

УДК 551.24 (234.9)

DOI: [10.46698/VNC.2021.54.85.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.54.85.008)

Оригинальная статья

О начальной скорости движения ледово-каменного материала, ударной воздушной волне, характере несущей среды и дальности действия взрывоподобного внезапного газодинамического выброса ледника Колка

М. Г. Бергер 

Геофизический институт – филиал ФГБУН ФНЦ «Владикавказский научный центр Российской академии наук», Россия, РСО-Алания, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова, 93а, e-mail: berger7@rambler.ru

Статья поступила: 10.06.2021, доработана: 21.07.2021, принята к публикации: 04.08.2021

Резюме: Актуальность работы. Начальная массовая скорость компактного движения выброшенного ледово-каменного материала ледника Колка, достигнутая на стадии газового ускорения в эпицентральной зоне взрывоподобного внезапного газодинамического выброса ледника, составляла около 300 м/с. Именно столь высокие значения величины начальной массовой скорости выброса основного количества ледово-каменного материала определили возможность образования сопутствовавшей выбросу ударной воздушной волны, которая и на большом расстоянии от эпицентра выброса (порядка 15 км) все еще имела значительную интенсивность. Воздушным был характер несущей среды для всего Геналдонского лавинообразного потока в пределах выделенной прежде всего по этому признаку зоны транзита на всем многокилометровом ее протяжении, а для начальной и основной стадий выброса – и за пределами этой зоны (до Скалистого хребта). Дальность же действия взрывоподобного внезапного газодинамического выброса ледника Колка 20 сентября 2002 года, безусловно, не ограничивалась лишь вместительностью ледника Колка или Колкинским цирком, как иногда полагают, а захватывала огромную территорию Колкинского и Геналдонского ущелий и была ограничена (да и то не полностью) лишь непреодолимой механической преградой Скалистого хребта. **Цель работы.** В плане сопоставления с взрывоподобными направленными газодинамическими выбросами ледников рассматривается вопрос об истории изучения направленных вулканических взрывов, установленных полстолетием ранее. **Методы работы.** Проведен анализ имеющихся данных и существующих подходов их оценок. **Результаты работы.** Показана огромная мощность взрывоподобных направленных газодинамических выбросов ледника Колка, вполне сопоставимых в данном отношении с крупными направленными вулканическими взрывами.

Ключевые слова: ледник Колка, газодинамический выброс, начальная скорость, ударная воздушная волна, несущая среда, дальность действия газодинамического выброса, Колкинская катастрофа, направленные вулканические взрывы.

Для цитирования: Бергер М. Г. О начальной скорости движения ледово-каменного материала, ударной воздушной волне, характере несущей среды и дальности действия взрывоподобного внезапного газодинамического выброса ледника Колка. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (3): 93 – 102. DOI: 10.46698/VNC.2021.54.85.008.

DOI: [10.46698/VNC.2021.54.85.008](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.54.85.008)

Original paper

On the initial velocity of the glacial-stone material movement, the air-blast, the nature of the carrier medium and the range of action of sudden explosion-like gas-dynamic surge of the Kolka glacier

M. G. Berger 

Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: berger7@rambler.ru

Received: 10.06.2021, revised: 21.07.2021, accepted: 04.08.2021

Abstract: Relevance. The initial mass velocity of the compact movement of the ejected glacial-stone material of the Kolka glacier, reached at the stage of gas acceleration in the epicentral zone of the sudden explosion-like gas-dynamic surge of the glacier, was about 300 m/s. Exactly such high values of the initial mass velocity of the surge of the main amount of glacial-stone material that determined the possibility of the formation of an accompanying ejection of the air-blast, which had a significant intensity even at a great distance from the surge epicenter (about 15 km). The nature of the carrier medium for the entire Genaldon avalanche flow was aerial within the transit zone distinguished primarily according this character along its entire length of many kilometers; and for the initial and main stages of the surge the nature was the same outside this zone (up to the Skalisty (Rocky) Ridge). The range of action of the sudden explosion-like gas-dynamic surge of the Kolka glacier on September 20, 2002, was certainly not limited only by the reservoir of the Kolka glacier or the Kolka cirque, as it is sometimes supposed, but captured the vast territory of the Kolka and Genaldon gorges and was limited (and even then not completely) only by the insurmountable mechanical barrier of the Skalisty (Rocky Ridge). **Aim.** In terms of the comparison with explosion-like directional gas-dynamic surges of glaciers, the article considers an issue of the history of study of directional volcanic explosions determined half a century earlier. **Methods.** The analysis of the available data and the existing approaches for their assessments was carried out. **Results.** The results of the work show the enormous power of explosion-like directed gas-dynamic surges of the Kolka glacier, which are quite comparable in this respect with large directed volcanic explosions.

Keywords: Kolka glacier, gas-dynamic surge, initial velocity, air-blast, carrier medium, range of action of gas-dynamic surge, Kolka catastrophe, directional volcanic explosions.

For citation: Berger M. G. On the initial velocity of the glacial-stone material movement, the air-blast, the nature of the carrier medium and the range of action of sudden explosion-like gas-dynamic surge of the Kolka glacier. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2021. 11 (3): 93 – 102. DOI: 10.46698/VNC.2021.54.85.008.

На леднике Колка мы сталкиваемся ... с особым типом движения... Значительную сложность представляет вопрос о необычно высоких скоростях движения льда.

К. П. Рототаев, В. Г. Ходаков, А. Н. Кренке

Физическая суть механизма породных выбросов представляется как спонтанный взрыв породы.

П. Я. Галушко

Взрывы на выброс и взрывы на сброс ... можно назвать направленными, или кумулятивными, поскольку действие взрыва наиболее ярко выражено в определенных направлениях.

Л. К. Белопухов

Введение

М. Ю. Никитин с соавторами [2007], по данным непосредственных полевых наблюдений и дистанционных исследований, определяют характер прегражденного Скалистым хребтом движения начальной фазы Геналдонского потока как «воздушный наброс». Именно таким – *воздушным* – был характер несущей среды для начальной, а в значительной мере и для основной фазы взрывоподобного внезапного газодинамического выброса ледника Колка.

С этим связана и огромная максимальная величина начальной скорости этого выброса, а также ударная воздушная волна, барический эффект которой ощущали, в частности, жители селения Нижнее Кани [Кусов, 2006, с. 359], расположенного примерно в 15 км от находившегося в тыльной части ледника Колка эпицентра выброса.

Собственно говоря, именно воздушным сохранялся характер несущей среды для всего Геналдонского лавинообразного потока в пределах выделенной прежде всего именно по этому признаку [Черноморец, 2005; и др.] зоны транзита на всем многокилометровом ее протяжении. И лишь после Кармадонских ворот, в Геналдонском каньоне и за ним, движение выброшенного материала, в соединении с текущей водой Геналдона, а затем и Гизельдона, приняло селевой характер, но первые километры пути это был не обычный сель, а, безусловно, исключительно высоконапорный, скорость движения которого на порядок превышала обычную скорость движения селевых потоков в субгоризонтальных русловых донных условиях.

Таким образом, дальность действия взрывоподобного внезапного газодинамического выброса ледника Колка 20 сентября 2002 г., безусловно, не ограничивалась лишь вместилищем ледника Колка или Колкинским цирком, как иногда полагают, а захватывала огромную территорию Колкинского и Геналдонского ущелий и была ограничена (да и то не полностью) лишь непреодолимой механической преградой Скалистого хребта [Заалишвили и др., 2005; Заалишвили, Мельков, 2012; Haebertli et al., 2004; Huggel et al., 2005; Zaalishvili, Melkov, 2014; Kaab et al., 2021].

Необходимо иметь в виду, что продолжительность движения начальной фазы Геналдонского потока от момента ее зарождения в эпицентре газодинамического выброса до момента столкновения (воздушного наброса) с южным склоном Скали-

стого хребта неизвестна и захватывает не всю (полную) продолжительность выброса, а только его начальную часть. Это же касается и продолжительности движения каждой последующей фазы Геналдонского потока от момента начала их движения в эпицентральной зоне выброса во вместилище ледника Колка до отложения (осаждения и остановки) в Геналдонском ущелье.

Начальная скорость движения различных частиц ледово-каменного материала при выбросе ледника Колка, как и дальность их выброса, были существенно различными (в исследованиях по физике взрыва [Баум и др., 1975, с. 634; Андреев и др., 2004, с. 745; и др.] этот вопрос получил достаточное общее разъяснение).

Из физики взрыва [Баум и др., 1975, с. 634], по результатам экспериментальных исследований подземных взрывов на выброс, известно, в частности, что «при выбросе различные частицы грунта получают разные начальные скорости. Наибольшую скорость получают частицы, лежащие на оси симметрии взрыва. Чем дальше от этой оси лежат частицы грунта, тем меньшую скорость они получают, поскольку в этих направлениях возрастает слой метаемого грунта и увеличиваются диссипативные потери. В результате при подземном взрыве на выброс образуется расширяющийся купол грунта, который затем разрушается на отдельные частицы. Эти частицы грунта продолжают полет в воздухе по законам баллистики, их траектория зависит от начальной скорости, угла вылета, коэффициента формы и массы частицы.

Часть выброшенного взрывом грунта падает назад в воронку. Профиль воронки уменьшается также за счет разрушения краев воронки. В результате видимый профиль воронки меньше воронки, непосредственно образованной взрывом до ее частичной засыпки».

Приведенное описание вполне объясняет, в частности, различную дальность отброса разных обломков ледово-каменного материала продуктов разрушения ледника Колка, наличие некоторых так называемых останцов в ложе ледника и на небольшом удалении от него, состояние воронки (полости) выброса, наблюдавшееся вскоре после выброса ледника и в последующем, заброс некоторого количества ледово-каменного материала ледника Колка высоко на скалы в эпицентральной зоне выброса и вблизи от нее (так называемые примазки) и некоторые другие факты, описанные различными исследователями Колкинской катастрофы.

В целом же необходимо заметить, что, несмотря на очень широкую и весьма длительную историю изучения, внезапный газодинамический выброс – сравнительно мало изученное явление. Впервые же установленный лишь в 2002 году взрывоподобный направленный газодинамический выброс ледника, представляющий собой новое, ранее неизвестное катастрофическое природное явление, – тем более, пока крайне мало изучен и в эмпирическом, и, особенно, в теоретическом плане.

Небезынтересно отметить в плане сравнения, что, несмотря на высокий уровень современной вулканологии, весьма длительную историю ее развития, сравнительно многочисленность вулканических извержений, имеющийся большой опыт их наблюдения и изучения, а также изучения сформированных ими накоплений, направленные вулканические взрывы впервые были установлены, диагностированы (идентифицированы в качестве направленных вулканических взрывов) и выделены в качестве особого типа вулканических извержений лишь после проявления и глубокого изучения гигантского направленного взрыва камчатского вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. [Горшков, 1963]. Как заметили по данному поводу Г.С. Горшков и Ю.М. Дубик [1969, с. 35], «извержения такого типа наблюдались и

ранее в других областях, но не были правильно поняты». В частности, в какой-то мере эталонные в данном отношении, так сказать, генотипические продукты извержения японского вулкана Бандай 15 июля 1888 года в течение длительного времени «рассматривались не как взрывные, а как образовавшиеся в результате обвала или оползня [там же] (см. также [Горшков, Богоявленская, 1965, с. 160]).

Как известно, именно так, как обвал, ледниковую (гляциодинамическую) подвижку оползневого характера и сель рассматривали, а в значительной мере все еще продолжают рассматривать и Колкинскую катастрофу 20 сентября 2002 года в эпицентральной области ее проявления.

После установления (идентификации) Г. С. Горшковым направленных вулканических взрывов как особого типа вулканических извержений для идентификации взрывоподобных направленных газодинамических выбросов ледников (неоднократно происходивших и в XX, и в XIX, и в XVIII вв., и, безусловно, ранее) потребовались еще почти полвека, в течение которых в различных районах мира произошли несколько совершенно неожиданных гигантских ледниковых катастроф, в которых погибли десятки тысяч людей. И лишь гигантская, крупнейшая в истории человечества по объему выброшенного материала (порядка 100 млн м³) ледниковая катастрофа, происшедшая 20 сентября 2002 года на леднике Колка и в Геналдонском ущелье, позволила установить (диагностировать, идентифицировать) внезапные взрывоподобные направленные газодинамические выбросы ледников [Бергер, 2006а, б, 2007 и др.], выделить их в качестве особого, ранее неизвестного геодинамического типа пароксизмальных ледниковых пульсаций (и чрезвычайно опасных природных явлений катастрофического уровня) и положила начало их целенаправленному изучению с учетом их глубинной эндогенной в значительной мере поствулканической газодинамической природы.

Методы работы

Имеет смысл, однако, определить величину начальной скорости массового движения *основного количества* компактно выброшенного ледово-каменного материала продуктов разрушения ледника Колка с использованием методики расчета начальной скорости продуктов направленных вулканических взрывов, изложенной, в частности, в работе А. Е. Шейдеггера [1981, с. 62-63] и применяемой вулканологами [Горшков, Богоявленская, 1965; Ермаков, 1969; и др.]:

$$V_0 = \sqrt{Lg},$$

где V_0 – начальная скорость выброшенного материала, м/с;

L – дальность выброса, м;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Использование этой формулы в случаях, когда выбрасывание материала происходит под углом, существенно отличающимся от 45°, дает заниженные, по сравнению с действительными, значения начальной скорости V_0 .

Если принять дальность выброса (компактного инерциального движения по воздуху в зоне транзита) основного количества ледово-каменного материала продуктов разрушения ледника Колка, равной 9-10 км, что близко к минимальной ее величине [Никитин и др., 2007; Дробышев, 2012; Черноморец, 2005; Петраков и др., 2004], то, согласно приведенной формуле, получаем, что начальная скорость выброса этого материала (максимальная массовая скорость движения выброшен-

ного материала, достигнутая на стадии газового ускорения в эпицентральной зоне выброса) составляла около 300 м/с.

По данным М. Ю. Никитина и др. [2007, с. 8], «протяженность зоны транзита до южного склона Скалистого хребта для основной стадии выброса составляет 13,5 км». В эту величину, очевидно, не включена зона начального движения [Черноморец, 2005, с. 112] продуктов разрушения ледника Колка от эпицентра выброса в тыльной части ледника Колка до поворота долины у языка ледника Майли.

Необходимо также учитывать, что наиболее высокоскоростная начальная часть Геналдонского ледово-каменного потока и следовавшая за ней его основная часть, разделяемые на основе имеющихся фактов М. Ю. Никитиным и др. [2007], были остановлены лишь непреодолимой механической преградой Скалистого хребта. Совершенно очевидно, что для этих стадий наблюдаемая дальность выброса ледово-каменных продуктов разрушения ледника Колка существенно меньше той, какой она была бы при беспрепятственном их движении (а именно такая, а не ограниченная непреодолимыми преградами дальность выброса должна учитываться при определении величины начальной скорости движения выброшенного материала).

Результаты работы и их обсуждение

Так что полученная начальная скорость выброса существенно меньше действительной ее величины.

Именно столь высокие значения величины начальной массовой скорости выброса основного количества ледово-каменного материала определили возможность образования сопутствовавшей выбросу *ударной воздушной волны*, которая и на большом расстоянии от эпицентра выброса (порядка 15 км) все еще имела значительную интенсивность [Никитин и др., 2007; Заалишвили и др., 2008; Супруненко, 2005; Панов и др., 2002; Кусов, 2006; Васьков, 2004; Васьков и др., 2004; и др.]. Согласно М. А. Садовскому [1994, с. 36], выдающемуся специалисту в области геофизики и физики взрыва, «следует думать, что одним из основных критериев, определяющих возможность образования ударной волны, является величина массовой скорости продуктов взрыва, достаточная для того, чтобы сообщаемая воздуху энергия не успевала рассеиваться звуковыми волнами».

Одно только это полностью исключает любые предположения о срыве, соскальзывании (сдвиге, выскальзывании и т. п.) ледника Колка, а заодно опровергает и многочисленные мнения о гляциальной, гидрогляциальной, гидравлической, селевой, гравитационно-гидравлической, склоново-гравитационной, импактно-гидравлической, импактной (обвально-ударной), сейсмотектонической и т. п. природе Колкинской катастрофы, решающей роли воды, набора ледником некой критической массы, гравитационного агента переноса, а также многих других упоминаемых различными авторами факторов в этой катастрофе, за исключением газового.

При всех генетических, вещественных и других различиях между отложениями взрывоподобного направленного газодинамического выброса ледника Колка и отложениями направленных вулканических взрывов, в частности, отложениями, возникшими в результате пароксизмального эксплозивного извержения вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. [Горшков, Богоявленская, 1965; Мелекесцев, 2004; и др.], нельзя не заметить некоторое седиментологическое сходство между ними, что обусловлено, прежде всего, значительными элементами сходства основного механизма транспортировки (инерциального движения по воздуху) и субаэрального

характера среды накопления основного количества этих отложений при ведущей роли в процессах выброса материала сверхвысокого давления природных газов – в одном случае (на леднике Колка) поствулканических, в другом (на вулкане Безымянный) – собственно вулканических.

Выводы

Основной причиной, основным действующим фактором, вызывающим переход от равновесных условий к сильно неравновесным, обуславливающим неустойчивость природных систем (соответственно, вулканических и ледниковых) и вызывающим проявление грандиозных пароксизмальных природных катастроф взрывного и взрывоподобного направленного газодинамического характера, и в том, и в другом случае являются высоконапорные глубинные природные газы и перенос ими гигантских давлений в верхние горизонты земной коры.

Во многом сходными в некоторых случаях являются и отложения, возникшие в результате этих явлений, в связи с чем не приходится удивляться тому, что генезис таких отложений (ледниковый или же вулканический) иногда остается в течение десятилетий дискуссионным, как, например, в случае отложений у подножия камчатского вулкана Камень (одного из вулканов Ключевской группы) [Ермаков, 1969 и др.].

В частности, как известно [Горшков, Богоявленская, 1965, с. 76 и 162; и др.], при направленных вулканических взрывах, наряду со средне-, мелко- и тонкодисперсным материалом (ювенильным и резургентным), выбрасываются и крупные глыбы, иногда объемом в десятки кубических метров. Подобные же гигантские глыбы (именуемые «останцами» или «массивами льда и камней» [Черноморец, 2005, с. 113-114]) были выброшены и при направленном выбросе ледника Колка 20 сентября 2002 г. Аналогичные явления были отмечены и при предыдущей пароксизмальной катастрофе на леднике Колка и в Геналдонском ущелье в 1902 г., в том числе на значительном удалении (более 6 км) от ледника и, что особенно существенно, на значительной высоте (не менее 60 м над дном долины) [Поггенполь, 1905, с. 6], «отдельные же глыбы были подброшены на высоту 140 метров» [Поггенполь, 1905, с. 11].

Приведенные в данной работе и многие другие факты свидетельствуют об огромной мощности взрывоподобных направленных газодинамических выбросов ледника Колка, вполне сопоставимых в данном отношении с крупными направленными вулканическими взрывами.

Литература

1. Андреев С.Г., Бабкин А.В., Баум Ф.А., Имховик Н.А., Кобылкин И.Ф., Колпаков В.И., Ладов С.В., Одинцов В.А., Орленко Л.П., Охитин В.Н., Селиванов В.В., Соловьев В.С., Станюкович К.П., Челышев В.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. / Под ред. Л.П. Орленко. Изд. 3-е, испр. В 2 т. Т. 1. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 832 с.
2. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П., Челышев В.П., Шехтер Б.И. Физика взрыва. / Под ред. К.П. Станюковича. Изд. 2-е, перераб. – М.: Наука. Главная редакция физ.-мат. лит., 1975. – 704 с.
3. Бергер М.Г. Природная катастрофа на леднике Колка 20 сентября 2002 г. – внезапный газодинамический выброс ледника. // Предупреждение опасных ситуаций в высокогорных районах: Доклады Международной конференции. Владикавказ-Москва, 23-26 июня 2004 г. – Владикавказ: Олимп, 2006а. – С. 41-49.
4. Бергер М.Г. Газодинамический выброс ледника Колка 20 сентября 2002 г. // Вестник Владикавказского научного центра РАН и СО-А. – 2006б. – Т. 6. №2. – С. 33-37.

5. Бергер М. Г. Ледник Колка: Катастрофа 20 сентября 2002 г. – внезапный газодинамический выброс ледника. – М.: Изд-во ЛКИ, 2007. – 248 с.
6. Васьков И. М. Возможный механизм обвала и динамика движения ледово-каменных масс в верховьях р. Геналдон (на Центральном Кавказе в сентябре 2002 года). // Вестник Владикавказского научного центра РАН и РСО-А. – 2004. – Т. 4. № 2. – С. 34-45.
7. Васьков И. М., Долгов Г. А., Музаев И. Д., Пикалюк Г. В. Динамика движения масс ледово-каменного обвала в верховьях р. Геналдон РСО-А 20 сентября 2002 года. // Вестник Владикавказского научного центра РАН и РСО-А. – 2004. – Т. 4. № 1. – С. 18-26.
8. Горшков Г. С. Направленные вулканические взрывы // Геология и геофизика. – 1963. – № 12. – С. 25-31.
9. Горшков Г. С., Богоявленская Г. Е. Вулкан Безымянный и особенности его последнего извержения (1955-1963 гг.). – М.: Наука, 1965. – 172 с.
10. Горшков Г. С., Дубик Ю. М. Направленный взрыв на вулкане Шивелуч. // Вулканы и извержения. – М.: Наука, 1969. – С. 3-37.
11. Дробышев В. Н. Гляциальная катастрофа Северной Осетии 20 сентября 2002 года. // Вестник Владикавказского научного центра РАН и РСО-А. – 2012. – Т. 12. № 3. – С. 20-36.
12. Ермаков В. А. Отложения направленного взрыва вулкана Камень. // Вулканы и извержения. – М.: Наука, 1969. – С. 82-93.
13. Заалишвили В. Б., Бондырев И. В., Невская Н. И., Невский Л. Н. Макросейсмическое обследование зоны схода ледника Колка 20 сентября 2002 года. // Опасные природные и техногенные геологические процессы на горных и предгорных территориях Северного Кавказа: Труды Международной научно-практической конференции. Владикавказ, 20-22 сентября 2007 г. – Владикавказ: ВНИЦ РАН и РСО-А, 2008. – С. 174-184.
14. Заалишвили В. Б., Невская Н. И., Макиев В. Д., Мельков Д. А. Интерпретация инструментальных данных процесса схода ледника Колка 20 сентября 2002 года. // Вестник Владикавказского научного центра. – 2005. – № 3. – С. 43-54.
15. Заалишвили В. Б., Мельков Д. А. Особенности процесса схода ледника Колка 20 сентября 2002 г. и его макросейсмическое проявление по инструментальным данным современных регистрационных систем. // Геология и геофизика Юга России. – 2012. – № 3. – С. 29-44.
16. Мелекसेцев И. В. О взрывном происхождении обломочной лавины пароксизмальной фазы катастрофического извержения вулкана Безымянный 30 марта 1956 г. на Камчатке. // Вулканология и сейсмология. – 2004. – № 2. – С. 9-23.
17. Никитин М. Ю., Гончаренко О. А., Галушкин И. В. Динамика и стадийность развития Геналдонского ледово-каменного потока на основе дистанционного анализа. // Вестник Владикавказского научного центра РАН и РСО-А. – 2007. – Т. 7. № 3. – С. 2-15.
18. Панов В. Д., Ильичев Ю. Г., Лурье П. М. Ледниковый обвал в горах Северной Осетии в 2002 г. // Метеорология и гидрология. – 2002. – № 12. – С. 94-98.
19. Петраков Д. А., Тутубалина О. В., Черноморец С. С. По следам Геналдонской катастрофы: год спустя. // Криосфера Земли. – 2004. – Т. VIII. № 1. – С. 29-39.
20. Поггенполь Н. В. По северным долинам Казбекского массива и первое восхождение на Майли-хох. // Ежегодник Русского горного общества. 1903. – 1905. – Вып. III. – С. 1-37.
21. Садовский М. А. Механическое действие воздушных ударных волн по данным экспериментальных исследований. // Механическое действие взрыва. Сборник. – М.: ИДГ РАН, 1994. – С. 7-102.
22. Супруненко Ю. Были предсказуем сход Колки? // Техника молодежи. – 2005. – № 12. – С. 24-26.
23. Черноморец С. С. Селевые очаги до и после катастроф. – М.: Научный мир, 2005. – 184 с.
24. Шейдеггер А. Е. Физические аспекты природных катастроф. – М.: Недра, 1981. – 232 с.
25. Haerberli W., Huggel C., Kaab A., Zraggen-Oswald S., Polkvoj A., Galushkin I., Osokin N. The Kolka-Karmadon rock/ice slide of 20 September 2002: an extraordinary event of

historical dimensions in North Ossetia, Russian Caucasus. // *Journal of Glaciology*. – 2004. – Vol. 50 (171). – pp. 533-546. <https://doi.org/10.3189/172756504781829710>

26. Huggel C., Zraggen-Oswald S., Haerberli W., Kaab A., Polkvoj A., Galushkin I., Evans S.G. The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. – 2005. – Vol. 5 (2). – pp. 173-187. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-173-2005>

27. Kaab A., Jacquemart M., Gilbert A., Leinss S., Girod L., Huggel C., Kargel J.S. Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers more frequent than thought? // *Cryosphere*. – 2021. – Vol. 15 (4). – pp. 1751-1785. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1751-2021>

28. Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. // *Izvestiya-Physics of the Solid Earth*. – 2014. – Vol. 50. No. 5. – pp. 707-718. DOI: 10.1134/S1069351314050097

References

1. Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A., Imkhovik N.A., Kobylkin I.F., Kolpakov V.I., Ladov S.V., Odintsov V.A., Orlenko L.P., Okhitin V.N., Selivanov V.V., Soloviev V.S., Stanyukovich K.P., Chelyshev V.P., Shekhter B.I. Explosion physics. Ed. 3rd, rev. In 2. Vol. 1. Moscow. FIZMATLIT, 2004. 832 p. (In Russ.)

2. Baum F.A., Orlenko L.P., Stanyukovich K.P., Chelyshev V.P., Shekhter B.I. Explosion physics. Ed. 2nd, rev. Moscow. Nauka. Main editorial office phys.-math. lit., 1975. 704 p.

3. Berger M.G. Natural disaster on the Kolka glacier on September 20, 2002 – a sudden gas-dynamic glacier outburst. In: Reports of the International Conference “Prevention of dangerous situations in high-mountainous areas”. Vladikavkaz-Moscow, June 23-26, 2004 Vladikavkaz. Olympus, 2006a. pp. 41-49. (In Russ.)

4. Berger M.G. Gas-dynamic outburst of the Kolka glacier on September 20, 2002. Bulletin of the VSC RAS and RNO-A, 2006b. Vol. 6. No. 2. pp. 33-37. (In Russ.)

5. Berger M.G. Kolka Glacier: Catastrophe on September 20, 2002 – a sudden gas-dynamic glacier outburst. Moscow. LKI, 2007. 248 p. (In Russ.)

6. Vaskov I.M. Possible mechanism of collapse and dynamics of movement of ice-stone masses in the upper reaches of the river Genaldon (in the Central Caucasus in September 2002). Bulletin of the VSC RAS and RNO-A, 2004. Vol. 4. No. 2. pp. 34-45. (In Russ.)

7. Vaskov I.M., Dolgov G.A., Muzaev I.D., Pikalyuk G.V. The dynamics of the movement of the masses of the ice-rock avalanche in the upper reaches of the river. Genaldon RNO-A September 20, 2002. Bulletin of the VSC RAS and RNO-A, 2004. Vol. 4. No. 1. pp. 18-26. (In Russ.)

8. Gorshkov G.S. Directed volcanic explosions. *Geology and Geophysics*, 1963. No. 12. pp. 25-31. (In Russ.)

9. Gorshkov G.S., Bogoyavlenskaya G.E. Bezmyanny volcano and features of its last eruption (1955–1963). Moscow. Nauka, 1965. 172 p. (In Russ.)

10. Gorshkov G.S., Dubik Yu.M. Directional explosion on Shiveluch volcano. *Volcanoes and eruptions*. Moscow. Nauka, 1969. pp. 3-37. (In Russ.)

11. Drobyshev V.N. The glacial catastrophe of North Ossetia on September 20, 2002. Bulletin of the VSC RAS and RNO-A. 2012. Vol. 12. No. 3. pp. 20-36. (In Russ.)

12. Ermakov V.A. Deposits of the directed explosion of the Kamen volcano. *Volcanoes and eruptions*. Moscow. Nauka, 1969. pp. 82-93. (In Russ.)

13. Zaalishvili V.B., Bondyrev I.V., Nevskaya N.I., Nevsky L.N. Macro seismic survey of the Kolka glacier collapse zone on September 20, 2002. In: Proceedings of the International Conference Hazardous natural and technogenic geological processes in the mountainous and foothill territories of the North Caucasus. Vladikavkaz, September 20-22, 2007. Vladikavkaz. VSC RAS and RNO-A, 2008. pp. 174-184. (In Russ.)

14. Zaalishvili V.B., Nevskaya N.I., Makiev V.D., Melkov D.A. Interpretation of the instrumental data on the Kolka rock/ice surge on September 20, 2002. *Vestn. Vladikavkaz. Nauch. Tsentra*, 2005. – Vol. 5. No. 3. pp. 43-54. (In Russ.)
15. Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Features of process and macroseismic evidence of glacier Kolka fall 20 September 2002 on instrumental data of modern observation systems. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2012. No. 3. pp. 29-44. (in Russ.).
16. Meleksetsev I.V. On the explosive origin of the debris avalanche of the paroxysmal phase of the catastrophic eruption of Bezmyanny volcano on March 30, 1956 in Kamchatka. *Volcanology and seismology*, 2004. No. 2. pp. 9-23. (In Russ.)
17. Nikitin M. Yu., Goncharenko O. A., Galushkin I. V. Dynamics and development stages of the Genaldon ice-rock stream based on remote sensing analysis. *Bulletin of the VSC RAS and RNO-A*, 2007. Vol. 7. No. 3. pp. 2-15. (In Russ.)
18. Panov V.D., Ilyichev Yu.G., Lurie P.M. Glacial landslide in the mountains of North Ossetia in 2002. *Meteorology and Hydrology*, 2002. No. 12. pp. 94-98. (In Russ.)
19. Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Chernomorets S.S. In the wake of the Genaldon catastrophe: a year later. *Cryosphere of the Earth*, 2004. Vol. VIII. No. 1. pp. 29-39. (In Russ.)
20. Poggenpol N.V. Along the northern valleys of the Kazbek massif and the first ascent of Maili-Khokh. *Yearbook of the Russian Mining Society*, 1903. 1905. Issue III. pp. 1-37. (In Russ.)
21. Sadovsky M.A. Mechanical action of air shock waves according to experimental studies. *Mechanical action of the explosion. Collection. Moscow. IDG RAS*, 1994. pp. 7-102. (In Russ.)
22. Suprunenko Yu. Was Kolka glacier collapse predictable? *Technology of youth*, 2005. No. 12. pp. 24-26. (In Russ.)
22. Chernomorets S. S. *Mudflow sources before and after disasters. Moscow. Nauchnyi mir*, 2005. 184 p. (In Russ.)
24. Sheidegger A. E. *Physical aspects of natural disasters. Moscow. Nedra*, 1981. 232 p. (In Russ.)
25. Haerberli W., Huggel C., Kaab A., Zraggen-Oswald S., Polkvoj A., Galushkin I., Osokin N. The Kolka-Karmadon rock/ice slide of 20 September 2002: an extraordinary event of historical dimensions in North Ossetia, Russian Caucasus. *Journal of Glaciology*, 2004. Vol. 50 (171). pp. 533-546. <https://doi.org/10.3189/172756504781829710>
26. Huggel C., Zraggen-Oswald S., Haerberli W., Kaab A., Polkvoj A., Galushkin I., Evans S.G. The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2005. Vol. 5 (2). pp. 173-187. <https://doi.org/10.5194/nhess-5-173-2005>
27. Kaab A., Jacquemart M., Gilbert A., Leinss S., Girod L., Huggel C., Kargel J. S. Sudden large-volume detachments of low-angle mountain glaciers more frequent than thought? *Cryosphere*, 2021. Vol. 15 (4). pp. 1751-1785. <https://doi.org/10.5194/tc-15-1751-2021>
28. Zaalishvili V.B., Melkov D.A. Reconstructing the Kolka surge on September 20, 2002 from the instrumental seismic data. *Izvestiya-Physics of the Solid Earth*, 2014. Vol. 50. No. 5. pp. 707-718. DOI: 10.1134/S1069351314050097