

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОПРИРОДНЫЕ
ПРОЦЕССЫ

УДК 551.32

К ВОПРОСУ О ПРОИСХОЖДЕНИИ СЕЛЕЙ ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ
И ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ЛОКАЛЬНОГО ПРОГНОЗА

© 2020 г. И. М. Васьков^{1,*}, М. Р. Тамаева^{1,**}

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет),
ул. Николаева, 44, Владикавказ, РСО-Алания, 362011 Россия

*E-mail: vaskov_im@mail.ru

**E-mail: marina.tamaeva.91@mail.ru

Поступила в редакцию 25.03.2020 г.

После доработки 25.03.2020 г.

Принята к публикации 03.04.2020 г.

Статья посвящена вопросам происхождения высокоплотных гляциальных селей, определению механизма их зарождения и развития, размеров зон поражения в зависимости от изменений кинетической энергии водо-каменных масс. Конечная цель выявление возможности среднесрочного локального прогнозирования интенсивности негативного воздействия гляциальных селей высокой плотности на людей и инфраструктуру территорий. В качестве эталонных объектов рассмотрены наиболее изученные высокоплотные гляциальные селевые проявления, произошедшие в начале XXI в. на Центральном Кавказе и Прибайкалье. По генезису гляциальные сели разделены на две группы: 1) как завершающая стадия ледово-каменных обвалов; 2) как результат деградации нивальной зоны высокогорных областей. Исследованиями последних лет выявлено единство основных морфологических типов и элементов долин, в которых генерируются гляциальные сели выделенных групп, главные из которых: наличие ледниковых пьедесталов и каменных глетчеров, нависающих над их цирками с тыла или борта долины скальных стен – фронтальных частей современных взбросо-надвигов. Прогнозирование гляциальных селей первой группы возможно при локальном прогнозе катастрофических обвалов, а локальный прогноз высокоплотных селей второй группы может быть реализован поэтапно. А именно: на начальном этапе по геологическим, геоморфологическим и гляциологическим признакам определяются конкретные объекты – долины со скоплениями рыхлых гляциальных отложений, находящихся в равновесно-неустойчивом состоянии, определяется их общий объем и возможный максимальный объем селевого выброса, степень риска и поражаемые территории. Затем, по результатам предыдущего этапа выявленные угрозы ранжируются по степени риска и возможному ущербу.

Ключевые слова: гляциальные сели, кинетическая энергия, классификация селевых потоков, каменные глетчеры, локальное прогнозирование селей высокой плотности

DOI: 10.31857/S0869780920050070

Всплеск интереса к такому опасному природному явлению, как гляциальные сели, вызван не только увеличением их количества и объемов, в частности на Центральном Кавказе и в Прибайкалье, но и массовым появлением в таких “не характерных” местах, как Северная Осетия. В том числе и одного из самых масштабных в Мире селевых потоков, который был порожден Геналдонской катастрофой 2002 г. Результаты детального изучения причин возникновения и параметрических характеристик разномасштабных селевых событий, позволяющих с иных позиций рассматривать их генезис, механизм образования и динамику развития, а, следовательно, энергетический ресурс и степень опасности подобных событий. Анализ данных, полученных в результате подробного изучения селевых бассейнов и отдельных со-

бытий, показал, что гляциальные сели являются производной как процесса деградации оледенения, вызванного глобальным изменением климата, так и интенсивности, и направленного развития современной тектоники, но всегда представляют значительную опасность для инфраструктуры горной территории.

В качестве примеров, с позиций современных представлений об их генезисе и развитии, рассматриваются наиболее изученные гляциальные селевые проявления, произошедшие в начале XXI в. на Центральном Кавказе и в Прибайкалье.

Геналдонский гляциальный сель 20 сентября 2002 г. Крупная природная катастрофа в верховьях р. Геналдон привлекла внимание ученых не только России, но и всего мира. Существующие

сети гидрометеорологического, геологического и сейсмического мониторинга позволили получить обширную информацию о динамике изменений практически по всем элементам природной среды в качественных и количественных характеристиках.

Последовательное рассмотрение накопленной информации по Геналдонской катастрофе от верхней точки зарождения до нижней точки затухания процесса в целом привело к установлению зональности ее развития по типам движения масс (рис. 1), где *на заключительном этапе* возник уникальный гляциальный селевой поток [8, 11]. В развитии Геналдонского гляциального селевого потока выделяются зона транзита и участки распада высокоплотного и низкоплотного селя общей протяженностью 18.9 км.

Зона транзита гляциального селя протяженностью 2.4 км начиналась от северного окончания Кармадонского ледово-каменного завала в южной суженной части каньона р. Геналдон (рис. 2) на отметке 1125 м и заканчивалась в северном расширении каньона на отметке 1000 м, средний уклон днища 0.062 (или $3^{\circ}32'$).

Участок распространения гляциального селевого потока высокой плотности делится на две части.

Верхняя часть протяженностью 5.2 км, от окончания зоны транзита на выходе из узкой щели каньона до устья р. Геналдон (рис. 3), где дно долины было пересечено дорожной насыпью высотой до 3 м над активной поймой реки, отметка 869.0 м, уклон 0.025 (или $1^{\circ}25'$). Объем селевых масс в этой части оценивался в 6.7 млн м³, а твердой составляющей (после таяния льда в 2004 г.) – в 4.5 млн м³.

Нижняя часть высокоплотного селя имела протяженность 3.7 км до отметки 780 м, общий уклон 0.024 (или $1^{\circ}23'$) и отличалась дальнейшим уменьшением скоростей (до 33 м/с) и объемов движущихся масс. По экспертной оценке, первоначальный объем этой части мог достигать 3 млн м³, в том числе твердой составляющей до 2 млн м³ (рис. 4).

Участок *распада низкоплотного гляциального селевого потока* имел протяженность 7.6 км на отметках от 869 м до 610 м с уклоном 0.022 ($1^{\circ}17'$) и в плане практически не выходил за пределы активной поймы (рис. 5).

При выяснении морфометрических параметров селевого потока операционным методом были рассчитаны размеры поперечных сечений потока, уклоны и углы склонов, направления движения, объемы движущихся масс [3]. Для селевых отложений полевыми и лабораторными методами определялись гранулометрический, петрогра-

фический и минералогический состав, физико-механические характеристики [4].

При полевых исследованиях петрографический состав крупных фракций (более 10 мм) рыхлых отложений определялся визуально, а мелких при помощи бинокулярного микроскопа с увеличением до 56 крат. При определении минерально-петрографического состава рыхлых отложений с крупностью менее 200 мм использовался материал рассева проб, а петрографический состав большей крупности (более 200 мм) определялся в полевых условиях на площадках размером 10 м² в местах отбора проб.

В результате выявилось, что отложения в зоне распада гляциального селя содержат 51.2% обломков крупнее 10 мм, которые по петрографическому составу разделяются следующим образом (от 100%): алевролит – 28.4%; вулканоген – 50.3%; гранодиорит – 7.5%; диабазы – 6.9%; кварцит – 3.9%; андезит – 0.1%; известняк – 0.8%; кварц (жильный) – 2.1%.

Мелкие фракции (менее 10 мм) составляют 48.8% от общего объема и имеют следующий минерально-петрографический состав: алевролит – 40.7%; вулканоген – 23.9%; кварцит – 0.5%; кварц – 14.0%; кальцит – 6.0%; полевые шпаты – 7.0%; глинисто-слюдястые минералы – 7.7%; рудные минералы (пирротин, пирит и т.д.) – 0.2%.

Сопоставление полученных данных со стратотипами разрезов долины Геналдона указывает на их высокую степень корреляции (0.92) с вещественным составом циклаурской свиты, выходящей на поверхность в правом борту долины ледника Колка, образующей восточный и северный отроги г. Джимарайхох (см. рис. 1).

Плотность (ρ) селевых отложений – 1.8 кг/дм³.

Влажность (W_0) селевых отложений – 7.42%.

Размываемость высокая, что связано с особенностями формирования этих геологических тел, а именно:

– высокая скорость движения селевой массы обусловила отсутствие какой-либо дифференциации материала по крупности и удельному весу;

– наличие в селевой массе льда в количестве от 30% до 60%, который к осени 2004 г. полностью растаял, что привело к общему дополнительному разуплотнению отложений, которые по физико-механическим свойствам стали похожи на насыпные грунты;

– наличие многочисленных крупных и мелких промоин от небольших временных водотоков на их современной поверхности.

Известны динамические характеристики верхней части гляциального селевого потока: скорость движения 33 м/с; масса 10.5×10^3 т. Значит кинетическая энергия, унаследованная от энергии исходного обвала с восточного отрога г. Джи-

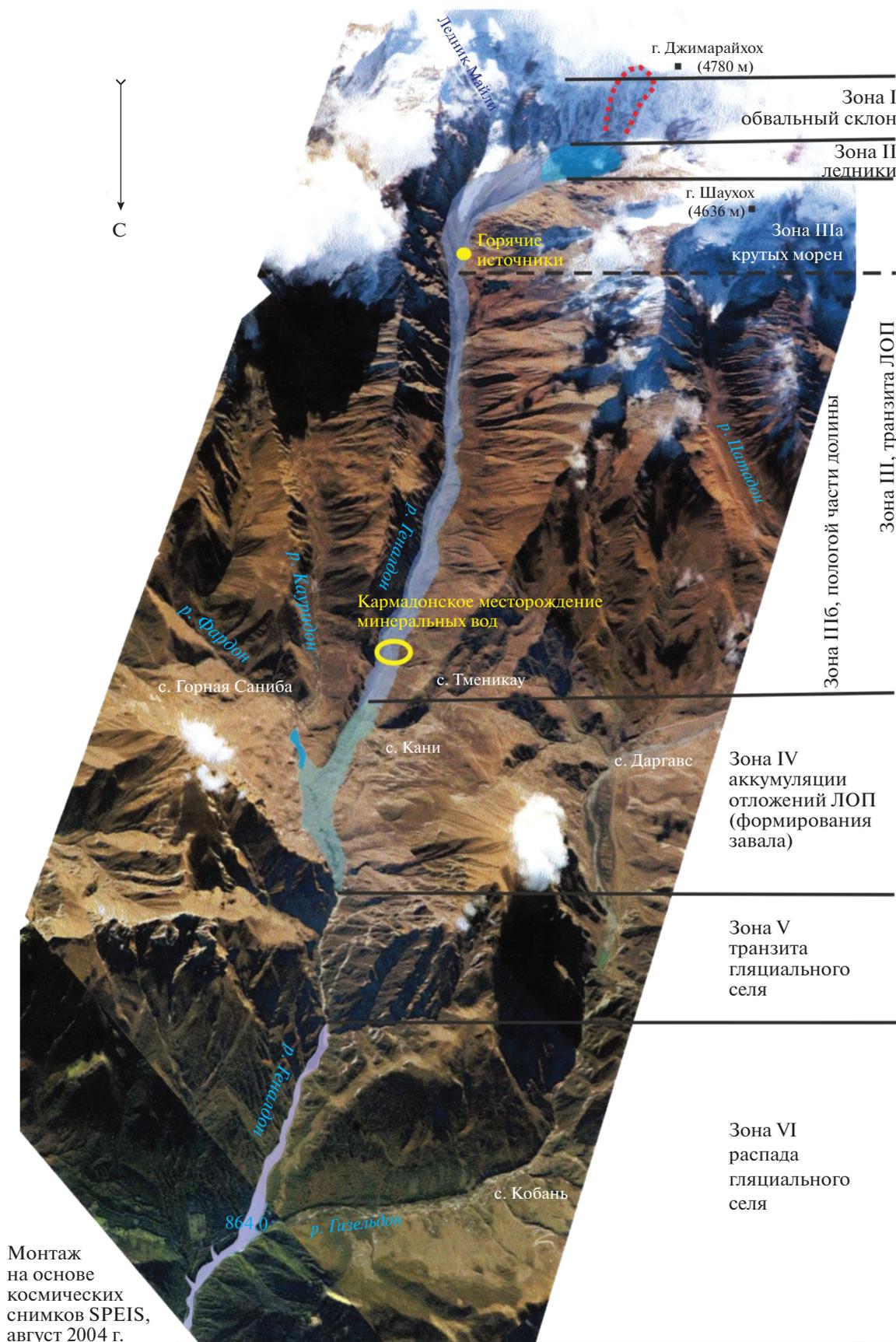


Рис. 1. Зоны развития Геналдонской катастрофы 20.09.2002 г.



Рис. 2. Зона транзита гляциального селя в каньоне р. Геналдон. Ширина днища каньона 15–30 м, ширина по верху — 50–120 м, высота зоны воздействия селевых масс 40–60 м. На дне каньона видны скопления крупных глыб горных пород среди дробленой тающей ледово-каменной массы. (Фото Г.А. Долгова, полдень 21.09.2002 г.)



Рис. 3. Вид вниз (на север) по течению реки. Отложения гляциального селя верхней части участка “высокой плотности” до устья р. Геналдон. Поверхность отложений ровная с многочисленными ветвящимися водотоками. (Фото Г.А. Долгова, полдень 21.09.2002 г.)

марайхох на тыловую часть ледника Колка, составляла не менее 0.6×10^{10} Дж.

В мировой практике описано большое количество гляциальных селевых событий подобного рода, когда начальный энергетический импульс породился катастрофическими обвалами [12, 13, 24].

Западный и Восточный Кайсарские ледники [5] находятся на южном склоне северного хребта Цейской подковы отрога Главного Кавказского хребта (Центральный Кавказ) под вершиной Цейхох (4139 м).

В строении субстрата основную роль играют верхнепалеозойские граниты и их палингенный контакт с кристаллическими сланцами среднего протерозоя. Граниты, в свою очередь, прорваны цейскими гранодиоритами среднеюрского возраста, а в северной части верхнеэоценовыми гранодиоритами теплинского комплекса и их производными. И если внедрение интрузивов и вулканизм верхнего неогена происходили в условиях растяжения, то позже произошла смена геодинамической обстановки на сжатие, которая сохра-

няется и в настоящее время [5–7]. Именно этот общекавказский цикл тектонической активности привел к формированию горного сооружения Центрального Кавказа в современном виде. Реализация усилий сжатия при сокращении площадей приводит к интенсивным дизъюнктивным деформациям кристаллических пород, имеющим в основном взбросо-надвиговый характер. В нивальной зоне фронтальные части новейших и современных взбросов и надвигов, выведенные на поверхность, являются источником обильного поступления обломков горных пород на ледники. Это приводит к созданию мощных комплексов морен, ледниковых пьедесталов и каменных глетчеров при деградации оледенения. Типичным примером таких процессов и являются Кайсарские ледники (рис. 6 и 7).

В связи с увеличением темпов отступления долинных ледников и уменьшения площадей распространения многолетнемерзлых пород в последние десятилетия возросла угроза селевой опасности в высокогорной зоне Центрального Кавказа, в том числе в обширном моренном поле карово-долинных ледников Западный Кайсар (№ 63) и Восточный Кайсар (№ 63) [19].

Ледники бассейна р. Кайсардон разделены северным отрогом от гребня г. Цейхох. Они носят название Западно-Кайсарский ($42^{\circ}49'26''$ с.ш.; $43^{\circ}50'51''$ в.д.) и Восточно-Кайсарский ($42^{\circ}49'24''$ с.ш.; $43^{\circ}51'33''$ в.д.) и имеют общую северную экспозицию. Концы языков расположены на высотах 3186 м и 3187 м н.у.м. соответственно.

Активизация гляциальной селевой деятельности в перигляциальной зоне ледников приходится на конец июля 1998 г., когда селевые отложения объемом около 500 тыс м³ перекрыли флювиогляциальную пойму р. Сонгутидон на протяжении



Рис. 4. Устье р. Геналдон. В левой части снимка вверху мост через р. Гизельдон и светлое пятно – крыша затопленного селевыми массами павильона автобусной остановки. (Фото Г.А. Долгова, полдень 21.09.2002 г.)



Рис. 5. Нижняя часть зоны распада низкоплотного селя водно-ледово-грязевого состава. Примечательным 21–22.09.2002 г. было наличие на поверхности ярко белых глыб (до 0.5 м в поперечнике) высокогорного снега – фирна. На высокой террасе левого борта долины – с. Верхняя Саниба, на заднем плане, на правом берегу – с. Гизель. (Фото Г.А. Долгова, полдень 21.09.2002 г.)

2.1 км от устья реки Кайсардон. Поток низкой плотности по руслу Сонгутидона достиг с. Дунта, пройдя 3.1 км. 29.07.2007 г. сошел следующий селевой поток объемом более 200 тыс. м³ (рис. 8).

Сход селевых потоков по р. Кайсардон непосредственно не угрожает населенным пунктам и объектам инфраструктуры, но большое количество обломочного материала скапливается в поймах рек Сонгутидон и Айгамуга, что вызывает плановые и вертикальные деформации русел рек, нарушается функционирование малой ГЭС “Фаснальская”, возникает угроза разрушения мостов.

Долина реки Герхожан-Су в Кабардино-Балкарии. Активизация селевой деятельности в этой долине отмечалась в 1937, 1960, 1961, 1962, 1977, 1999, 2000 и 2011 годах, и все это время происходит ее изучение. За этот период опубликовано более 150 работ, включающих монографии и обобщающие статьи.

Бассейн р. Герхожан-Су (правый приток р. Баксан) занимает площадь около 72 км². Высшая точка бассейна имеет высоту 4 149 м, высота истока Каяарты-Су около 3400 м, устье находится на высоте 1 234 м. Собственно Герхожан-Су начинается после слияния двух ее составляющих – рек Каяарты-Су и Сакашили-Су. Практически все сели, достигавшие города, зарождались в верховьях Каяарты-Су. Ледники верховьев долины Каяарты-Су занимают 3.6 км² (18% от площади водосбора) [20].

М.Д. Докукиным [16] были выделены зоны зарождения (сдвигового селевого процесса, по Ю.Б. Виноградову [14], табл. 1) и трансформации селей с образованием промежуточных конусов выноса (рис. 9) протяженностью 750–880 м и 750 м соответственно. Ниже по течению отмечено действие транспортного процесса (зоны транзита) протяженностью 6.8 км с углами наклона от

8°00' до 11°50'; транспортного процесса и частичного распада – 2.25 км, углы наклона 5°10' и 3°30' и отложения конуса выноса – 0.8 км с углом наклона 5°30'.

Величины объемов селевых выбросов колебались в широких пределах, и большая часть селей

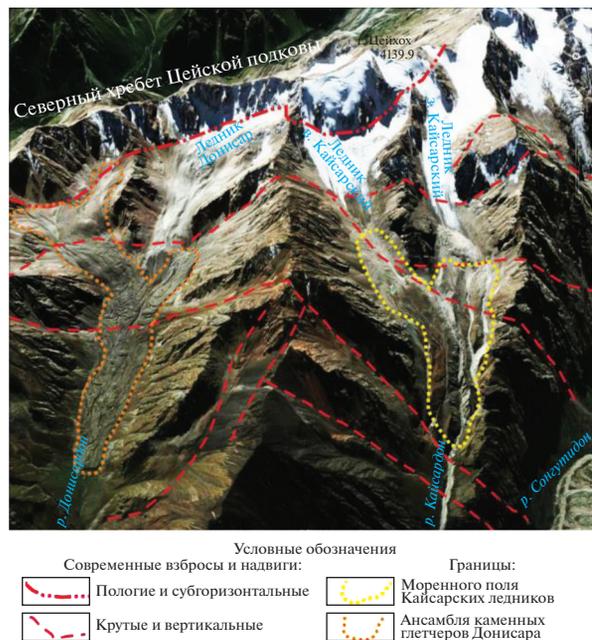


Рис. 6. Верховья долин рек Кайсардон и Донисардон с полями морен, ледниковыми пьедесталами и ансамблями каменных глетчеров на северном склоне северного хребта Цейской подковы.



Рис. 7. В центре снимка — моренное поле и совмещенный моренный пьедестал западного и восточного Кайсарских ледников, разрезанные глубокими селевыми врезами. Под Западным Кайсарским ледником на высоте 3200 м — “бараньи лбы”. На высоте 3100 м — срединная морена. На этой же высоте слева — ровная часть моренного пьедестала. В середине нижней части снимка — отложения кайсарских селевых потоков в пойме р. Сонгутидон.

не доходила до устья р. Герхожан-Су, а потоки 1937, 1961, 1962 гг. имели объемы в пределах 50–100 тыс. м³. В результате событий 1960, 1977, 2011 гг. произошли выбросы селевой массы в 100–200 тыс. м³ и более; суммарный выброс на конус выноса и в р. Баксан, более 2 млн м³ был отмечен в 1999–2000 гг. [20]. В результате на выходе р. Герхожан-Су в долину Баксана произошло формирование селевого конуса выноса площадью около 0,7 км² и длиной более 2 км. Объем аккумуляции селевой массы составил более 2,1 млн м³. Отложения селевых потоков 2000 г. полностью перекрыли конусы выноса прошлых лет и заняли все днище долины Баксана, захоронив его русло в пределах конуса на 2–15 м. Грязекаменные массы затопили и сгладили неровности рельефа. Общее увеличение отметок поверхности достигало 15–18 м. Произошло заложение новых, невыработанных водотоков рек Герхожан-Су и Баксан, контуры которых не согласуются с плановыми очерченными доселевых русел. Длина р. Герхожан-Су увеличилась более чем на 1 км. Левый берег р. Баксан под воздействием селевых валов был размыв на участке протяженностью более 400 м и отступил на 5–15 м. Общий объем выноса твердо-

го материала при формировании нового селевого русла оценивается более чем в 3,1 млн м³.

Исследователи высказывали различные мнения о генезисе селей в бассейне р. Герхожан-Су. Так в работе Э.В. Запорощенко [18] был сделан вывод, что наиболее мощные сели, сошедшие по р. Герхожан-Су в 1960, 1977 и 2000 гг., были связаны с прорывами приледниковых зандровых озер. Причиной суперселя 2000 г., по мнению авторов монографии “Ледники и сели Приэльбрусья” [22], стал необычный процесс расчленения массива погребенного льда, цементирующего систему моренного комплекса, или, другими словами, обвальный триггерный импульс [23]. В работе С.С. Черноморца и др. [25] было сделано предположение, что волна селеформирующего паводка могла возникнуть вследствие резкой разгрузки внутриледниковых полостей объемом 10–30 тыс. м³.

М.Д. Докукиным [17] выработано представление о гляциальных селях р. Герхожан-Су как о продолжительных гляциальных селевых процессах, развивающихся в течение нескольких лет. В условиях продолжающегося потепления климата в рассматриваемом регионе интенсивное таяние ледника Каяартыбаши в зоне верхнего цирка при подледном рельефе, благоприятном для временной аккумуляции больших объемов воды, приводит к формированию гляциальных прорывных паводков.

В общем плане перечисленные генетические построения для катастрофических и крупных гляциальных селей в своей основе имеют представление о ярко выраженных современных процессах деградации высокогорной нивальной зоны. Быстро текущие современные климатические процессы приводят к сокращению площадей распространения многолетнемерзлых пород, уменьшению, что наиболее важно, объемов ледников, находящихся при температурах близких к 0°С.

Сели в Тункинских гольцах в районе п. Аршан детально описаны Н.И. Акуловым, В.В. Акуловой, С.И. Штельмах, М.Н. Рубцовой, П.А. Шолоховым [1]; Р.Ц. Будаевым, В.Л. Коломиец [2]; В.К. Лапердиным, С.А. Макаровым, А.В. Бардаш [21] и другими авторами. Ими указывается, что природная обстановка в районе, прилегающем к п. Аршан, свидетельствует о ее высокой селеопасности. Рассматривается область формирования селей, в которой выявлено сочетание природных факторов, благоприятствующих развитию селевых процессов, а также зоны транзита и разгрузки селей. Отмечается, что ручьи 1-я и 2-я Шихтолайки (рис. 10) берут начало в ледниковых каровых долинах длиной до 2 км, “висячие” устья которых имеют абсолютные высоты 1800–1850 м. Выделяется высокая современная сеймотектоническая активность района. При обследовании района [2] установлено, что сель в верховьях ручья 2-я Ших-



Рис. 8. Отложения гляциального селевого потока с верховьев р. Кайсардон, сошедшего 29.07.2007 г. Объем селевого выброса – более 200 тыс. м³. На снимке эти отложения отличаются светлой окраской, на их поверхности нет растительности. Основная масса каменного материала прижата к правому берегу р. Сонгутидон.

толайка “зародился” из глубокого ущелья, сформированного под “висячим” устьем каровой долины. В плане он имеет форму амфитеатра, открытого к югу, вниз по течению ручья. Глубина

ущелья – до 50 м, ширина – до 100 м, тальвег ручья довольно крутой. Стенки ущелья свежие, лишённые растительного покрова, крутизна стенок достигает 60°–70°.

Таблица 1. Классы и типы опасных гравитационных процессов

| Классы гравитационных процессов с учетом их энергетических составляющих и времени протекания [11] | Подгруппы гравитационных процессов | Типы селевых процессов по Ю.Б. Виноградову [14] |
|---|---|---|
| Класс катастрофических обвалов с подгруппами | А – ледово-каменные обвалы нивальной зоны | Обвальный селевой процесс – процесс обрушения массы льда и породы в результате ее отделения от горного массива |
| | Б – гигантские обвалы зоны положительных температур | |
| Класс обвальных процессов в нивальной зоне, разделенных во времени, с порождаемыми ими катастрофическими гляциальными селями | Нет | Сдвиговый селевой процесс – процесс сдвига и разгрузки потенциального селевого массива, возникающий в результате обводнения рыхлообломочной горной породы с образованием селевого потока высокой плотности |
| Класс эндогенных оползней, как подвига отложений при постепенной разрядке геодинамического напряжения на поверхности сместителя надвига/подвига | Нет | Транспортно-сдвиговый селевой процесс – процесс непосредственного взаимодействия водного потока и потенциального селевого массива, приводящий к возникновению селевого потока высокой плотности |
| Класс экзогенных склоновых процессов | Нет | Транспортный селевой процесс – процесс массового переноса взвешенных и влекаемых водным потоком наносов |



Рис. 9. Ледник Каяартубаша и его западная и восточная ветви бифуркации. В перигляциальной зоне современные боковые и донные морены в виде пьедесталов с небольшими озерами и снежниками. Крутая (в среднем около 20°) фронтальная часть пьедесталов является зоной формирования гляциальных селей. Ниже промежуточный конус выноса с наклоном $13^\circ 20'$ [16]. Красные пунктирные линии – предположительное положение границ взбросо-надвиговых блоков. (Фото К. Давыдов ГУ МЧС РФ КБР, 30.08.2010 г.)

В свете рассматриваемого вопроса о механизме образования селей, их классификации и генезиса обращают на себя внимание космические снимки зон селевого питания в предвершинной части южного склона Тункинских гольцов. Здесь хорошо дешифрируются пологие удлиненные каровые долины, на днище и в основании бортов которых развиты ансамбли каменных глетчеров. “Свежие” осыпи в их фронтальных частях указывают на их современное постоянное движение (рис. 11). Пологие “висячие” долины каров верхо-

вьев ручьев в интервале 1-я Шихтолайка – 2-я Шихтолайка в южном направлении сменяются крутым (30° – 35°), залесенным склоном [2] (см. рис. 10).

Анализируя имеющуюся информацию о селях Тункинских гольцов можно сделать обоснованное предположение о возможной следующей последовательности развития событий. Сверхнормативные количества осадков и повышенные температуры в условия высоких коэффициентов фильтрации коллювиально-гляциальных отложений каменных глетчеров приводят к быстрому увеличению расходов нисходящих источников в устьевой части каровых долин, механической суффозии, в виде активного выноса песчаного материала, и донной эрозии. В результате возникающего *транспортного селевого процесса* нарушается напряженно-равновесное состояние склонов в истоках, происходит отделение крупных обломков горных пород, их поступательное падение с высоты нескольких десятков метров с набором скорости и кинетической энергии. То есть идет обвальное развитие *сдвигового селевого процесса* и возникновение водокаменного селя большой плотности и энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Селевые события, описанные выше в качестве примеров, по генезису можно разделить на две группы.

1. Гляциальные сели, как завершающая стадия ледово-каменных обвалов. Для них характерны следующие особенности:

- большая дальность выброса – до сотен километров (180 км по р. Рио Санта, Уаскаран, 1970 г.) [26];

- объемы до десятков миллионов кубометров;

- скорости перемещения до 50 м/с и более;

- события повторяются либо с большими и не регулярными временными промежутками (до сотен и тысяч лет), либо единичны;

- высокая кинетическая энергия потока наследуется от кинетической энергии породных обвальных масс.

Катастрофические события этой группы отмечены во всех районах Мира, где происходит современное горообразование. Они случаются весьма редко на памяти людей в отдельно взятом регионе, но их следы четко фиксируются как в “сегодняшнем”, так и в недавнем геологическом прошлом.

В пределах Центрального Кавказа это серия Девдоракских обвалов XVIII и XIX вв. (10 событий), последний обвал произошел 17.05.2014 г., Цатадонский обвал с северного склона г. Шаухох (около 300 лет назад) [8], Гизельдонский обвал (около 8000 лет назад) [6], обвал Шхельда в

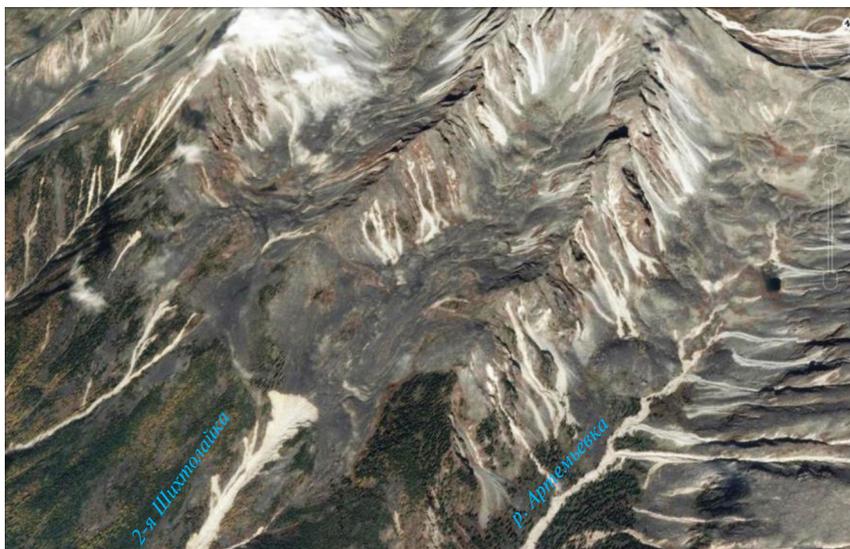


Рис. 10. Каровые долины привершинной части южного склона Тункинских гольцов и ансамбли современных каменных глетчеров на их днищах и бортах. Борта каров остро скальные с многочисленными осыпными конусами и следами пролювиальных потоков. В каре р. Артемьевка присутствуют следы постоянных водотоков, а в каре р. 2-я Шихотайка и к западу от него следы постоянных и временных водотоков на днищах среди гляциальных и пролювиально-коллювиальных отложений отсутствуют. Выходы воды отмечаются в основаниях рыхлообломочных отложений в районе нижних ступеней висячих долин. (Фото Google от 13.10.2016 г.)



Рис. 11. Нижняя ступень висячей долины ручья 2-я Шихотайка (фото от 26.09.2013 г.). В полой, верхней части видны свежие осыпи во фронтальных частях каменных глетчеров, указывающие на их современные подвижки. Крутизна таких осыпей 35° – 37° и более, высота 3–5 м. Крутизна северной стенки воронки попятной эрозии достигает до 50° , что характерно для отложений донных морен. Разность высот от верхней бровки до основания обрыва по вертикали 50–60 м. В составе донной морены, вскрытой в стенке, присутствует от 45% до 50% крупных, более 1.5 м, обломков горных пород. Постоянный водный поток появляется в русле ручья 2-я Шихотайка на высоте 1 480 м, т.е. данные гляциально-коллювиальные отложения обладают высоким коэффициентом фильтрации.

1863 г. [15]. Более 60 гляциальных селевых потоков, вызванных обвалами, отмечено Ю.Б. Виноградовым на Аляске [13].

2. Гляциальные сели, как результат деградации нивальной зоны высокогорных областей выбрасывают селевой материал на меньшие

расстояния (километры) имеют меньшие объемы (до 3–5 млн м³) и скорости движения (от 3–5 м/с), повторяемость масштабных событий до 10–15 случаев в столетие, которые не укладываются в ритмический ряд. Начальный импульс движения возникает в результате перехода потенциальной энергии в кинетическую, которая сосредотачивается в падающих крупных (0.5 м и более) обломках горных пород, имеющих плотность 2.7–2.8 г/см³. Падение происходит в результате быстрого уменьшения коэффициента сцепления между частицами грубообломочных грунтов при увеличении их влажности (замачивании).

Кроме различий между выделенными группами селей существует также и много общих черт, что необходимо для выработки алгоритма среднесрочного локального прогноза селей высокой плотности.

Подготовка и зарождение гляциальных селей протяженный во времени и многофакторный процесс, в котором определяющую роль в накоплении гигантских объемов обломочного материала в горно-нивальном зоне играют геологическое строение субстрата, его новейшая и современная тектоника и особенности геодинамики. В силу ряда объективных причин в подавляющем большинстве случаев подобная информация о селеопасных объектах зачастую отсутствует.

Исследования последних лет показали единство основных морфологических элементов долин, в которых генерируются гляциальные сели выделенных групп. Это наличие ледниковых пьедесталов и каменных глетчеров, нависающих над их цирками с тыла или борта долины скальных стен – фронтальных частей современных взброснадвигов (см. рис. 1, 6, 7, 9, 10). Во многих случаях долины, где происходили катастрофические ледово-каменные обвалы, имеют в своем составе ледниковые пьедесталы, которые являются источниками гляциальных селей второй группы.

Информативны и имеют близкие параметрические характеристики морфометрические показатели долин, опасных по проявлениям гляциальных селей. В этом плане особенно интересны детальные (в масштабах 1:25000–1:10000) изменения уклонов по тальвегам с “выходом” на водоразделы [11]. Накопление кинетической энергии в зоне образования при обвале обломков горных пород обеспечивает квазистабильное перемещение селевых волн на значительные расстояния в каналах стока с естественной треугольной или трапециевидной формой поперечного сечения, площадь которого способна пропустить селевой поток максимального расхода. При выходе высокоплотного водокаменного селевого потока из канала стока на поверхность пролювиального конуса выноса с меньшими углами наклона и в отсутствии бокового ограничения его (потока)

фронт резко расширяется, вода инфильтруется в подстилающие рыхлые отложения, а обломки горных пород останавливаются в виде хорошо выраженных валов.

В обеих выделенных группах гляциальных селей литологический состав породных обломков в зонах коррелятивных отложений соответствует таковому в цирках питающих ледников и каменных глетчеров. Это свидетельствует о постоянном, в случае малых обвалов и осыпей, или импульсном, при катастрофических обвалах, поступлении каменного материала различной крупности на поверхность ледника или каменного глетчера.

ВЫВОДЫ

Прогнозирование гляциальных селей первой группы, являющихся завершающей стадией ледово-каменных обвалов, производится при локальном прогнозе катастрофических обвалов [8–11].

Локальный среднесрочный прогноз гляциальных селей второй группы, возникающих в результате деградации нивальной зоны высокогорных областей, может быть реализован поэтапно.

На начальном этапе по геологическим, геоморфологическим и гляциологическим признакам определяются конкретные объекты – долины со скоплениями рыхлых гляциальных отложений, находящихся в равновесно-неустойчивом состоянии, определяются их общий объем и возможный максимальный объем селевого выброса, степень риска и поражаемые территории.

По результатам предыдущего этапа выявленные угрозы ранжируются по степени риска и возможному ущербу. На наиболее опасных объектах сгущается сеть гидрометеорологических наблюдений, например, устанавливаются автоматические метеостанции, информация с которых поступает в обработку в режиме реального времени.

Размеры зон поражения селевыми потоками высокой плотности (гляциальными селями) целесообразно рассчитывать на основе максимально возможной кинетической энергии, приобретаемой крупнообломочным каменным материалом на этапах образования обвального и сдвигового селевых процессов. Учитывая, что на каждом единичном отрезке пути потока уменьшается высота падения и увеличивается горизонтальная составляющая, количественно приращение кинетической энергии на пути следования селевого потока можно представить в следующем виде:

$$E = mgh \sin \alpha,$$

где E – кинетическая энергия движущихся масс, Дж; m – движущаяся масса, кг; g – ускорение свободного падения, м/с²; h – высота падения, м; α – угол наклона, град; $\sin \alpha$ отражает изменение угла наклона ложа потока.

Однако, система селевых потоков является диссипативной, и в силу этого кинетическая энергия рассеивается в геологической среде, что, в определенных условиях, приводит к распаду отдельных волн и остановке каменных масс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Акулов Н.И., Акулова В.В., Штельмах С.И., Рубцова М.Н., Шолохов П.А.* Структурно-вещественный анализ селевых отложений Аршана // Матер. IV Междунар. конф., Россия, г. Иркутск – пос. Аршан (Республика Бурятия) 6–10 сентября 2016 г. Иркутск: ИГ им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. С. 3–7.
2. *Будаев Р.Ц., Коломиец В.Л.* Цикличность селевых явлений в Тункинских гольцах (Восточный Саян) // Матер. IV Междунар. конф., Россия, г. Иркутск – пос. Аршан (Республика Бурятия) 6–10 сентября 2016 г. Иркутск: ИГ им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. С. 25–28.
3. *Васьков И.М., Калов Р.Х., Кумукова О.А., Хаджиев М.М.* Оценка физических параметров каменной части Геналдонского обвала // Тез. Всерос. конф. по селям 26–28 октября 2005 г. ВГИ, Нальчик. 2005. С. 15–16.
4. *Васьков И.М.* Параметрические характеристики катастрофического обвала в долине ледника Колка // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. 2005. № 1 (13). С. 73–80.
5. *Васьков И.М., Валиев А.Л.* Деградация Кайсарских ледников и увеличение селевой активности // Геология, география и глобальная энергия. 2008. № 3 (30). С. 150–152.
6. *Васьков И.М., Валиев А.Л., Гогичев Р.Р.* Палеообвалы в долине р. Гизельдон, Северная Осетия // Устойчивое развитие горных территорий в условиях глобальных изменений: матер. VII Междунар. научной конф., Владикавказ, 14–16 сентября 2010 г. Напр. 3, сек. 1. 11 с.
7. *Васьков И.М., Валиев А.Л.* Активизация гляциальных селей на территории РСО-Алания в начале XXI века // Устойчивое развитие горных территорий в условиях глобальных изменений: матер. VII Междунар. научной конф., Владикавказ, 14–16 сентября 2010 г. Напр. 3, сек. 1. 6 с.
8. *Васьков И.М.* Ледово-каменные обвалы и их прогнозирование. Опыт Геналдонской катастрофы, Центральный Кавказ / Монография. LAP LAMBERT Academic Publishing. Саабрюкен, Германия, 2011. 233 с.
9. *Васьков И.М.* Локальное прогнозирование опасных экзогенных процессов на базе интегрированного анализа данных функционирующих систем мониторинга (геологического, сейсмического, гидрометеорологического и др.) // Геология и геофизика Юга России, 2012. № 3. С. 13–21.
10. *Васьков И.М., Кожиев Х.Х.* Современное состояние проблемы прогнозирования природных катастроф // Устойчивое развитие горных территорий. 2014. № 2. С. 53–60.
11. *Васьков И.М.* Катастрофические обвалы: происхождение и прогноз. Владикавказ: МАВР, 2016. 370 с.
12. *Виноградов Ю.Б.* Этюды о селевых потоках. Л.: Гидрометиздат, 1980. 14 с.
13. *Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А.* Современные проблемы гидрологии. М.: Издательский центр “Академия”, 2008. 319 с.
14. *Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А.* Прикладная гидрология. СПб: ГЛТУ, 2014. 193 с.
15. *Динник Н.Я.* Горы и ущелья Терской области // Зап. Кавказского отделения императорского геогр. общества. 1884. Кн. 13. Вып. 1. Тифлис. С. 1–48.
16. *Докукин М.Д.* К вопросу о формировании и трансформации селей в бассейне р. Герхожансу // Труды ВГИ. 1985. С. 58–72.
17. *Докукин М.Д., Савернюк Е.А., Богаченко Е.М., Иванов Г.И.* Сель 3 августа 2011 г. в бассейне реки Герхожан-Су: причины, динамика и возможные последствия // ГеоРиск. 2012. № 2. С. 48–56.
18. *Запороженченко Э.В., Каменев Н.С.* Гляциологический фактор активизации селевых процессов на северном склоне Центрального Кавказа в начале XXI в. // Лед и снег. 2011. № 1 (113). С. 131–136.
19. Каталог ледников СССР. Т. 8. Северный Кавказ. Ч. 10. Бассейны рек Фиагдона и Гизельдона. Ч. 11. Бассейн верховьев р. Терека. Л.: ГИМИЗ, 1977. 67 с.
20. *Крыленко И.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С.* Морфодинамика горного бассейна после селевой катастрофы. https://istina.msu.ru/media/publications/article/9c7/4c4/1648496/Morfodinamika_2002.pdf //
21. *Лапердин В.К., Макаров С.А., Бардаш А.В.* Селеопасность бассейна реки Кынгарги // Матер. IV Междунар. конф., Россия, г. Иркутск – пос. Аршан (Республика Бурятия) 6–10 сентября 2016 г. Иркутск: ИГ им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2016. С. 124–127.
22. *Сейнова И.Б., Золотарев Е.А.* Ледники и сели Приэльбрусья (эволюция оледенения и селевой активности). М.: Научный мир, 2001, 204 с.
23. *Сейнова И.Б.* Климатические и гляциальные условия формирования селей Центрального Кавказа на стадии регрессии Малого ледникового периода // Тр. Междунар. конф. “Селевые потоки: риск, прогноз, защита”, г. Пятигорск, 22–29 сентября 2008 г. / Отв. ред. С.С. Черноморец. Пятигорск: Изд-во Инста “Севкавгипроводхоз”, 2008. С. 121–124
24. *Хромовских В.С.* Каменный дракон. М.: Мысль, 1984. 165 с.
25. *Черноморец С.С.* Селевые очаги до и после катастроф. М.: Научный мир, 2005. 184 с.
26. *Evans S.G., Bishop N.F., Smoll L.F., Murillo P.V., Delaney K.B., Oliver-Smith A.* Are-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Perú, in 1962 and 1970 // Engineering Geology. 2009. Vol. 108. P. 96–118.

ABOUT THE ORIGIN OF HIGH-DENSITY MUDFLOWS AND THE POSSIBILITY OF THEIR LOCAL FORECAST

I. M. Vaskov^{a,#} and M. R. Tamaeva^{a,##}

^a North-Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University),
ul. Nikolaeva 44, Vladikavkaz, North Ossetia-Alania, 362011, Russia

[#]E-mail: vaskov_im@mail.ru

^{##}E-mail: marina.tamaeva.91@mail.ru

The article is devoted to the origin of high-density glacial mudflows, determining the mechanism of their nucleation and development, as well as the size of the affected zones depending on changes in the kinetic energy of water-stone masses. The ultimate goal is to identify the possibility of medium-term local forecasting of the intensity of the negative impact of high-density glacial mudflows on people and the infrastructure of the territories. As reference objects, the most studied high-density glacial mudflow manifestations are considered that occurred at the beginning of the XXI century in the Central Caucasus and the Baikal region. From the point of view of prevailing modern ideas, glacial mudflows are divided into two groups by their genesis: (1) as the final stage of ice-stone collapses; and (2) as a result of nival zone degradation in high mountain regions. Recent studies have revealed the unity of the main morphological types and elements of valleys, in which glacial mudflows of the selected groups are generated, the main of which are: the presence of glacial pedestals and stone glaciers; and rock walls (the frontal parts of modern reverse thrusts) overhanging their cirques from the valley rear or side. Prediction of glacial mudflows of the first group is possible with a local forecast of catastrophic landslides, and a local forecast of high-density mudflows of the second group can be implemented in stages. At the initial stage, specific objects are determined by geological, geomorphological and glaciological features, i.e., the valleys with accumulations of loose glacial sediments in an equilibrium-unstable state, their total volume and possible maximum mudflow discharge, as well as the risk degree and affected areas. Then, according to the results of the previous stage, the identified threats are ranked by the degree of risk and possible damage.

Keywords: glacial mudflows, kinetic energy, classification of mudflows, stone glaciers, local forecasting of high density mudflows

REFERENCES

1. Akulov, N.I., Akulova, V.V., Shtelmakh, S.I., Rubtsova, M.N., Sholokhov, P.A. *Strukturno-veshchestvennyi analiz selevykh otlozhenii Arshana* [Structure and substance analysis of mudflow deposits in Arshan]. *Mater. IV Mezhdunar. konf. Rossiya. g. Irkutsk – pos. Arshan (Respublika Buryatiya), 6–10 sentyabrya 2016 g.* [Proc. IV International Conference, Russia, Irkutsk -Arshan (Buryatia Republic), September 6–10, 2016.]. Irkutsk, Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, RAS, 2016, pp. 3–7. (in Russian)
2. Budayev, R.Ts., Kolomiets, V.L. *Tsiklichnost' selevykh yavlenii v Tunkinskikh gol'tsakh (Vostochnyi Sayan)* [Cyclicity of mudflow phenomena in Tunkinskies bald mauntains (Eastern Sayan Mountains)]. *Mater. IV Mezhdunar. konf. Rossiya. g. Irkutsk – pos. Arshan (Respublika Buryatiya), 6–10 sentyabrya 2016 g.* [Proc. IV International Conference, Russia, Irkutsk -Arshan (Buryatia Republic), September 6–10, 2016.]. Irkutsk, Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, RAS, 2016, pp. 25–28. (in Russian)
3. Vas'kov, I.M., Kalov, R.Kh., Kumukova, O.A., Khadzhiev, M.M. *Otsenka fizicheskikh parametrov kamennoy chasti Genaldonskogo obvala* [Assessment of physical parameters of Genaldonskii rackfall]. *Tezisy Vserossiiskoi konferentsii po selyam 26–28 oktyabrya 2005 g.* [Abstracts of All-Russia Conference on mudflows, October 26–28, 2005]. VGI, Nalchik, 2005, pp. 15–16. (in Russian)
4. Vas'kov, I.M. *Parametricheskiye kharakteristiki katastroficheskogo obvala v doline lednika Kolka* [Parametrical characteristics of catastrophic rockfall in Kolka glacier valley] *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2005, no. 1 (13), pp. 73–80. (in Russian)
5. Vas'kov, I.M., Valiev, A.L. *Degradatsiya Kaysarskikh lednikov i uvelichenie selevoi aktivnosti* [Degradation of Kaysarskie glaciers and the growing mudflow activity]. *Geologiya. geografiya i globalnaya energiya*, 2008, no. 3 (30), pp. 150–152 (in Russian)
6. Vas'kov, I.M., Valiev, A.L., Gogichev, R.R. *Paleoobvaly v doline r. Gizeldon, Severnaya Osetiya* [Paleo-rockfalls in Gizeldon River valley, North Ossetia]. *Ustoychivoye razvitiye gornyykh territorii v usloviyakh global'nykh izmenenii: Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. 14–16 sentyabrya 2010 g.* [Sustainable development of mountainous areas upon global changes: Proc. VII International scientific conference. September 14–16, 2010]. Vladikavkaz, 2010, 11 p. (in Russian)
7. Vaskov, I.M., Valiev, A.L. *Aktivizatsiya glyatsial'nykh selei na territorii RSO-Alaniya v nachale XXI veka* [Activation of glacial mudflows in the North Ossetia territory in the beginning of XXI century]. *Ustoychivoye razvitiye gornyykh territorii v usloviyakh global'nykh izmenenii: Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii. 14–16 sentyabrya 2010 g.* [Sustainable development of mountainous areas upon global changes: Proc. VII International scientific conference. September 14–16, 2010]. Vladikavkaz, 2010, 6 p. (in Russian)

8. Vaskov, I.M. *Ledovo-kamennye obvaly i ikh prognozirovaniye. Opyt Genaldonskoi katastrofy. Tsentralnyi Kavkaz* [Glacial rockfalls and their prediction. The experience of Genaldonskaya disaster. The Central Caucasus]. Germany, Saabryuken, LAP LAMBERT Academic Publishing. 2011. 233 p. (in Russian)
9. Vas'kov I.M. *Lokal'noe prognozirovanie opasnykh ekzogennykh protsessov na baze integrirovannogo analiza dannykh funktsioniruyushchikh sistem monitoringa (geologicheskogo, seysmicheskogo, gidrometeorologicheskogo i dr.)*. [Local prediction of hazardous exogenous processes on the basis of integral data analysis on operating monitoring systems (geological, seismic, hydrometeorological, etc.). *Geologiya i geofizika Yuga Rossii*, 2012, no. 3, pp. 13–21. (in Russian)
10. Vas'kov, I.M., Kozhiev, Kh.Kh. *Sovremennoe sostoyanie problemy prognozirovaniya prirodnykh katastrof* [Modern state-of-art in prediction of natural hazards]. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii*, 2014, no. 2, pp. 53–60. (in Russian)
11. Vas'kov, I.M. *Katastroficheskiye obvaly: proiskhozhdeniye i prognoz* [Catastrophic rockfalls: origin and prediction]. Vladikavkaz, MAVR Publ., 2016, 370 p. (in Russian)
12. Vinogradov, Yu.B. *Etyudy o selevykh potokakh* [Etudes about mudflows]. Leningrad, Gidrometizdat Publ., 1980 (in Russian).
13. Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. *Sovremennyye problemy gidrologii* [Modern problems in hydrology]. Moscow, Akademiya Publ., 2008, 319 p. (in Russian)
14. Vinogradov, Yu.B., Vinogradova, T.A. *Prikladnaya gidrologiya* [Applied hydrology]. St. Petersburg, GLTU Publ., 2014, 193 p. (in Russian)
15. Dinnik, N. Ya. *Gory i ushchelia Terskoi oblasti* [Mountains and gorges of Terskoi region]. *Zap. Kavkazskogo otdeleniya imperatorskogo geogr. obshchestva* [Transactions of Caucasus division of Imperial Geographic Society]. Tiflis, 1884, book 13, issue 1, pp. 1–48 (in Russian)
16. Dokukin, M.D. *K voprosu o formirovanii i transformatsii selei v basseine r. Gerkhozhanu* [About formation and transformation of mudflows in the basin of Gerkhozhanu River]. *Trudy VGI* [VGI Proceedings], 1985, pp. 58–72. (in Russian)
17. Dokukin, M.D., Savernyuk, E.A., Bogachenko, E.M., Ivanov, G.I. *Sel 3 avgusta 2011 g. v basseine rek Gerkhozhan-Su: prichiny, dinamika i vozmozhnyye posledstviya* [Mudflow on August 3, 2011 in the Gerkhozhan-Su River basin. Causes, dynamics, and possible consequences]. *GeoRisk*, 2012, no. 2, pp. 48–56 (in Russian)
18. Zaporozhchenko, E.V., Kamenev, N.S. *Glyatsiologicheskii faktor aktivizatsii selevykh protsessov na severnom sklonе Tsentralnogo Kavkaza v nachale XXI v.* [Glaciological factor of activation of mudflow processes on the northern slope of the Central Caucasus in the beginning of XXI century]. *Led i sneg*, 2011, no. 1 (113), pp. 131–136. (in Russian)
19. *Katalog lednikov SSSR. T. 8. Severnyi Kavkaz. Ch. 10. Basseiny rek Fiagdona i Gizeldona. Ch. 11. Bassein verkhoviev r. Tereka* [Catalogue of USSR glaciers. Part 10. Basins of Fiagdona and Gizeldona Rivers. Part 11. Basin of Terek River upper reaches]. Leningrad, GIMIZ Publ., 1977, 67 p. (in Russian)
20. Krylenko, I.V., Petrakov, D.A., Tutubalina, O.V., Chernomoretz, S.S. *Morfodinamika gornogo basseina posleselevoiy katastrofy* [Morphodynamics of mountain basin of post-mudflow catastrophe]. Available at: istina.msu.ru/media/.../9c7/.../Morfodinamika_2002.pdf
21. Laperdin, V.K., Makarov, S.A., Bardash, A.V. *Seleopasnost' basseina reki Kyngargi* [Mudflow hazard in the Kungarga River basin] *Mater. IV Mezhdunar. konf. Rossiya. g. Irkutsk – pos. Arshan (Respublika Buryatiya), 6–10 sentyabrya 2016 g.* [Proc. IV International Conference., Russia, Irkutsk -Arshan (Buryatia Republic), September 6–10, 2016.]. Irkutsk, Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, RAS, 2016, pp. 124–127. (in Russian)
22. Seinova, I.B., Zolotarev, E.A. *Ledniki i seli Prielbrusii (evolyutsiya oledeneniya i selevoi aktivnosti)* [Glaciers and mudflows in Cis-Elbrus region (evolution of glaciation and mudflow activity). Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2001, 204 p. (in Russian)
23. Seinova, I.B. *Klimaticheskie i glyatsial'nye usloviya formirovaniya selei Tsentralnogo Kavkaza na stadii regressii Malogo lednikovogo perioda* [Climatic and glacial conditions of mudflow formation in the Central Caucasus at the regression stage of minor glacial period]. *Trudy Mezhdunarodnoi konferentsii "Selevye potoki: risk, prognoz, zashchita". 22–29 sentyabrya 2008 g.* [Proc. International Conference “Mudflows: risk, prediction and protection, September 22-29, 2008]. Chernomoretz, S.S., Pyatigorsk, Sevkavgiprovodkhoz Publ., 2008. pp. 121–124 (in Russian).
24. Khromovskikh, V.S. *Kamennyi drakon* [Stony dragon]. Moscow, Mysl Publ., 1984, 165 p. (in Russian)
25. Chernomoretz, S.S. *Selevye ochagi do i posle katastrof* [Mudflow centers before and after disasters]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2005, 184 p. (in Russian)
26. Evans, S.G., Bishop, N.F., Smoll, L.F., Murillo, P.V., Delaney, K.B., Oliver-Smith, A.A. *Re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Perú, in 1962 and 1970*. *Engineering Geology*, 2009, vol. 108, p. 96–118.