой (грунтовой) составляющей и заторно-волновым характером их движения;
  - наличием водопадов (уступов) и резко изменяющимися уклонами русла водотока;
  - значительными размывами дна и оснований береговых склонов с оползаниями и обрушениями последних и др.

В связи с интенсивным освоением горных районов (промышленным, сельскохозяйственным, дорожным, рекреационным, спортивным) и необходимостью обеспечения при этом безопасности жизнедеятельности в них особую актуальность приобретают вопросы оценки паводковой и селевой опасности данных территорий, что неразрывно связано с определением геоморфологических, гидрологических и селевых характеристик их водотоков.

## Методы и материалы

Рассматривая изложенные положения применительно к решению практических территориальных задач в регионе Центрального Кавказа (в бассейнах основных рек Баксан, Чегем, Черек-Безенгийский, Черек-Балкарский), значения максимальных расходов ливневых (дождевых) потоков  $Q_{max}$  будем определять как расходы 1% обеспеченности (вероятности превышения)  $Q_{1\%}$ , то есть  $Q_{max} = Q_{1\%}$ .

При этом, следует отметить, что, несмотря на достаточно большое количество опубликованных работ по селевой проблематике данного региона (например, только по бассейну р. Герхожан – более 200 (Запорожченко, 2003)), гидрogeоморфологические характеристики водотоков-притоков 1 и 2 (в особенности) порядка основных рек остаются большей частью практически неизученными.

Как известно (СП 33-101-2003, 2004), одним из основных методов определения дождевых (ливневых) расходов воды в бассейнах водотоков с неизученными гидрологическими характеристиками является использование данных рек-аналогов (при наличии).

Учитывая чрезвычайно разнообразные гидрogeоморфологические и географические особенности горных водотоков, их относительно небольшие водосборные площади ( $\leq 200 \text{ км}^2$ ), а также отсутствие изученных рек-аналогов, величину максимального ливневого расхода определяем с учетом территориальных условий (Гегиев, Чигирова, 2022) в соответствии с известной методикой для максимального срочного расхода воды 1% обеспеченности

---

$(Q_{1\%} \text{ м}^3/\text{с})$  по формуле предельной интенсивности (тип III) (СП 33-101-2003, п. 7.44, 2004; Гегиев, Чигирова, 2022; СНиП 2.01.14-83, п. 4.18, 1985)

$$Q_{1\%} = q_{1\%} \varphi H_{1\%} \delta F, \quad (1)$$

где  $F$  ( $\text{км}^2$ ) – водосборная площадь водотока;  $q_{1\%}$  максимальный модуль стока ежегодной вероятности превышения 1%, выраженный в долях от произведения  $\varphi H_{1\%}$  при  $\delta$ , определяемый по (СНиП 2.01.14-83, прил. 21, 22, 1985) в зависимости от гидрогеоморфологической характеристики русла водотока  $\Phi_p$  (2) и продолжительности склонового добегания  $\tau_{ck}$  (мин) (СНиП 2.01.14-83, п. 4.20, 1985) (см. ниже);  $\varphi$  – сборный коэффициент стока, зависящий от особенностей геоморфологии водосбора, русла водотока и типа почв по (СНиП 2.01.14-83, прил. 27, 1985), приближенное значение которого для горных районов Кавказа может быть принято равным  $\varphi \approx 0.2-0.6$  (меньшие значения для горно-лесных и супесчаных почв, большие – для горно-луговых суглинистых почв);  $H_{1\%}$  (мм) – суточный слой осадков 1% обеспеченности (по данным ближайшей метеостанции), максимальное значение которого для большей части верховьев бассейнов основных рек рассматриваемого региона может быть принято (с учетом селеносности притоков с некоторым запасом (Казаков, 2019))  $H_{1\%} = 120$  мм (Запорожченко, 2003; Гегиев, Чигирова, 2022; Кидяева и др., 2018; Инюхин и др., 2013);  $\delta$  – поправочный коэффициент влияния озерности бассейна водотока на сток – для рассматриваемых условий  $\delta = 1$ .

## Результаты

Значение гидрогеоморфологической характеристики русла водотока  $\Phi_p$  находится по формуле (СП 33-101-2003, п. 7.44, 2004; СНиП 2.01.14-83, п. 4.19, 1985)

$$\Phi_p = \frac{1000L}{m_p J_u^m \sqrt[4]{F\varphi H_{1\%}}}, \quad (2)$$

в которой  $L$  (км) – длина водотока;  $J_u(\%)$  – уклон водотока, значение которого для рассматриваемых территориальных условий горных водотоков предлагается определять по усовершенствованной зависимости (3) – как средний уклон нижней половины русла водотока (до вершины конуса выноса), где формируется завершающая структура склонового потока,

$$J_u = \frac{\nabla_m - \nabla_k}{0.5L - l_k} 1000, \quad (3)$$

где  $\nabla_m$ ,  $\nabla_k$  (м) – абсолютные отметки средней (по длине реки) части и вершины конуса выноса русла водотока, определяемые натурными измерениями, либо по топографическим картам или дистанционно-геофизическими методами;  $l_k$  (км) – длина конуса выноса водотока. При отсутствии

последнего (или его незначительности – менее 0.1 км) (Непорожний, 1947; Запорожченко, Каменев, 2011) в формулу (3) вместо  $V_k$  подставляется отметка устья притока  $V_k = V_u$ , а значение  $l_k$  приравнивается  $l_k \approx 0$ ;  $m_p$ ,  $m$  – гидравлические параметры состояния и шероховатости русла, принимаемые для водотоков со средними уклонами  $J_u \geq 35\%$  по (СП 33-101-2003, табл. Б8, 2004; СНиП 2.01.14-83, прил. 18, 1985), равными, соответственно,  $m_p = 10$  м/мин.,  $m = 1/7 = 0.143$ .

При этом, продолжительность склонового добегания  $\tau_{ck}$  (мин) для данных горных районов на основе (СНиП 2.01.14-83, п. 4.20, 1985) приближенно принимается равным  $\tau_{ck} = 10$  мин.

С учетом изложенного, территориальное значение максимального модуля расхода  $Q_{1\%}$  для Северного склона Большого Кавказа с высотами более 1500 м (СНиП 2.01.14-83, прил. 22, район № 30, 1985) в зависимости от подсчитанной по формуле (2) величины  $\Phi_p$  и принятого значения  $\tau_{ck}$  определяются по таблице (СНиП 2.01.14-83, прил. 21, 1985), либо – по предлагаемой новой аппроксимирующей зависимости  $Q_{1\%} = f|\Phi_p|$  в виде:

$$Q_{1\%} = (0.5\gamma^3 - 3.7\gamma^2 - 1.43\gamma + 38.4) \cdot 10^{-2}, \quad (4)$$

в которой  $\gamma = \ln |\Phi_p|$ , где  $|\Phi_p|$  принимает значения по модулю (без учета размерности) формулы (2).

Для удобства практических расчетов величину коэффициента  $\varphi$  в формуле (1) предлагается определять аналитически по предлагаемой новой упрощенно-приближенной эмпирической формуле, в зависимости от обратной величины формы бассейна ( $L^2/F$ ) (Смирнов и др., 1968), в виде:

$$\varphi = 0.15 (1 + 0.5L^2/F). \quad (5)$$

В следующей табл. 1 приводится сравнение максимальных значений ливневых расходов  $Q_{max} = Q_{1\%}$ , подсчитанных на основе вышеприведенных формул (1) - (5), с известными базовыми значениями для 16 различных водотоков-притоков 1 порядка основных рек Баксана, Чегема, Черека при принятом максимальном значении суточных осадков, равном  $H_{1\%} = 120$  мм.

Как следует из табл. 1, результаты расчетов максимальных ливневых расходов  $Q_{max}$ , подсчитанных на основе использования предложенных эмпирических зависимостей в общей формуле (1) для 16 различных водотоков-притоков 1 порядка бассейнов основных рек Центрального Кавказа с известными базовыми значениями при максимальных суточных осадках  $H_{1\%} = 120$  мм, дают достаточно приемлемое соответствие (с среднеарифметической погрешностью +4.6%) с известными базовыми значениями указанных расходов (Схема..., 1987; Сейнова, Золотарев, 2001). Аналогичное значение максимального ливневого расхода  $Q_{1\%} = 379.19$  м<sup>3</sup>/с, подсчитанное для р. Ашамба Краснодарского края при:  $F = 44.3$  км<sup>2</sup>;  $L = 11.4$  км;  $l_k = 0$ ;  $\delta = 1$ ;  $m_p = 10$  м/мин;  $m = 0.143$ ;  $V_m = 130$  м;  $V_k = V_u = 110$  м;  $H_{1\%} = 253$  мм, близко (~ 5.2%) согласуется с данными МГУ (~ 400 м<sup>3</sup>/с) по независимому источнику (Архипкин и др., 2013).

**Таблица 1.** Сравнение подсчитанных максимальных ливневых расходов  $Q_{max} = Q_{1\%}$  с базовыми значениями при суточных осадках  $H_{1\%} = 120$  мм

**Table 1.** Comparison of calculated maximum storm water costs  $Q_{max} = Q_{1\%}$  with baseline values at daily precipitation  $H_{1\%} = 120$  mm

Название водотока, отметки $V_m = V_k$ (м)	Площадь водосбора, $F(\text{км}^2)$	Длина реки (конуса выноса), $l_k(\text{км})$	Уклон нижнего течения, $J_u (\%)$	Коэффициент стока, $\varphi$	Максимальный расход = ( $\text{м}^3/\text{с}$ )		
					Базовое (Зап.2003; Сх.,1987; Зап.-Док, 2019)	по автотр.	%
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>Бассейн основной реки Баксан</b>							
Гижгит (до хвосто-хранилища) 1990/1270	136.0 (Гегиев К.А. и др., 2022)	24.8	58	0.49	100.0 (Запорожченко Э.В. и др., 2019; Гегиев К.А. и др., 2022)	99.0	-1.0
Камык 2080/1350	24.2 (Сейнова И.Б. и др., 2001)	8.5(0.5) (Сейнова И.Б. и др., 2001)	196	0.37	40.0 (Запорожченко Э.В., 2003)	42.2	+5.6
Герхожан 2180/1330	74.1 (Схема..., 1987)	11.8(0.6) (Схема..., 1987)	160	0.29	61.4 (Схема..., 1987)	81.0	+31.9
Кестанты 1640/1080	133.0 (Схема..., 1987)	25.0(1.5) (Схема, 1987)	51	0.50	96.0 (Схема..., 1987)	97.6	+1.6
Боклу-Ырхы, с. Лашкута 1020/840	4.2 (Схема..., 1987)	3.0(0.7) (Кадастр, 2001)	225	0.31	13.0 (Схема..., 1987)	12.6	-3.1
<b>Бассейн основной реки Чегем</b>							
Джылгы-сүү 2160/1500	39.4 (Схема..., 1987)	10.8 (Кадастр, 2001)	120	0.36	47.0 (Схема..., 1987)	52.0	+10.6
Булунгу-сүү 2400/1700 (Рис. 1, а)	43.8 (Схема..., 1987)	10.0(0.7)	163	0.32	50.0 (Схема..., 1987)	58.2	+16.5
Сылык-сүү 2240/1585 (Сейнова И.Б. и др., 2001) (Рис. 1, б)	11.3 (Схема..., 1987)	5.8	225	0.37	23.0 (Схема..., 1987)	26.5	+15.2
Ырхы-кол с. Н.Чегем 1030/910	4.7 (Схема..., 1987)	2.2(0.6)	240	0.23	14.0 (Схема..., 1987)	13.4	-4.6
<b>Бассейн основной реки Черек</b>							
Нальчик, г. Нальчик 990/550	278.0 (Схема, 1987)	34.0 (Схема, 1987)	26	0.46	237.0 (Схема, 1987)	192.4	-18.8
Xey 820/550	94.6 (Схема, 1987)	25.4	21	0.66	78.0 (Схема, 1987)	89.0	+14.2

1	3	4	5	6	7	8	9
<b>Бассейн основной реки Черек-Безенгийский</b>							
Хумалан-сую с. Кара-суу (Анахаев К.Н. и др., 2016) 1190/1000	3.8 (Схема..., 1987)	1.8(0.2)	271	0.21	12.0 (Схема..., 1987)	11.5	-3.7
Кара-сую 1410/980	83.8 (Схема..., 1987)	13.5	64	0.31	73.0 (Схема..., 1987)	66.6	-6.1
Кышшлык-сую 1840/1380	17.2 (Схема..., 1987)	5.2	175	0.27	29.0 (Схема..., 1987)	32.7	+12.7
Жидре-сую с. Безенги (Анахаев К.Н. и др., 2016) 1700/1300	1.8 (Схема..., 1987)	2.0	400	0.21	7.8 (Схема..., 1987)	7.2	-7.7
<b>Бассейн основной реки Черек-Балкарский</b>							
Хашха-сую 1370/1180	12.7 (Схема..., 1987)	3.0	110	0.20	24.0 (Схема..., 1987)	26.7	+11.2

**Примечание:** Значения длин рек (в курсиве) и отметок получены из топографической карты



a



б

**Рисунок 1.** Завал жилых домов в с. Булунгу селевыми выносами рек  
a) р. Булунгу-сую, 2007 г. (табл. 1, п. 7); б) р. Сылкык-сую, 2010 г. (табл. 1, п. 8). Селевые потоки изменили направление в сторону жилых домов при остановках валунов (3-4 м) на вершинах конусов выноса

**Figure 1.** Blockage of residential buildings in the village of Bulungu by mudflows of rivers  
a) the Bulungu-suu river, 2007 (Table 1, item 7); b) the Sylyk-suu river, 2010 (Table 1, item 8).  
Mudflows changed direction towards residential buildings when boulders stopped (3-4 m) on the tops of the removal cones

На основе полученных значений  $Q_{1\%}$  по формуле (6) определяются также ливневые расходы реки для других обеспеченностей  $Q_{p\%}$ :

$$Q_{p\%} = Q_{p\%} \cdot \gamma_{p\%}, \quad (6)$$

в котором значение переходного коэффициента  $\gamma_{p\%}$  для рассматриваемых горных и предгорных территорий находится по табличным данным (СНиП 2.01.14-83, прил. 19, 20, 1985) для района № 13 со средней высотой

водосбора более 1000 м, либо по предлагаемой новой аппроксимирующей зависимости:

$$\gamma_{p\%} = I - 0.173 \cdot \ln(p\%), \quad (7)$$

где  $p\%$  – значение требуемой обеспеченности (вероятности превышения) ливневых расходов.

В табл. 2 приводятся впервые полученные по предлагаемой методике расчетные значения максимальных ливневых расходов  $Q_{max} = Q_{I\%}$  для ряда водотоков-притоков 1 порядка основных рек Центрального Кавказа при суточной интенсивности ливневых осадков  $H_{I\%} = 120$  мм и заданных значениях водосборной площади.

**Таблица 2.** Максимальные ливневые расходы  $Q_{max}$ , рассчитанные по предлагаемой методике для притоков 1 порядка основных рек Баксан, Чегем, Черек

**Table 2.** Maximum stormwater costs  $Q_{max}$  calculated according to the proposed methodology for tributaries of the 1<sup>st</sup> order of the main rivers Baksan, Chegem, Cherek

Название водотока, $V_m = V_k$ (м)	Площадь водосбора, $F(\text{км}^2)$	Длина реки (и конуса выноса $l_k$ ), (км)	Уклон нижнего течения реки, $J_u(\%)$	Коэффициент стока, $\varphi$	Ливневый расход, $Q_{max}(\text{м}^3/\text{с})$
1	2	3	4	5	6
<b>Бассейн основной реки Баксан</b>					
Кыртык (до конуса выноса) 2320/1590	125.0 (Сейнова И.Б. и др., 2001)	17.8	82	0.34	90.6
Сылтран-сую (до конуса выноса) 3360/1590	12.8 (Кадастр..., 2001)	7.5	472	0.48	35.7
Челмас 2500/1500	3.2 (Кадастр..., 2001)	2.8(0.3) (Кадастр..., 2001)	1110	0.33	13.1
Кубасанты (до конуса выноса) 2480/1800	11.8 (Сейнова И.Б. и др., 2001; Инс. 1976)	6.0 (Инструкция..., 1976)	243	0.34	27.2
<b>Бассейн основной реки Чегем</b>					
Кам-сую 1920/1550	10.7 (Кадастр..., 2001)	3.1	239	0.22	25.3
Кардан 1970/1480	26.3 (Кадастр..., 2001)	8.4	117	0.35	39.6
<b>Бассейн основной реки Черек-Безенгийский</b>					
Шыкы-сую 1900/1550	15.8 (Кадастр..., 2001)	3.4 (0.3)	250	0.20	35.1
Беккам-сую 2500/1750 (Рис. 2)	4.6 (Кадастр..., 2001)	3.6	417	0.36	15.5

1	2	3	4	5	6
Урель-сүү 2500/1920	4.9 (Кадастр..., 2001)	3.0 (0.6)	682	0.29	16.2
Думала 2300/1620	82.7 (Схема..., 1987)	13.3 (0.8)	116	0.31	78.8
Удур-сүү 1900/1100	15.6 (Схема..., 1987)	8.6 (0.4)	257	0.51	36.4
Шиле 2800/1900	19.2 (Схема..., 1987)	7.8 (0.3)	250	0.39	38.6
Ушхар 2500/1550	30.8 (Схема..., 1987)	9.9	162	0.39	47.2
<b>Бассейн основной реки Черек-Балкарский</b>					
Чайнашки 3240/2000	62.0 (Схема..., 1987)	15.5 (0.7)	175	0.44	73.3
Гюльчи 3240/2000	11.1 (Схема..., 1987)	3.7 (0.6)	360	0.24	27.0
Рзывашки 2120/1280	54.2 (Схема..., 1987)	14.0 (1.3)	147	0.42	64.8

**Примечание:** Значения длин рек (в курсиве) и отметки получены из топографической карты



**Рисунок 2.** Селевое русло р. Беккам-сүү (табл. 2, п. 8)

a) на спаде селевого потока 09.08.17 г. (видео Анаева А.Т.); б) после прохождения селя 11.07.20 г. (фото Анаева М.Т.)

**Figure 2.** Mudflow channel of the Beckam-suu river (Table 2, item 8):

a) on the decline of the mudflow on 09.08.17 (video by A.T. Anaev); b) after passing the mudflow on 11.07.20 (photo by M.T. Anaev)

Для определения максимальных паводковых расходов рек  $Q_{pav}$  необходимо дополнительно учитывать также текущие расходы в русле реки  $Q_{rus}$  (Шафиев, 2014) и расходы волн возможного прорыва вышерасположенных озер (водоемов)  $Q_{pro}$  (Кидяева и др., 2018):

$$Q_{pav} = Q_{max} + Q_r + Q_{pro}, \quad (8)$$

в которой значение прорывного расхода озер (водоемов) определяется по соответствующим зависимостям (например, по (Шафиев, 2014)), при этом величиной текущего расхода реки  $Q_{rus}$  можно пренебречь при относительной ее незначительности ( $Q_r < 0.01Q_{max}$ ).

В случаях селеносности рассматриваемых водотоков-притоков 1 порядка бассейнов основных рек возникает вопрос об определении возможных расходов селевого потока. При этом, значение приведенного (условно-равномерного по длине водотока (Иогансон, 1959)) расхода селевого потока  $Q_c$ , соответствующее максимальному паводковому расходу  $Q_{pav}$ , может быть определено по аналогии с (Смирнов и др., 1968; Флейшман, 1978; Байнатов, 1992; Перов, 2012):

$$Q_c = (1 + \beta)Q_{pav}, \quad (9)$$

где  $\beta$  – весовое наносоводное отношение, выражаемое на основе (Соколовский, 1947) в виде:

$$\beta = \frac{P\gamma_s}{(100-P)\gamma_W} \quad (10)$$

$\gamma_s$  и  $\gamma_W$  – соответственно, объемные веса наносов и воды;  $P$  – процент (%) весового содержания наносов, значение которого может быть найдено по формуле Херхеулидзе И.И. (Иогансон, 1959; Херхеулидзе, 1947), в зависимости от уклона водотока:

$$P = 80 \cdot i^{0.4}, \quad (11)$$

в последней уклон водотока, равный  $i = 0.001 \cdot j_u$ , выражен в долях единицы.

## Дискуссия

Основной особенностью прохождения максимально-пиковых значений волнового селевого расхода  $Q_c^w$  в виде селевого вала является ее кратковременность (Флейшман, 1978; Соколовский, 1947), равная времени прохождения волны (несколько секунд). Величина указанного расхода  $Q_c^w$  зависит от гидрографических особенностей водосбора и селевого русла (наличия прорываоопасных озер и заторных водоемов, поворотов и извилистости русла, обвальных и оползневых береговых склонов и др.) и может намного (в несколько раз) превышать величину приведенного (условно-равномерного (Иогансон, 1959)) расхода селя  $Q_c$ , определяемого по (9). Значение  $Q_c^w$  для водотока-притока 1 порядка предлагается определять с учетом возможности его максимального проявления (Казаков, 2019), в том числе при заторности селевого русла (Гегиев, Чигирова, 2022; Флейшман, 1978; Байнатов, 1992; Перов, 2012; Смирнов, 1959; Виноградов, 1978), по зависимости:

$$Q_c^w = Q_c \xi + \Delta Q_{rus}, \quad (12)$$

в которой  $\Delta Q_{rus}$  – часть текущего расхода реки  $Q_{rus}$  (включая застойные и водоворотные зоны), захватываемая (присоединяемая) селевым валом из русла реки за счет опережающей скорости движения селя, определяемая по (Смирнов, 1959; Кавецкий, Смирнов, 1957);  $\xi$  – параметр, учитывающий заторные гидрогеоморфологические особенности водосбора и селевого русла, значения которого предлагается определять по новой оценочной формуле:

$$\xi = 1 + \sum_{i=1}^{i=16} k_i, \quad (13)$$

где коэффициенты  $k_i$  учитывают также и временные изменения состояния селевого русла, в том числе:

$k_1$  – наличие в русле водотока прорываоопасного заторного водоема (Кавецкий, Смирнов, 1957), принимается  $k_1 = 1.0$  при незначительном (менее половины) и  $k_1 = 2.0$  при существенном (более половины) его заполнения;

$k_2$  – наличие «скученности» (грушевидной, веерообразно-цирковидной (Непорожний, 1947; Смирнов и др., 1968; Смирнов, 1959) устьев притоков 2 порядка (2-3 и более) в русле водотока 1 порядка, принимается  $k_2 = 0.8-1.0$ ;

$k_3$  – выход в русле водотока устья бокового селевого притока 2 порядка, принимается  $k_3 = 0.5$  для узких (менее 10 м) и  $k_3 = 0.2$  для широких (более 10 м) водотоков;

$k_4$  – встречный выход с противоположных береговых склонов в русле водотока в едином створе устьев селевых притоков 2 порядка, принимается  $k_4 = 1.0$ ;

$k_5$  – наличие береговых оползневых массивов, принимается  $k_5 = 0.5$  при возможности полного перекрытия оползнем русла водотока,  $k_5 = 0.3$  при частичном и  $k_5 = 0.1$  при незначительном перекрытии русла;

$k_6$  – наличие повышенной сейсмичности рассматриваемого региона (6-8 баллов и более), принимается  $k_6 = 0.2-0.4$ ;

$k_7$  – наличие береговых лесных массивов (Непорожний, 1947) русле водотока стволов деревьев (длиной до 8-10 м и более), принимается отрицательное значение  $k_7 = -(0.1-0.2)$ ;

$k_8$  – наличие в русле водотока узких (менее 0.6-0.8 ширины водотока) «скальных ворот» (Непорожний, 1947; Шафиев, 2014), принимается  $k_8 = -(0.8-1.0)$ ;

$k_9$  – наличие в русле водотока крупных (размерами 2-3 м) «скатывающихся» валунов, принимается  $k_9 = -(0.2-0.3)$ ;

$k_{10}$  – наличие в русле участков (длиной 100 м) с резким расширением (4-5 раз) ширины водотока (Шафиев, 2014; Смирнов, 1959), принимается  $k_{10} = -(0.1-0.2)$ ;

$k_{11}$  – наличие в русле участков с резким расширением ширины водотока и уменьшением его уклона (менее 0.04-0.06) (Смирнов, 1959), принимается  $k_{11} = -(0.2-0.3)$ ;

$k_{12}$  – наличие в русле водотока извилистости и резких поворотов (до  $60^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ) (Непорожний, 1947; Шафиев, 2014; Соколовский, 1947; Смирнов, 1959; Кавецкий, Смирнов, 1957), принимается  $k_{12} = -(0.1\text{-}0.3)$ ;

$k_{13}$  – наличие в русле водотока уступов и водопадов (высотой до 6-8 м и более), принимается  $k_{13} = -(0.4\text{-}0.5)$ .

Для случаев гляциально-дождевых селей дополнительно учитываются:

$k_{14}$  – наличие прорываоопасных приледниковых озер, принимается  $k_{14} = 0.4\text{-}0.5$ ;

$k_{15}$  – наличие внутриледниковых полостей и водоемов, принимается  $k_{15} = 0.3\text{-}0.4$ ;

$k_{16}$  – наличие в водосборе концевых выходов («языков») ледника, принимается  $k_{16} = 0.1\text{-}0.2$ .

Следует указать, что при значениях параметра  $\xi \leq 1$  в формуле (13) величина его в (12) принимается равной  $\xi = 1$ , то есть в этом случае селевой поток переходит в паводково-наносоводный режим с расходом, равным  $(Q_{pav} + \Delta Q_{rus})$ .

Таким образом, формулы (1)-(13) позволяют определять для рассматриваемого региона Центрального Кавказа территориально максимальные ливневые расходы водотоков и прогнозируемые волновые расходы селевых потоков с учетом гидрографических особенностей водосборного бассейна и селевого русла. При этом значения параметров (площади водосбора, длины водотока, отметки и уклоны русла и др.), а также различные значения коэффициентов  $k_i$ , позволяющие учитывать изменения геоморфологии во времени, могут быть определены на основе данных натурных маршрутных обследований и дистанционных измерений, архивных и литературных источников и др.

## Заключение

В условиях высотной изменчивости климатических и географических характеристик горных и предгорных территорий проблема изучения склонового (дождевого) стока имеет важное значение для определения параметров как паводковых, так и селевых потоков. Горные территории отличаются сложной геоморфологией, малыми площадями водосборов, большими уклонами русел водотоков, наличием наносоводных и селевых потоков с заторно-волновым характером их движения и др. Поэтому оценка паводковой и селевой опасности горных водотоков является важным и актуальным вопросом в обеспечении безопасности жизнедеятельности данных территорий, создающей основу для геофизического моделирования склонового стока.

В работе представлены расчетные результаты в виде аналитических зависимостей для определения максимальных территориальных значений ливневого и селевого расходов для региона Центрального Кавказа (с основными реками Баксан, Чегем, Черек), значения которых дают достаточно близкое соответствие (со среднеарифметической погрешностью  $+4.6\%$ ) с известными базовыми значениями ливневых расходов для 16 водотоков, впервые просчитаны также указанные параметры еще для 16 водотоков данного реги-

она. Кроме этого, результаты предлагаемых формул для р. Ашамба Краснодарского края весьма близко (+5.2%) согласуются с независимыми данными МГУ (Архипкин, 2013). Предложена зависимость для нахождения максимального (волнового) расхода селевого потока с учетом 16 гидрографических особенностей водосборного бассейна и селевого русла водотока.

*Работа выполнена в рамках тем Государственного задания ИПМА КБНЦ РАН № 122041800015-8 и ИВП РАН № FMWZ-2022-0001.*

## **Список литературы**

Анахаев, К.Н. и др. (2016). *Методические рекомендации по обеспечению противоселевой безопасности объектов экономики*, ВГИ, Нальчик, 60 с.

Архипкин, В.С., Добролюбов, С.А., Мухаметов, С.С., Недоспасов, А.А., Самборский, Т.В., Самсонов, Т.Е., Серебренникова, Е.А., Суркова, Г.В. (2013) Экстремальный дождевой паводок в бассейне р. Ашамба и его влияние на рельеф дна и структуру вод моря в районе г. Геленджик, *Вестник Московского университета, Серия 5, География*, № 3, с. 27-34.

Байнатов, Ж.Б. (1992) *Защита от селевых потоков*, М., 79 с.

Виноградов, Ю.Б. (1978) Методы расчета основных характеристик селевых потоков, *Тезисы докладов XV Всесоюз. н.-тех. конф. по противоселевым мероприятиям*, 27-29 сентября 1978 г., г. Ташкент, вып. 2, с. 9-14.

Гегиев, К.А., Амшоков, Б.Х., Чигирова, Л.Б., Анахаев, А.А. (2022) Последствия антропогенного воздействия на бассейн р. Гижgit КБР, *Сб. науч. трудов Всерос. научно-практической конф., "Инновационные решения в строительстве, природообустройстве и механизации с/х производства"*, 2 июня 2022 г., КБГАУ, Нальчик, с. 37-42.

Гегиев, К.А., Чигирова, Л.Б. (2022) Методы определения максимальных значений гидрологических параметров малых горных рек Северного Кавказа (на примере КБР), *Грозненский естественнонаучный бюллетень*, т. 7, № 4 (30), с. 39-46.

Запорожченко, Э.В. (2003) Селевые процессы ливневого генезиса на антропогенно-природном фоне, *Сб. научных трудов СКГВХ*, вып. 16, Пятигорск, с. 36-48.

Запорожченко, Э.В., Докукин, М.Д. (2019) Тырныаузское хвостохранилище – объект повышенного экологического риска, *Устойчивое развитие горных территорий*, т. II, М., с. 224-237.

Запорожченко, Э.В., Каменев, Н.С. (2011) Селевой поток по р. Сылык-Суу 20 июля 2010 г., *Мелиорация и водное хозяйство*, № 5, с. 6-9.

*Инструкция по определению расчетных характеристик дождевых селей* (1976) ВСН 03-76, ГМИ, Л., 29 с.

Инюхин, В.С., Макитов, В.С., Суслов, В.В. (2013) Сопоставительный

анализ данных радиолокационных и наземных измерений ливневых осадков, *Известия КБНЦ РАН*, № 1(51), с. 47-55.

Иогансон, В.Е. (1959) О гидрологическом изучении селевых бассейнов, *Материалы IV Всесоюзной конф. по селевым потокам*, Алма-Ата, с. 7-20.

Кавецкий, С.П., Смирнов, И.П. (1957) Селевые паводки неливневого происхождения, *Труды КазНИГМИ*, вып. 9, с. 43-52.

*Кадастр лавинно-селевой опасности Северного Кавказа* (2001) ВГИ, 112 с.

Казаков, Н.А. (2019) К вопросу о расчете селевых расходов и высших селевых горизонтов 1% и 5% обеспеченности, *Гидросфера. Опасные процессы и явления*, т. 1, вып. 2, с. 296-301.

Кидяева, В.М., Петраков, Д.А., Крыленко, И.Н., Алейников, А.А., Штодфел, М., Граф К. (2018) Опыт моделирования Башкирских озер, *Геориск*, т. 12, № 2, с. 38-46.

Непорожний, П.С. (1947) *Защита гидроэлектростанций от селевых потоков*, М.-Л., ГЭИ, 164 с.

Перов, В.Д. (2012) *Селеведение*, МГУ, М., 271 с.

Сейнова, И.Б., Золотарев, Е.А. (2001) *Ледники и сели Приэльбрусья*, МГУ, М., 203 с.

Смирнов, И.П., Деговец, А.С., Жиркевич, А.Н. (1968) Методика расчета основных характеристик ливневых селей на территории Казахской ССР, *Доклады X Всесоюз. конф. по селевым потокам и горным русловым процессам*, АН Арм ССР, Ереван, с. 135-148.

Смирнов, И.П. (1959) О формировании и динамике селевых потоков, *Труды КазНИГМИ*, вып. 2, с. 52-61.

*СНиП 2.01.14-83 (1985) Определение расчетных гидрологических характеристик*, М., 36 с.

Соколовский, Д.Л. (1947) Селевые паводки, их гидрологические особенности и методика расчета, *Метеорология и гидрология*, с. 65-75.

СП 33-101-2003 (2004) *Определение основных расчетных гидрологических характеристик*, М., Госстрой России.

*Схема инженерной защиты городов и населенных пунктов КБАССР от опасных геологических процессов* (1987) Ч. III, СКГВХ, Пятигорск, 86 с.

Флейшман, С.М. (1978) *Сели*, Л., ГМИ, 312 с.

Херхеулидзе, И.И. (1947) *Овражные и селевые выносы*, М., Дориздат, 97 с.

Шафиев, Г.В. (2014) Природные угрозы, связанные с прорываопасными озерами Горного Бадахшана в бассейне реки Шахдара (Таджикистан), *Геориск*, № 1, с. 40-45.

---

## References

- Anakhaev, K.N. et al. (2016) *Metodicheskiye rekomendatsii po obespecheniyu protivoselevoy bezopasnosti ob'yektor ekonomiki* [Methodological recommendations for ensuring mudflow safety of economic facilities], WGI, Nalchik, Russia, 60 p.
- Arkipkin, V.S., Dobrolyubov, S.A., Mukhametov, S.S., Nedospasov, A.A., Samborsky, T.V., Samsonov, T.E., Serebrennikova, E.A., Surkova, G.V. (2013) *Ekstremal'nyy dozhdevoy pavodok v basseyne r. Ashamba i yego vliyanije na rel'yef dna i strukturu vod morya v rayone g. Gelendzhik* [Extreme rain flood in the Ashamba River basin and its effect on the bottom relief and the structure of sea waters in the district of Gelendzhik], *Vestnik Moskovskogo Universiteta, Seriya 5, Geografiya*, no. 3, pp. 27-34.
- Bainatow, J.B. (1992) *Zachita ot selevych potokow* [Protection against mudflows], Moscow, 79 p.
- Winogradov, J.B. (1978) *Metodi rascheta osnovnich harakteristik selevych potokow* [Methods for calculating the main characteristics of mudflows], *Tezisy dokladov XV Vsesoyuznoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii po protivoselevym meropriyatiyam, 27-29 sentyabrya 1978 g.* [Abstracts of the XV All-Union Scientific and Technical Conference on Anti-Mudflow Measures, September 27-29, 1978, Tashkent], vol. 2, USSR, pp. 9-14.
- Gegiev, K.A., Amshokov, B.H., Chigirova, L.B., Anakhaev, A.A. (2022) *Posledstviya antropogenного vozdeystviya na basseyn r. Gizhgiti KBR* [Consequences of anthropogenic impact on the river basin Gizhgiti KBR], *Sb. nauch. trudov Vseros. nauchno-prakticheskoy konf., "Innovatsionnyye resheniya v stroitel'stve, prirodoobustroystve i mekhanizatsii s/kh proizvodstva"*, 2 iyunya 2022 g. [Sat. scientific works of Vseros. scientific and practical conference, "Innovative solutions in construction, environmental management and mechanization of agricultural production", June 2, 2022], KBGAU, Nalchik, Russia, pp. 37-42.
- Gegiev, K.A., Chigirova, L.B. (2022) *Metody opredeleniya maksimal'nykh znacheniy gidrologicheskikh parametrov malykh gornykh rek Severnogo Kavkaza (na primere KBR)* [Methods for determining the maximum values of hydrological parameters of small mountain rivers of the North Caucasus (using the example of the Kabardino-Balkarian Republic)], *Groznenskiy yestestvennonauchnyy byulleten'*, vol. 7, no. 4 (30), pp. 39-46.
- Zaporogchenko, E.W. (2003) *Selevyye protsessy livnevogo genezisa na antropogenno-prirodnom fone* [Mudflow processes of storm genesis on an anthropogenic-natural background], *Sb. Nauchnich trudov SKGWH* [Sat. scientific works of SKGVH], vol. 16, Pyatigorsk, Russia, pp. 36-48.
- Zaporogchenko, E.W., Dokukin, M.D. (2019) *Tyrnyauzskoye khvostokhranilishche – ob'yekt povyshennogo ekologicheskogo riska, Ustoichivoye razvitiye gornykh territoriy* [Tyrnyauz tailings dump is an object of

increased environmental risk], *Ustoichiwoe rasvitie gornich territorij* [Sustainable development of mountain areas], vol. II, Moscow, Russia, pp. 224-237.

Zaporogchenko, E.W., Kamenev, N.S. (2011) Selevoy potok po r. Sylyk-Suu 20 iyulya 2010 g. [Debris flow along the river. Sylyk-Suu July 20, 2010], *Melioraziy I wodnoe hozistwo*, no. 5, pp. 6-9.

*Instruktsiya po opredeleniyu raschetnykh kharakteristik dozhdevykh seley* [Instructions for determining the design characteristics of rain mudflows] (1976) VSN 03-76, GMI, Leningrad, Russia, 29 p.

Inyukhin, V.S., Makitov, V.S., Suslov, V.V. (2013) Sopostavitel'nyy analiz dannykh radiolokatsionnykh i nazemnykh izmereniy livnevykh osadkov [Comparative analysis of data from radar and ground-based measurements of rainfall], *Izvestia KBSC RAS*, no. 1(51), pp. 47-55.

Loganson, V.Ye. (1959) O gidrologicheskem izuchenii selevykh basseynov [On the hydrological study of mudflow basins], *Materialy IV Vsesyuznoy konf. po selevym potokam* [Materials of the IV All-Union Conference along mudflows], Alma-Ata, USSR, pp. 7-20.

Kavetsky, S.P., Smirnov, I.P. (1957) Selevyye pavodki nelivnevogo proiskhozhdeniya [Mudflows of non-storm origin], *Trudy KazNIGMI* [Proceedings of KazNIGMI], vol. 9, pp. 43-52.

*Kadestr lavinno-selevoy opasnosti Severnogo Kavkaza* [Inventory of avalanche and mudflow hazard in the North Caucasus] (2001) VGI, Russia, 112 p.

Kazakov, N.A. (2019) K voprosu o raschete selevykh raskhodov i vysshikh selevykh gorizontov 1% i 5% obespechennosti [On the issue of calculating mudflow flows and higher mudflow horizons of 1% and 5% probability], *Gidrosfera. Opasnyye protsessy i yavleniya*, vol. 1, no. 2, pp. 296-301.

Kidyaeva, V.M., Petrakov, D.A., Krylenko, I.N., Aleinikov, A.A., Stoffel, M., Graf K. (2018) Opyt modelirovaniya Bashkarinskikh ozer [Experience in modeling the Bashkarinsky lakes], *Georisk*, vol. 12, no. 2, pp. 38-46.

Neporozhny, P.S. (1947) *Zashchita gidroelektrostantsiy ot selevykh potokov* [Protection of hydroelectric power plants from mudflows], SEI, Moscow-Leningrad, USSR, 64 p.

Perov, V.D. (2012) *Selevedeniye* [Agriculture studies], Moscow State University, Moscow, Russia, 271 p.

Seynova, I.B., Zolotarev, E.A. (2001) *Ledniki i seli Priel'brus'ya* [Glaciers and mudflows of the Elbrus region], Moscow State University, Moscow, Russia, 203 p.

Smirnov, I.P., Degovets, A.S., Zhirkevich, A.N. (1968) Metodika rascheta osnovnykh kharakteristik livnevykh seley na territorii Kazakhskoy SSR [Methodology for calculating the main characteristics of storm mudflows on the territory of the Kazakh SSR], *Doklady X Vsesoyuz. konf. po selevym potokam i gornym ruslovym protsessam, AN Arm SSR* [Reports of the X All-Union. conf. on

---

mudflows and mountain channel processes], Academy of Sciences of the Armenian SSR, Yerevan, USSR, pp. 135-148.

Smirnov, I.P. (1959) O formirovani i dinamike selevykh potokov [On the formation and dynamics of mudflows], *Trudy KazNIGMI* [Proceedings of KazNIGMI], vol. 2, pp. 52-61.

SNiP 2.01.14-83 (1985) *Opredeleniye raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Determination of calculated hydrological characteristics], Moscow, Russia, 36 p.

Sokolovsky, D.L. (1947) Selevyye pavodki, ikh hidrologicheskiye osobennosti i metodika rascheta [Mudflows, their hydrological features and calculation methods], *Meteorologiya i hidrologiya*, pp. 65-75.

SP 33-101-2003 (2004) *Opredeleniye osnovnykh raschetnykh hidrologicheskikh kharakteristik* [Determination of the main calculated hydrological characteristics], Gosstroy of Russia, Moscow, Russia.

*Skhema inzhenernoy zashchity gorodov i naselennykh punktov KBASSR ot opasnykh geologicheskikh protsessov* [Scheme of engineering protection of cities and settlements of the KBASSR from hazardous geological processes] (1987) Part III, SKGVH, Pyatigorsk, Russia, 86 p.

Fleishman, S.M. (1978) *Seli* [Seli], Leningrad, Russia, 312 p.

Kherkheulidze, I.I. (1947) *Ovrazhnyye i selevyye vynosy* [Gully and mudflows], Dorizdat, Moscow, Russia, 97 p.

Shafiev, G.V. (2014) Prirodnyye ugrozy, svyazannyye s proryvoopasnymi ozerami Gornogo Badakhshana v basseyne reki Shakhdara (Tadzhikistan) [Natural threats associated with outburst-hazardous lakes of Gorno-Badakhshan in the Shahdara river basin (Tajikistan)], *Georisk*, no. 1, pp. 40-45.

Поступила в редакцию: 15.09.2023 г.

Доработана после рецензирования: 27.10.2023 г.

Принята к публикации: 06.11.2023 г.

#### **Для цитирования / For citation:**

Анахаев, К.Н., Беликов, В.В. (2023) О моделировании склонового стока на горных и предгорных водосборах, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 4, с. 386-402, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-386-402.

Anakhaev, K.N., Belikov, V.V. (2023) About modeling of slope runoff on mountain and foothill catchments, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 9, no. 4, pp. 386-402, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-386-402.