

Усовершенствование модели селевых кадастров с использованием расчетной оценки склонового стока

К.Н. Анахаев^{1,2)}, В.В. Беликов²⁾, А.А. Анахаев³⁾*

¹⁾ Институт прикладной математики и автоматизации Кабардино-Балкарского
научного центра РАН,
Россия, 360000, г. Нальчик, ул. Шортанова, 89а

²⁾ Институт водных проблем РАН,
Россия, 119333, Москва, ул. Губкина, 3

³⁾ Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова,
Россия, 360030, Нальчик, пр. Ленина, 1в

*Адрес для переписки: anaha13@mail.ru

Реферат. Современные изменения климата – один из факторов увеличения частоты экстремальных явлений, в том числе в горных ландшафтах. Последние десятилетия характеризуются интенсивным освоением природных ландшафтов горных территорий Северного и Западного Кавказа путем строительства промышленных, сельскохозяйственных, дорожных, рекреационных и спортивных объектов. Это усиливает риск неблагоприятных и опасных последствий экстремальных погодных явлений. Эффективность проектируемых защитных мероприятий от негативного воздействия селевых и водно-селевых потоков во многом зависит от достоверности используемых исходных гидрогеофизических характеристик водосборов в моделях селевых кадастров. Однако, устаревшая структура последних не позволяет в достаточной полной и обоснованной мере выявлять такие важнейшие особенности водосборов, как однозначную идентификацию селевых и водно-селевых потоков, дифференцированную селеопасность территорий, гидрогеофизические характеристики водосборов, максимальные (руслоформирующие) расходы дождевых и селевых потоков и др. Предложенные усовершенствования исходных параметров в моделях селевых кадастров позволяют во многом преодолеть указанные недостатки и улучшить методологическую базу для последующего формирования математических моделей селевых процессов. При этом используется предложенная авторами новая методика расчета.

Ключевые слова. Модель селевого кадастра, водосбор, дождевой сток, селевой бассейн, поток, селеопасность территорий, уклон русла, водно-селевой кадастр, нагорная канава.

Improvement of the mudflow inventory model using the estimates of slope runoff

K.N. Anakhaev^{1,2)}, V.V. Belikov²⁾, A.A. Anakhaev³⁾*

- 1) Institute of Applied Mathematics and Automation of the Kabardino-Balkarian Scientific Center of the RAS,
89a, Shortanov St., 360000, Nalchik, Russian Federation
- 2) Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences (IVP RAS),
3, Gubkin St., 119333, Moscow, Russian Federation
- 3) Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov,
1v, Lenin Ave., 360030, Nalchik, Russian Federation

*Correspondence address: *anaha13@mail.ru*

Abstract. Modern climate change is one of the factors increasing the frequency of extreme events, including in mountain landscapes. The last decades have been characterized by intensive development of natural landscapes of the mountainous territories of the Northern and Western Caucasus through the construction of industrial, agricultural, road, recreational and sports facilities. This increases the risk of adverse and dangerous consequences of extreme weather events. The effectiveness of the designed protective measures against the negative impact of mudflows and water-mudflows largely depends on the reliability of the initial hydrogeophysical characteristics of catchments used in mudflow cadastres models. However, the outdated structure of the latter does not allow to identify in a sufficiently complete and reasonable manner such key features of catchments as unambiguous identification of mudflow and mudflow-water courses, specific mudflow hazard of territories, hydrogeophysical characteristics of catchments, maximum (channel-forming) discharges of rain and mudflow flows, etc. The proposed improvements to the initial parameters in mudflow cadastres models allow to overcome these shortcomings in many respects and improve the methodological base for the subsequent formation of mathematical models of mudflow processes. In this case, the new calculation method proposed by the authors is used.

Keywords. Mudflow cadastre model, catchment, rainfall runoff, mudflow basin, flow, mudflow hazard of territories, channel slope, mudflow-water cadastre, interfluve.

Введение

Одной из наиболее актуальных и злободневных проблем при освоении (промышленном, сельскохозяйственном, дорожном, рекреационном, спортивном и др.) горных и предгорных территорий является обеспечение безопасности населенных пунктов и объектов экономики от негативного воздействия водных и селевых потоков. В последние десятилетия на Северном и Западном Кавказе наблюдается существенное развитие и активизация указанных склоновых явлений, которые, нередко, возникают там, где они ранее не наблюдались – что в полной мере наглядно проявилось при строительстве Олимпийских объектов на горном кластере «Красная Поляна» (Анахаев и др., 2016; Анахаев и др., 2023). Изложенное обуславливает необходимость разработки математических моделей селевых процессов на основе достоверных исходных данных гидрогеофизических характеристик водосборов.

Как известно, основными условиями схода селевых потоков являются:

- наличие на водосборном бассейне речной сети малых водотоков (небольших речек, речушек, балок-суходолов) с уклонами русел, превышающими 0.1 (Флейшман, 1978; Перов, 1990; Анахаев и др., 2016; Анахаев и др., 2023);
- наличие в русле и береговых склонах водотоков значительных объемов оползневых и осыпных грунтовых масс, камней, древесных остатков, коряг и др.;
- возможности возникновения в руслах водного потока (от дождевых осадков, прорывов озер, водоемов), достаточного для концентрированного размыва сосредоточенных в них потенциально-селевых масс, что является определяющим условием возникновения селей.

Методы и материалы

Следует отметить (Анахаев, Антоненко, 2014; Методические рекомендации, 2016; Анахаев и др., 2021; Анахаев и др., 2023), что селевой бассейн (рис. 1а) является более «обширным» понятием, чем водосборный бассейн (4), поскольку включает в себя дополнительные территории, не являющиеся водосборными для селевого русла (2), но подпадающие под прямое воздействие селевого потока, такие как: поверхность конуса выноса (7), селевая запруда (8), затапливаемая пойма (9), основной реки долины (в случаях возможности перекрытия ее), а также участок «сепарации» (10) крупных глыбовых селевых отложений в русле основной реки. Селевой бассейн в общем случае включает в себя один или несколько селевых очагов (6), как правило, срабатывающих одновременно.

Формирование дождевых стоков на горных территориях (в отличие от равнинных) определяется их гидрогеофизическими особенностями, такими, как (Анахаев, Беликов, 2023):

- относительно малые площади водосборов и большие уклоны русел (и склонов) водотоков-притоков с возможностями возникновения в них паводковых и селевых потоков;
 - более быстрое поступление расходов воды в замыкающие створы;
 - возможность выпадения дождевых осадков одновременно на всей территории водосбора;
 - большая насыщенность наносоводных и селевых потоков твердой составляющей и заторно-волновой характер их движения;
 - наличие твердой составляющей и заторно-волновой характер их движения;
 - наличие водопадов (уступов) и резко изменяющихся уклонов русла водотока;
 - разветвляющиеся (на 2-3) и сложносоставные водосборы, включающие внутренние локализованные селевые водосборы (рис. 1б), для которых использование методики «единого» водотока не вполне обосновано;
 - возможность значительных «разовых» размывов дна и береговых склонов с оползаниями и обрушениями последних и др.
-

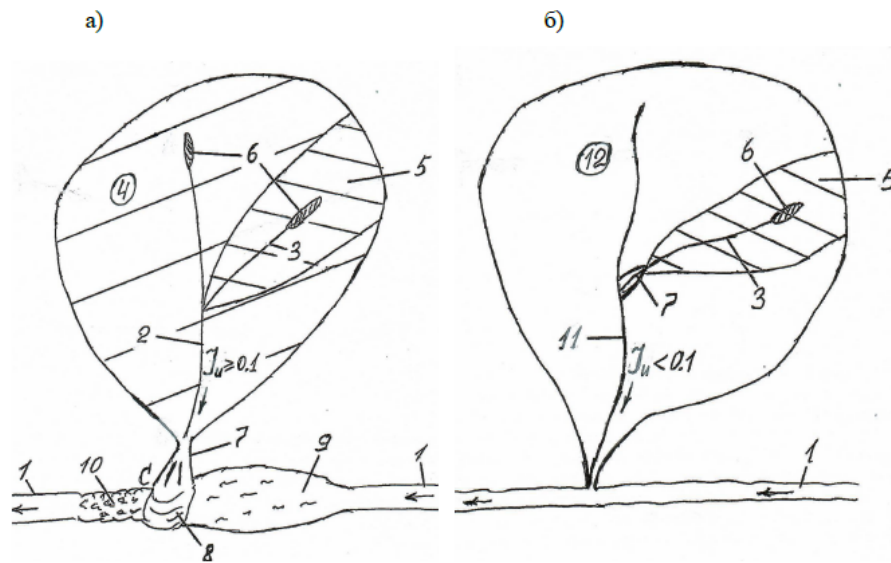


Рисунок 1. Схема селевого (а) и водно-селевого (б) бассейнов

1 – основная река долины; 2 и 3 – селевые русла (уклоны $\sim > 0.1$) водотоков 1-го и 2-го порядка с селевыми водосборами 4 и 5; 6 – селевые очаги; 7 – конус выноса; 8 и 9 – селевая запруда и затопляемая пойма основной реки; 10 – зона «сепарации» крупных глыбовых отложений селя; 11 – неселевое русло (уклон $\sim < 0.1$) водотока 1-го порядка с водно-селевым водосбором 12, имеющим внутреннее локализованное селевое русло 3 (Анахаев и др., 2023; Анахаев, Беликов, 2023)

Figure 1. Diagram of mudflow (a) and water-mudflow (b) basins

1 – the main river of the valley; 2 and 3 – mudflow channels (slopes $\sim > 0.1$) of watercourses of the 1st and 2nd order with mudflow catchments 4 and 5; 6 – mudflow foci; 7 – the cone of removal; 8 and 9 – mudflow dam and flooded floodplain of the main river; 10 – zone of "separation" of large block deposits of mudflow; 11 – non-mudflow channel (slope $\sim < 0.1$) of the 1st order watercourse with a water-mudflow catchment 12, having an internal localized mudflow channel 3 (Anakhaev et al., 2023; Anakhaev, Belikov, 2023)

В таких условиях для создания математических моделей селевых процессов и проектирования надежных и рациональных защитных сооружений от вредного воздействия водных и селевых потоков весьма важное значение имеет правильный выбор исходных гидрогеофизических характеристик водосборов и селевых бассейнов с достоверными значениями их параметров (Анахаев и др., 2021), систематизируемых, как правило, в наиболее «легитимных» изданиях – селевых кадастрах (Кадастр, 2001 и др.). В последних, как правило, необходимо в достаточно полной и обоснованной мере отразить важнейшие особенности водосборов, в частности:

– однозначно идентифицировать типы и местоположения водотоков селевых и водно-селевых водосборов (с внутренними селевыми бассейнами: локализованными, частными самостоятельными, «островными», «слепыми») (Смирнов, 1957; Черноморец, 1991; Перов, 2012; Анахаев и др., 2021; Анахаев и др., 2023) (рис. 1). Следует особо подчеркнуть, что разграничение водотоков водно-селевых и селевых водосборов имеет чрезвычайно важное

значение, поскольку определяет на какие расходы рассчитывать защитные инженерные сооружения – на максимальные водные расходы или в два и более раз превышающие их селевые расходы (Соколовский, 1947; Байнатов, 1992; Анахаев, Беликов, 2023);

– дифференцированно оценить селеопасность территорий в соответствии с реальными характеристикам селевых бассейнов;

– оценить реальные длины рек, так как во многих случаях они недопустимо завышены и ошибочно приняты равными суммарной длине основной реки и всех ее притоков;

– получить прогнозные данные по максимальному (руслоформирующему) расходу дождевых стоков и условно-равномерному и максимально-волновому расходам селевых потоков и др.

Более того, «новые» результаты по объемам селевых выносов оказались во многом недостоверными (Анахаев, 2018; Анахаев, 2019; Анахаев, Беликов, 2020а; Анахаев, Беликов, 2020б) и др.

Как следует из изложенного, очевидным образом назрела необходимость разработки усовершенствованной модели структуры селевого кадастра, в котором будут учтены и проработаны такие важные характеристики водосборов, как:

- адресная нумерация и уточненное местоположение водосбора;
- площади водосборного бассейна (F) и селеопасных территорий (F_s) в ней;
- дифференциация местоположений селеопасных территорий;
- длины русла (L) и конуса выноса (l_k) водотока;
- отметки местоположений истока (V_l), средней части (V_m), вершины конуса выноса (V_k) и устья (V_u) водотока;
- уклоны русла водотока (среднерусловые, нижней приустьевой половины русла);
- расчетные максимальные дождевые (руслоформирующие) расходы водотоков;
- прогнозируемые условно-равномерные и максимально-волновые селевые расходы и «пиковые» высоты селевого вала;
- известные даты схода предыдущих селей, ущерб и последствия последних;
- угрозы населенным пунктам, объектам экономики, возможности перекрытия (полного, частичного) селевыми выносами основной реки бассейна;
- имеющиеся защитные сооружения, их достаточность.

Результаты

Нумерация водосборов. Принятая в настоящее время сплошная нумерация селевых притоков начинается от устья водотока и поднимается по левому берегу русла до истока, обогнув который спускается обратно вниз по течению по правому берегу до устья. Такая нумерация содержит следующие недостатки:

– в среднюю часть нумерации входят водосборы верховьев основной долинной реки с большим числом недостаточно изученных (из-за труднодо-

ступности, высокогорья – более 3000 м и др.) селевых русел и суходолов (Непорожний, 1947), что приводит к неопределенности и «сбою» всей нумерации водосбора при обнаружении здесь (и необходимости учета) новых селевых бассейнов;

– по номерам (кроме первых номеров) водосборов трудно однозначно идентифицировать даже на каком берегу они расположены, в частности, предлагалось левый и правый берега обозначать, соответственно, нечетными и четными цифрами (Непорожний, 1947);

– невозможность различения водно-селевых водосборов от селевых. Водно-селевыми будем называть водосборы с неселевыми (в нижнем течении) главными руслами – притоками 1-го порядка, имеющими внутрибассейновые частные локализованные селевые русла 2-го порядка. Причисление водно-селевых водосборов к селевым искусственно завышает площади селеопасных территорий;

– рассматриваемая нумерация еще более «запутывается» для случаев раздваивающихся ущелий одной базовой реки (Непорожний, 1947), так, при разделении р. Черек на две долинных основных рек Черек-Безенгийский и Черек-Балкарский линия нумерации водосборов волнообразно дважды огибает верховья указанных рек, что создает еще большие неопределенности и трудности при идентификации водосборов.

Для преодоления указанных недостатков предлагается дифференцированная (раздельная) по обоим берегам основной реки нарастающая нумерация водосборов притоков 1-го порядка селевых бассейнов с обозначениями по левому « $1L$ », « $2L$ »... и правому « $1R$ », « $2R$ »¹⁾... берегам русла водотока (рис. 2). В случаях же водно-селевых водосборов с внутренними локализованными селями вводятся обозначения со скобками в виде « $n(R)$ » – « n -й правый водно-селевой водосбор», либо более детально « $n(R)+1l+2l+1r$ » – « n -й правый водно-селевой водосбор с внутренними селевыми притоками 2-го порядка: первым и вторым слева, первым справа²⁾».

В привязке к бассейнам (долинам) основных рек региона притоки селевых и водно-селевых водосборов обозначаются с учетом номеров рек по кадастру (Кадастр, 2001), например:

Основная река Малка № 1, для которой:

– река Кичмалка имеет № 1-01 – предлагаемое обозначение № 1-1(L): 1 (от устья р. Малка) левый *водно-селевой* приток р. Малка с внутренними селями;

– река Куркужин имеет № 1-33 – предлагаемое обозначение № 1-1(R): 1 правый *водно-селевой* приток р. Малка с внутренними селями.

¹⁾Приводимые символы « L », « l » и « R », « r », соответственно, означают «левые» и «правые» берега притоков 1-го и 2-го порядков.

²⁾Рекомендуемая нумерация не охватывает водные притоки основных рек, в водосборах которых отсутствуют селевые притоки.

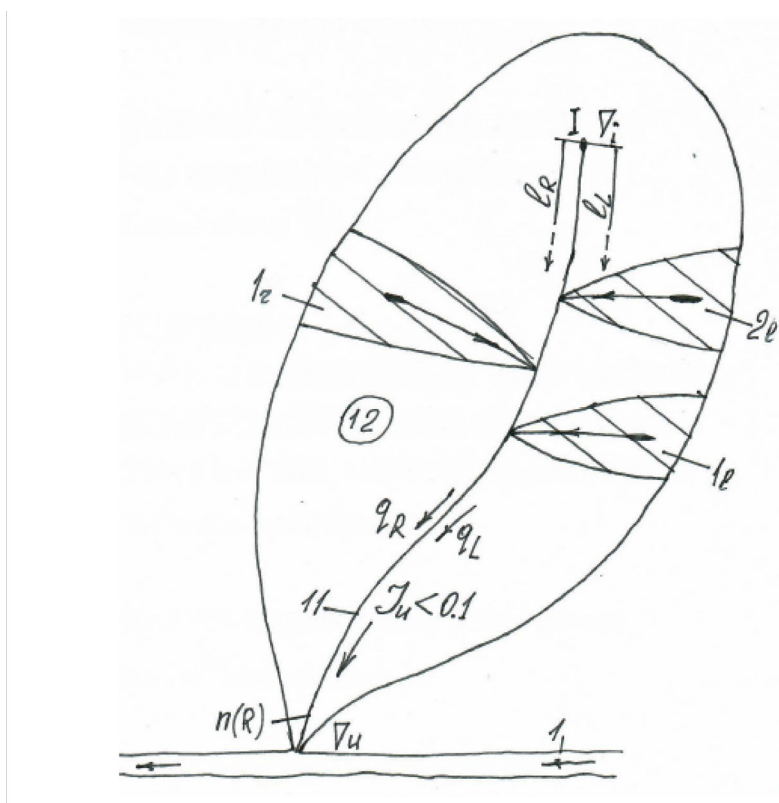


Рисунок 2. Схема водно-селевого водосбора $n(R)$ с внутренними локализованными селевыми бассейнами «1e», «2e» и «1r»
 Значения обозначений 1, 11, 12 приведены на рис. 1

Figure 2. Diagram of a mudflow catchment area with internal localized mudflow basins "1e", "2e" and "1r"
 The values of designations "1", "11", "12" are shown in Fig. 1

Основная река Баксан № 2, для которой:

- река Тызыл (Кенделен) имеет № 2-03 – предлагаемое обозначение № 2-3(L): 3 правый водно-селевой приток р. Баксан с внутренними селями;
- река Гижгит имеет № 2-09 – предлагаемое обозначение № 2-9(L): 9 левый водно-селевой приток р. Баксан с внутренними селями;
- река Герхожансу имеет №№ 2-45 – 2-15R предлагаемое обозначение №: 15 правый селевой приток р. Баксан.

Основная река Черек № 4.

Река Черек образуется на слиянии двух ущелий с основными реками – Черек-Безенгийский (№ 4Bez) и Черек-Балкарский (№ 4Bal), для которых:

- река Кара-суу (Безенгийский) имеет № 4-07 – предлагаемое обозначение № 4Bez-7(L): 7 левый водно-селевой приток р. Черек-Безенгийский с внутренними селями;
- река Тушхаркол (Ташлыккол) имеет № 4-31 – предлагаемое обозначение № 4Bez-2(R): 2 правый водно-селевой приток р. Черек-Безенгийский с внутренними селями;

– река Кара-суу (Балкарский) имеет № 4-33 – предлагаемое обозначение № 4Val-1(L): 1 левый *водно-селевой* приток р. Черек-Балкарский с внутренними селями;

– река Чайнашки имеет № 4-37 – предлагаемое обозначение № 4Val-4L: 4 левый *селевой* приток р. Черек-Балкарский;

– река Курунгу-суу имеет № 4-57 – предлагаемое обозначение № 4Val-1R: 1 правый *селевой* приток р. Черек-Балкарский.

Как видно из изложенного, предлагаемая методика по нумерации притоков выгодно отличается простой идентификацией селевых и водно-селевых бассейнов, большей детализацией и информативностью с указанием местоположения рассматриваемого притока и его селеносности.

Селеопасность территорий водосборов. Площадь селеопасных территорий F_s водосбора неправомерно приравнивают всей площади водосбора $F_s = F$ (на самом деле селеопасные площади охватывают только небольшую часть водосбора, около ~ 10-15% (Анахаев и др., 2021; Анахаев и др., 2023; Анахаев, Антоненко, 2014; Анахаев, 2018; Анахаев, 2019; Анахаев, Беликов, 2020а; Анахаев, Беликов, 2020b). Указанное не позволяет дифференцировано выделить отдельные селевые очаги и зоны опасного воздействия селей, ограничивая возможности разработки для них локальных противоселевых мероприятий.

Еще одной причиной существенного завышения селеопасных территорий является включение в категорию селевых бассейнов водно-селевых водосборов с неселевыми притоками, имеющих отдельные внутренние локализованные селевые русла 2-го порядка (Анахаев и др., 2021; Анахаев и др., 2023). Например, таковыми являются водно-селевые водосборы неселевых рек: – в бассейне *р. Малка*: Куркужин ($F=114.7 \text{ км}^2$); – в бассейне *р. Баксан*: Кенделен ($F=589.0$), Гижгит ($F=155.0$) и Гестанты ($F=140.0$) – на основе натурных обследований; – в бассейне *р. Черек-Безенгийский*: Ташлыккол ($F=30.8$), Кара-суу ($F=80.6$); – в бассейне *р. Черек-Балкарский*: Кара-суу ($F=51.4$), Ишкыргы (Рчи-Уашки-башы) ($F=52.5$); – в бассейне *р. Мзымта*: Галион-1 ($F=7.2$), Галион-2 ($F=12.3$), Галион-3 ($F=6.2$), Ачипсе-Лаура ($F=134.0$) и др.

В результате такого искусственного завышения количества и территорий селеопасных водосборов огромные площади совершенно безопасных (в отношении селей) земель необоснованно отнесены к селеопасным, что составило в общем по: Дагестану и Северной Осетии – 25%, Кабардино-Балкарии – 39%, Карачаево-Черкессии – 17% (Анахаев и др., 2021; Анахаев и др., 2023; Кадастр, 2015).

Вышеизложенное обосновывает необходимость внесения в усовершенствованную модель кадастр объективных данных по селеопасным территориям водосборов F_s с дифференциацией уровня селеопасности на основе детального анализа гидрогеоморфологических характеристик селевых бассейнов по (Анахаев и др., 2023; Анахаев, Антоненко, 2014). Для предварительной же оценки по (Анахаев, Антоненко, 2012; Анахаев, Антоненко, 2014; Анахаев и др., 2021) площади селеопасных территорий можно принять рав-

ными: $F_s \approx (0.10-0.08)f$ – для бассейнов селевых притоков 1-го порядка и $f_s \approx (0.05-0.08)f$ – для внутренних локализованных простых, частных (Непорожный, 1947; Перов, 2014) селевых бассейнов 2-го порядка с площадями f (значения F и f определяются по топографическим картам, геоинформационным системам и др.).

Длина селевого водотока (реки). Определение длины русла селевого водотока (реки) в виде «суммарной длины всех селеносных притоков данного бассейна» (Кадастр, 2015, с. 63), либо как «суммарную длину основного русла реки и всех его боковых притоков» (Кадастр, 2001; Залиханов и др., 2016 и др.; Кондратьева и др., 2017) неприемлемо ни для теоретических, ни для практических исследований (в особенности, для расчетов уклонов русла реки), более того, они могут оказать существенно вредное влияние на развитие селеведения. Поэтому в усовершенствованную модель кадастра считаем необходимым ввести нормативное определение длины русла водотока (реки) (Чеботарев, 2001) как расстояния (горизонтального) от истока реки до ее устья, при этом длина конуса выноса l_k будет равна расстоянию от вершины конуса выноса до устья реки.

Уклон русла водотока. Горные и предгорные селевые и водно-селевые бассейны с относительно малыми водосборами и большими перепадами высот (до нескольких сот метров) характеризуются, как правило, нелинейными продольными профилями водотоков с крутым падением в верхней части и более пологим профилем в нижней приустьевой половине русла. При этом очевидно, что уклон низовой половины русла I_u позволяет более правильно (в сравнении со средним уклоном всего русла) определять реальный характер движения и параметры водных и селевых потоков в основном русле, в том числе, в замыкающем створе – устье водотока.

Поэтому в усовершенствованную модель кадастра предлагается ввести наряду с величиной среднего уклона всего русла, также значения среднего уклона низовой половины русла I_u (Анахаев, Беликов, 2023), определяемого по формуле (в промилле, ‰):

$$I_u = \frac{\nabla_m - \nabla_k}{0.5L - l_k}, \quad (1)$$

где L и l_k – длины русла водотока и конуса выноса (км); ∇_m и ∇_k – высотные отметки местоположения средней части русла водотока и вершины конуса выноса (m), определяемые по географическим картам, геоинформационным системам и др. (при отсутствии конуса выноса значения l_k и ∇_k принимаются равными: $l_k = 0, \nabla_k = \nabla_u$).

Водный (дождевой) расход водотока. Водные (дождевые) расходы водотоков горных и предгорных водосборов являются важнейшим фактором формирования (и прогнозирования) паводков и возникновения селевых потоков, в связи с чем необходимо ввести эти данные в структуру усовершенствованного селевого кадастра. При этом, максимальные руслоформирующие

значения водных расходов Q_{max} (m^3/c) для рассматриваемых условий принимаются равными дождевым расходам 1% обеспеченности $Q_{max}=Q_{1\%}$, значения же последних для горных водотоков с небольшими водосборами ($\leq 200 \text{ км}^2$) и разнообразными гидрогеоморфологическими особенностями находятся по формуле предельной интенсивности стока (тип III) (СНиП 2.01.14-83, 1985, п. 4.18; СП 33-101-2003, 2004, п. 7.44; Анахаев, Беликов, 2023)

$$Q_{1\%} = q'_{1\%} \varphi H_{1\%} \delta F, \quad (2)$$

в которой для Северо-Кавказского региона принимаются упрощенные значения величин (Анахаев, Беликов, 2023):

$$\left. \begin{aligned} q'_{1\%} &= (0.5\gamma^3 - 3.7\gamma^2 - 1.43\gamma + 38.4) \cdot 10^{-2}, \quad \gamma = \ln|\Phi_p|; \\ \Phi_p &= \frac{1000L}{m_p I_u^m \sqrt[4]{F\varphi H_{1\%}}}; \quad \varphi = 0.15 \left(1 + \frac{L^2}{2F}\right), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\delta=1$ – коэффициент влияния озерности водосбора; $q'_{1\%}$ и $H_{1\%} = 120 \text{ мм}$ – соответственно, модуль стока и максимальный суточный слой осадков 1%-обеспеченности; $|\Phi_p|$ – модуль гидрогеоморфологической характеристики русла; φ – сборный коэффициент стока; параметры $m_p=10$ (м/мин) и $m=0.143$ – параметры гидравлического состояния и шероховатости русла; I_u – средний уклон низовой половины русла, определяемый по (1).

Сравнение максимальных значений ливневых расходов $Q_{max}=Q_{1\%}$, подсчитанных по указанным формулам, с известными базовыми значениями для 16 различных притоков основных рек Баксана, Чегема, Черка (Схема, 1987; Сейнова, Золотарев, 2001) при значении $H_{1\%}=120 \text{ мм}$ дало приемлемое соответствие (со средней погрешностью + 4.6 %) (Анахаев, Беликов, 2023).

Значения расходов для других $p(\%)$ обеспеченностей ($Q_{p\%}$) находятся по известной величине $Q_{1\%}$ с использованием переходного коэффициента λ (Анахаев, Беликов, 2023), в виде:

$$Q_{p\%} = Q_{1\%} \cdot \lambda, \quad \lambda = 1 - 0.173 \cdot \ln(p\%). \quad (4)$$

На практике в ряде случаев возникает необходимость определения интенсивности распределенного поступления удельных расходов дождевого стока вдоль (левого q_L и правого q_R) берегов русла водотока, например, при проектировании нагорных и ловчих каналов, профиля автодороги и др. Для нахождения значений q_L и q_R в водосборах с одиночным руслом (без притоков 2 порядка) рекомендуются следующие зависимости:

$$q_L = \frac{Q_{1\%} F_L}{(L - l_k) F}, \quad q_R = \frac{Q_{1\%} F_R}{(L - l_k) F}, \quad (5)$$

в которых F – площадь рассматриваемого водосбора, а F_L и F_R – значения площадей водосбора, соответственно, с левой и правой стороны от русла водотока.

При этом величины текущих расходов по левому q_L и q_R правому берегам в нарастающем порядке от истока ∇_I до заданного створа на расстоянии l от истока водотока ∇_I будут равны

$$q_L = q_L \cdot l; \quad q_R = q_R \cdot l. \quad (6)$$

Из формул (6) при значениях $l = L - l_k$ получаются величины полных расходов по левому Q_L и правому Q_R берегам в виде:

$$Q_L = Q_{1\%} \frac{F_L}{F}; \quad Q_R = Q_{1\%} \frac{F_R}{F}. \quad (7)$$

В случаях же разветвляющихся и сложносоставных водосборов с несколькими притоками (водосборами) 2-го порядка значения текущих расходов q_L и q_R (от истока до заданных точек основного русла водотока) находятся по нижеследующему примеру водно-селеевого водосбора неселевого n -го правого притока 1-го порядка с тремя внутренними локализованными селеевыми бассейнами 2-го порядка $n(R)+1l+2l+1r$ (рис. 2):

– определяется «остаточный» расход водосбора $Q_{1\%}$ за вычетом расходов водосборов 2-го порядка q_{1L}, q_{2L}, q_{1R} , подсчитываемых по методике формул (1)-(3), от основного расхода $Q_{1\%}$ в виде:

$$Q_{1\%} = Q_{1\%} - q_{1L} - q_{2L} - q_{1R}; \quad (8)$$

– подсчитывается «остаточная» площадь водосбора F за вычетом площадей водосборов 2-го порядка от площади рассматриваемого водосбора F

$$F = F - f_{1L} - f_{2L} - f_{1R}; \quad (9)$$

– величины удельных расходов дождевого стока вдоль левого q_L и правого q_R берегов определяются по формулам (5), подставляя в них вместо $Q_{1\%}$ значение $Q_{1\%}$ и $l_k=0$;

– величина нарастающего текущего расхода по левому берегу q_L от истока водотока (точки I) до заданного створа на расстоянии l_L от истока находится для интервалов: $0 \leq l_L^I < l_{I-1R}$; $l_{I-2L} \leq l_L^{II} < l_{I-1L}$ и I , соответственно, по формулам:

$$q_L^I = q_L \cdot l_L^I; \quad q_L^{II} = q_L \cdot l_L^{II} + q_{2L}; \quad q_L^{III} = q_L \cdot l_L^{III} + q_{2L} + q_{1L}; \quad (10)$$

– величина нарастающего текущего расхода по правому берегу q_R от истока I до заданного створа на расстоянии l_R от истока водотока находится для интервалов $0 \leq l_{LR}^I < l_{I-1R}$ и $l_{I-1R} \leq l_R^{II} \leq L$, соответственно,

$$q_R^I = q_R \cdot l_R^I; \quad q_R^{II} = q_R \cdot l_R^{II} + q_{1R}. \quad (11)$$

Значения же нарастающего текущего расхода по всему руслу водотока от истока I до заданного створа на расстоянии l рассчитывается аналогичным

образом суммированием текущих расходов по левому и правому берегам.

Величины полных расходов по левому Q_L и правому Q_R берегам будут равны:

$$Q_L = Q_{1\%} \frac{F_L}{F} + q_{2L} + q_{1L}; \quad Q_R = Q_{1\%} \frac{F_R}{F} + q_{1R}. \quad (12)$$

Селевые расходы водотоков. В зависимости от характера движения селевого потока его расход определяется для двух режимов: условно-равномерного и максимально-волнового.

Для условно-равномерного движения селя предварительное значение селевого расхода Q_c может быть определено по известной зависимости (Байнатов, 1992; Перов, 2012; Анахаев, Беликов, 2023):

$$Q_S = (1 + \beta) Q_{pav}, \quad (13)$$

в которой Q_{pav} – паводковый расход, принимаемый равным $Q_{1\%}$; β – весовое наносоводное отношение, значение которого (для объемного веса наносов 1.8 т/м^3) можно выразить на основе (Соколовский, 1947; Херхеулидзе, 1947; Анахаев, Беликов, 2023) через уклон низовой половины русла I_u (‰), определяемый по (1), в виде:

$$\beta = \frac{I_u^{0.4}}{11 - 0.55 I_u^{0.4}}. \quad (14)$$

Максимально-волновое (мгновенное) пиковое значение расхода селя Q_c^w (в виде селевого вала) определяется на основе детального изучения гидрогеоморфологических особенностей водосбора и селевого русла по 16 признакам (Анахаев, Беликов, 2023), в том числе, с учетом наличия прорывоопасных озер, заторных водоемов, поворотов, обвальных и оползневых береговых склонов, извилистости русла и др.

Считаем необходимым включение в усовершенствованный селевой кадастр значений максимальных водных (дождевых) расходов $Q_{1\%}$ и условно-равномерных расходов селя Q_c .

Определение же значений максимально-волнового (пикового) расхода селя Q_c^w требует специальных расчетов на основе детальных данных натурного обследования селевого бассейна, что может быть выполнено при непосредственном проектировании противоселевых сооружений на данном водотоке.

Объем единовременного селевого выноса. Объемы единовременных селевых выносов (используемые для оценки селеопасности водосбора) чрезвычайно сложно определять как теоретически, так и прикладными методами (в том числе, аэро-фото сканированием и др.), поскольку при сходе селя значительные объемы наносов «сепарируются» и уносятся основной рекой бассейна, часть наносов «фрагментировано» остается на транзитном участке селевого русла (Смирнов, 1957; Перов и др., 2012), часть «свежих» наносов откладывается на поверхности конуса выноса, наращивая очередным слоем

существующий «многослойный пирог» предыдущих выносов, поверхность которых также оседает со временем (из-за осадок, консолидации, размывов и др.). Поэтому точное определение объемов единовременных селевых выносов является сложной и многотрудной задачей, требующей детальных натурных обследований как всего селевого бассейна, так и отдельных «фрагментальных» селевых отложений, с использованием специальных устройств и оборудования, геодезических приборов и др. (Смирнов и др., 1957), а потому (при многочисленности селевых русел) неприемлемо для всеобщего использования. Таким образом, на практике объемы единовременных селевых выносов не могут быть оперативно оценены даже грубо приближенно («на глазок»), а потому не могут рассматриваться в качестве основы расчетного обоснования для научно-прикладных исследований, в частности, для инженерных расчетов при проектировании селепропускных и защитных сооружений в отличие от расходов и скоростей селя и др. (Анахаев, Беликов, 2020b). Изложенное дает основание для перевода данных максимальных единовременных селевых выносов в приложение усовершенствованного кадастра, имея в виду малочисленность достоверно полученных данных по ним, их «устаревания» в течение нескольких лет, а также крайней затрудненности проведения на регулярной основе инструментальных обследований объемов «свежих» селевых выносов при их многочисленности и труднодоступности.

Одновременно рекомендуется включение в усовершенствованную модель селевого кадастра данных о прогнозируемых максимальных (руслоформирующих) водных расходах водотоков, провоцирующих селевые потоки, формах и максимальных размерах каменных валунов, выносимых селевым потоком (что может быть использовано для определения скоростей селя, высоты селевого вала и др.). В кадастре указываются также известные даты сходов предыдущих селей с причиненным ущербом, существующие противо-селевые и защитные сооружения, а также объекты экономики и транспорта, линейные инженерные сооружения (и др.), расположенные в селеопасной зоне и подверженные риску разрушительного воздействия селевых и водно-селевых потоков.

Заключение

Последние десятилетия характеризуются интенсивным освоением природных ландшафтов горных территорий Северного и Западного Кавказа путем строительства промышленных, сельскохозяйственных, дорожных, рекреационных и спортивных объектов. Эффективность проектируемых при этом защитных мероприятий от негативного воздействия селевых и водно-селевых потоков во многом зависит от достоверности используемых исходных гидрогеофизических характеристик водосборов в моделях селевых кадастров. Однако, устаревшая структура последних не позволяет в достаточно полной и обоснованной мере выявлять такие важнейшие особенности водосборов, как однозначную идентификацию селевых и водно-селевых водосборов, дифференцированную селеопасность территорий, гидрогеофизические

характеристики водосборов, максимальные (руслоформирующие) расходы дождевых стоков и селевых потоков и др. Предложенная усовершенствованная структура модели селевых кадастров позволяет во многом преодолеть указанные недостатки и улучшить методологическую базу для последующего формирования математических моделей селевых процессов. Приведена также новая методика расчета текущего нарастающего распределенно-сосредоточенного склонового стока нагорных каналов водотоков, а также частный пример использования указанной методики для отдельного водно-селевого водосбора.

Благодарности

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

Список литературы

Анахаев, К.К., Беликов, В.В., Анахаев, К.Н., Анаев, М.Т., Борисова, Н.М. (2023) О селеопасности территорий селевых бассейнов, *Процессы в гео-средах*, № 2, с. 2071-2081.

Анахаев, К.Н. (2018) О кадастрах селевых бассейнов, *Грозненский естественнонаучный бюллетень*, Грозный, т. 3, № 4 (12), с. 11-19, doi:10.25744/genb.2018.12.4.002.

Анахаев, К.Н. (2019) О достоверности геофизических параметров в селевом кадастре юга России, *Вестник МГСУ*, т. 14, вып. 5, с. 610-620, doi:10.22227/1997-0935.2019.5.610-620.

Анахаев, К.Н., Антоненко, О.Л. (2012) Дифференциация селеопасности территорий селевых бассейнов горных водотоков, *Селевые потоки, катастрофы, риск, прогноз, защита*. Труды II конференции, посвященной 100-летию со дня рождения С.М. Флейшмана, МГУ, М., с. 11-12.

Анахаев, К.Н., Антоненко, О.Л. (2014) Дифференциация селеопасности бассейнов горных и предгорных водотоков, *Природообустройство*, № 3, с. 73-78.

Анахаев, К.Н., Беликов, В.В. (2020a) О гидрогеофизических “несуразностях” в изучении горных рек Северного Кавказа, *Мелиорация и водное хозяйство*, № 5, с. 19-24.

Анахаев, К.Н., Беликов, В.В. (2020b) О гидрологических и геофизических особенностях некоторых работ по селеведению, *Гидротехническое строительство*, № 6, с. 32-38.

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.

Анахаев, К.Н., Беликов, В.В., Амшоков, Б.Х., Анахаев, К.К. (2021) Обновлённые характеристики селевых бассейнов, *Гидротехническое строительство*, № 3, с. 50-54.

Анахаев, К.Н., Макитов, У.И., Анахаев, Х.А., Дышеков, А.Х. (2016) Об условиях возникновения селевой опасности дождевого генезиса в горных районах, *Метеорология и гидрология*, № 6, с. 59-68.

Байнатов, Ж.Б. (1992) *Защита от селевых потоков*, Научно-технические достижения и передовой опыт в области автомобильных дорог, вып. 3, Росавтодор, М., 79 с.

Залиханов, М.Ч., Кондратьева, Н.В., Аджиев, А.Х., Разумов, В.В. (2016). Учёт генезиса селеобразования при предварительной оценке максимального объёма твёрдых отложений селея на территории Северного Кавказа, *ДАН*, т. 470, № 2, с. 212-214.

Кадастр лавинно-селевой опасности Северного Кавказа (2001) С-Пб., ГМИ., 112 с.

Кадастр селевой опасности юга Европейской части России (2015) Москва, Нальчик, 148 с.

Кондратьева, Н.В., Залиханов, М.Ч., Аджиев, А.Х., Разумов, В.В. и др. (2017) *Способ оценки единовременного максимально возможного объёма твёрдых селевых выносов в селевое русло реки при сходе селея*, Патент № 2618494, Бюл. № 13.

Методические рекомендации по обеспечению противоселевой безопасности объектов экономики (2016) Под редакцией Анахаева, К.Н., Нальчик, ВГИ Росгидромета, 59 с.

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

Перов, В.Ф. (1990). *Селевые явления. Терминологический словарь*, МГУ, М., 46 с.

Перов, В.Ф. (2014). *Селевые явления. Терминологический словарь. 2-е изд.*, МГУ, М., 70 с.

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

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

Смирнов И.П. (1957) Изучение основных элементов селей по оставленным ими следам, *Труды КазНИГМИ*, вып. 9, с. 32-42.

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*, Госстрой России, М.

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.

Чеботарев, А.И. (2001). *Гидрологический словарь*, Л., Гидрометеиздат, 112 с.

Черноморец, С.С. (1991) Расчет объема селевой массы, *Транспортное строительство*, № 11, с. 4-6.

References

Anakhaev, K.K., Belikov, V.V., Anakhaev, K.N., Anaev, M.T., Borisova, N.M. (2023) О селе опасности территории селевич бассейнов [On the mudflow hazard of mudflow basin areas], *Prozessi v geosredach*, no. 2, pp. 2071-2081.

Anakhaev, K.N. (2018) О кадастрах селевич бассейнов [About the cadastre of mudflows], *Groznenskii estestvenno – nauchnii bjulleten*, Groznii, vol. 3, no. 4 (12), pp. 11-19, doi:10.25744/genb.2018.12.4.002.

Anakhaev, K.N. (2019) О достоверности геофизических параметров в селевом кадастре юга России [On the reliability of geophysical parameters in the rural cadastre of the south of Russia], *Vesnyk MGSU*, vol. 14, no. 5, pp. 610-620, doi: 10.22227/1997-0935.2019.5.610-620.

Anakhaev, K.N., Antonenko, O.L. (2012) Дифференциация селеопасности бассейнов горных водотоков [Differentiation of mudflow hazard in the areas of mudflow basins of mountain watercourses], *Selevie potoki, katastrofi, risk, prognoz, saschita*, Trudi II konferenzii, posvijschennoj 100-letij so dnij roshdenij S.M. Fleischmana, MGU, Moscow, Russia, pp. 11-12.

Anakhaev, K.N., Antonenko, O.L. (2014) Дифференциация селеопасности территории селевич бассейнов горных и предгорных водотоков [Differentiation of mudflow hazard of basins of mountain and foothill watercourses], *Prirodoobustroistvo*, no. 3, pp. 73-78.

Anakhaev, K.N., Belikov, V.V. (2020a) О геофизических “несуразностях” в изучении горных рек Северного Кавказа [On hydrogeophysical “absurdities” in the study of mountain rivers of the North Caucasus], *Melirazia i wodnoe choziastvo*, no. 5, pp. 19-24.

Anakhaev, K.N., Belikov, V.V. (2020b) О гидрологических и геофизических особенностях некоторых работ по селеведению [On hydrological and geophysical features of some mudflow studies], *Gidrotechnicheskoe stroitelstvo*, no. 6, pp. 32-38.

Anakhaev, K.N., Belikov, V.V. (2023) O modelirovanii sklonovogo stoka na gornich i predgornich vodosborach [On the modeling of slope runoff on mountain and foothill catchments], *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 9, no. 4, pp. 386-402, doi:10.21513/2410-8758-2023-4-386-402.

Anakhaev, K.N., Belikov, V.V., Amshokov, B.Kh., Anakhaev, K.K. (2021) Obnovlenie charakteristiki selevich basseinov [Updated characteristics of mudflows], *Gidrotechnicheskoe stroitelstvo*, no. 3, pp. 50-57.

Anakhaev, K.N., Makitov, U.I., Anakhaev, Kh.A., Dishekov, A.Kh. (2016) Ob usloviyakh vozniknoveniya selevoj opasnosti dojdevoogo genezisa v gornich rajonakh [On conditions of occurrence of mudflow hazard of rain genesis in mountainous regions], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 6, pp. 59-68.

Bainatov, J.B. (1992) Zachita ot selevych potokov [Scientific and technical achievements and best practices in the field of roads], *Nauchno – technicheskie dostizheniya i peredovoi opit v oblasti avtomobilnich dorog*, vol. 3, Posawtodor, Russia, 79 p.

Zalichanov, M.Ch., Kondratieva, N.V., Adshiev, A.Ch., Razumov, V.V. (2016) Uchet genezisa seleobrazovania pri predvarinelnou ozenke maksimalnogo obiema tverdoch otlochenii selia na territorii Sewernogo Kawkaza [Taking into account the genesis of mudflow formation in the preliminary assessment of the maximum volume of solid mudflow deposits in the North Caucasus], *DAN*, vol. 470, no. 2, pp. 212-214.

Kadastr lawinno-selevoi opasnosti Sewernogo Kawkaza (2001) [North Caucasus avalanche-mudflow hazard cadastre], WGI, S-Pb, Russia, 112 p.

Kadastr selevoj opasnostijuga evropeiskoi chasti Possii (2015) [Cadastre of mudflow hazard of the south of the European part of Russia], M.-Nalchik, Russia, 148 p.

Kondratieva, N.V., Zalichanov, M.Ch., Adshiev, A.Ch., Razumov, V.V. et al. (2017) *Sposob ozenki edinowremennogo maksimalno vozmochnogo obiema selevich vinosov v selevoe ruslo rek i pri schode selia* [Method for Estimating the Maximum Possible Volume of Solid Mudflows into a Mudflow Bed of a River in the Event of Mudflows], Patent no. 2618494, Bul. no. 13.

Metodicheskie rekomendazi po obespecheny protiwo selevoi bezopasnosti obiyektov ekonomiki (2016) [Methodological recommendations for ensuring anti-mudflow safety of economic facilities], WGI, Nalchik, Russia, 59 p.

Neporoshnii, P.S. (1947) Saschita hydroelektrostantsii ot selevichp otokov. [Protection of hydroelectric power plants from mudflows], GEI, M.L., Russia, 164 p.

Perov, W.D. (1990) *Selewie jawlenia*. Terminologicheski slowar [Mudslides. Terminology Dictionary], MGU, Moscow, Russia 46 p.

Perov, W.D. (2014) *Selewiejawlenia*. Terminologicheski slowar. [Mudslides. Terminology Dictionary], 2-e izd. MGU, Moscow, Russia, 70 p.

Perov, W.D. (2012) *Selewedenie*. [Selenium], MGU, Moscow, Russia, 271 p.

Seinova, I.B., Solotarev, E.A. (2001) *Ledniki i seli Prielbrusia*. [Glaciers and mudflows of the Elbrus region], MGU, Moscow, Russia, 203 p.

Smirnov, I.P. (1957) Izuchenie osnovnich elementov selei po ostavlenim imi sledam [Study of the main elements of mudflows according to the traces left by them], *Trudi Kaz. NIGMI*, iss. 9, pp. 32-42.

SNiP 2.01.14-83 (1985) *Opreделение raschetnich gidrologicheskikh harakteristik*. [Determination of design hydrological characteristics], Moscow, Russia, 36 p.

Sokolovskii, D.L. (1947) Selevyt pavodki, ich gidrologicheskie osobennosti i metodika rascheta [Mudflows, their hydrological features and calculation methodology], *Meteorologiya i gidrologiya*, pp. 65-75.

SP 33-101-2003 (2004) *Opreделение raschetnich gidrologicheskikh harakteristik* [Determination of basic design hydrological characteristics], Gosstroi Rossii, Moscow, Russia.

Schema inženernoi zashity gorodov i naslennykh punktov KBASSR ot opasnykh geologicheskikh protsessov [Diagram of engineering protection of cities and settlements of KBASSR from hazardous geological processes] (1987) v. III, SKGWH, Piytigorsk, Russia, 86 p.

Fleischmann, S.M. (1978) *Seli* [Mudflows], GMI, Moscow, Russia, 312 p.

Herheulidze, I.I. (1947) *Owragnye I selevye winosy* [Ravine and mudflows], Dorizdat, Moscow, Russia, 97 p.

Chebotaev, A.I. (2001). *Gidrologicheskii slovar* [Hydrological Dictionary], Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 112 p.

Chernomoz, S.S. (1991) Raschet objema selevoi massi [Mud volume calculation], *Transportnoe stroitelstvo*, no. 11, pp. 4-6.

Статья поступила в редакцию (Received): 28.08.2024.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 15.09.2024.

Принята к публикации (Accepted): 13.10.2024.

Для цитирования / For citation:

Анахаев, К.Н., Беликов, В.В., Анахаев, А.А. (2024) Усовершенствование модели селевых кадастров с использованием расчетной оценки склонового стока, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 4, с. 492-509, doi:10.21513/2410-8758-2024-4-492-509.

Anakhaev, K.N., Belikov, V.V., Anakhaev, A.A. (2024) Improvement of the mudflow inventory model using the estimates of slope runoff, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 4, pp. 492-509, doi:10.21513/2410-8758-2024-4-492-509.
