

Актуальные проблемы

УДК 551. 23

**ПОДЛЕДНОЕ ГЕОТЕРМАЛЬНОЕ ИЗВЕРЖЕНИЕ – ВОЗМОЖНАЯ ПРИЧИНА
КАТАСТРОФИЧЕСКОГО «ВЫБРОСА» ЛЕДНИКА В КАЗБЕКСКОМ
ВУЛКАНИЧЕСКОМ МАССИВЕ (КАВКАЗ)**

© 2004 Я. Д. Муравьев

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9.
Факс: (415-22)59130; e-mail: muryd@kcs.iks.ru*

Предлагается объяснение причин необычного поведения пульсирующего ледника Колка на Кавказе, которые приводят к гляциальным катастрофам в Кармадонском ущелье, подобным 20 сентября 2002 г.

Материалы визуальных наблюдений свидетельствуют, что в течение первых недель после 20 сентября 2002 г. на склонах Джимарай-хох, обнажившихся после обвала, происходило интенсивное истечение паров и газов в двух местах на склоне в виде устойчивых султанов фумарол. В тыловой части колкинского цирка стояло плотное парогазовое облако, стелившееся над ложем ушедшего ледника и стекавшее вниз по долине (рис. 1 на 1 стр. обложки). Местами парогазовые струи имели прерывистое истечение, в виде относительно ритмичных выбросов. Из-под обрывов висячих ледников на высотах от 4000 м и выше были видны потоки воды. Ощущения сотрудников МЧС, высадившихся 24 сентября на боковой морене в верховьях ледника Колка, свидетельствуют о наличии в атмосфере повышенного содержания углекислого газа с примесью H_2S : отмечались тошнота, головные боли, запах сероводорода (что, возможно, усиливалось симптомами горной болезни от быстрого набора высоты на вертолете).

Поэтому, наряду с гляциологическими, метеорологическими и сейсмическими причинами обрушения ледника, в этой работе предло-

жен еще один механизм - геохимический, возможно, объясняющий особенности его необычного поведения.

Во время рекогносцировочной поездки в РСО-Алания в начале октября 2002 г. было установлено, что, действительно, имеются явные признаки проявления гидротермальной активности, включающие повышенную температуру на ложе ледника и интенсивные парогазовые выделения с освободившейся ото льда площади. Эти проявления могут быть связаны как с активизацией тектонического разлома (очевидно посредством реакции гидротермальной системы в ее недрах), так и с возможным возобновлением вулканической деятельности в этом районе и/или гидротермальными поствулканическими процессами в недрах Казбекско-Джимарайского вулканического массива.

В результате обобщения данных о тектонике, гидрогеологии, гидрохимии района, характере сейсмической деятельности и существенных изменениях после ледниковой катастрофы химического состава талого стока из колкинского цирка, а также по историческим свидетельствам о сходах этого ледника в прошлом (Варданянц,

1932а, 1932б; Дзгоев, 1965; Лейцингер, 1904; Пхалагова, 1976; Рототаев и др., 1983; Святловский, 1959; Хатисян, 1899; Штебер, 1903 и др.) предложено объяснение необычной скорости и масштабности «выбросов» (Котляков и др., 2003) ледника Колка, провоцируемых взрывообразным расширением геотермальных газов в его теле. С учетом гипотезы повторяющихся газовых извержений можно объяснить некоторые особенности в механизме развития вроде бы чисто гляциальной катастрофы как в этой долине, так и на некоторых других ледниках Казбекско-Джигмарайского вулканического массива (Абих, 1874; Варданянц, 1932а; Духовской, 1915; Шершенко, 1904).

Краткая характеристика района

Расположенный вкрест простирания крупных разновозрастных геологических структур бассейна реки Геналдон сложен разнообразными горными породами, нередко сложнодислоцированными. Южная часть, собственно Казбекско-Джигмарайский горный массив, - это высокоподнятый (до 5000 м) ниже- и среднепалеозойский фундамент, представленный кристаллическими сланцами и гнейсами, прорванными местами интрузиями гранитоидов средне- и верхнепалеозойского возраста. Этот массив венчает Боковой хребет на западе Центральной части Большого Кавказа. В нижнем плейстоцене на этом фундаменте возникло Казбекское вулканическое сооружение, активная деятельность которого продолжалась, по крайней мере, до середины голоцена. Изверженные породы представлены андезитодацитовыми лавами. Севернее, центральная зона представлена в основном толщей глинистых сланцев среднего и верхнего лейаса с прослоями песчаников и вулканогенного материала (Растворова, 1973; Святловский, 1959; Ольховский, Тибилев, 1998*).

Структурные особенности территории обусловлены ее сложным строением (Растворова, 1973). Дарьяльский горст-антиклинорий южной зоны осложнен блоковыми смещениями палеозойского фундамента и ограничен зонами

крупных продольных глубинных разломов и разрывов с взбросовыми и надвиговыми деформациями коры. По новейшим разрывам и тектоническим швам сформировались продольные депрессии, разделяющие Боковой и Скалистый хребты (Кармадонская котловина). К ним относится и депрессия, занятая ледниками верховьев бассейна реки Гизельдон. Существенная, а иногда и двойная роль принадлежит поперечным разрывам. Так, в Джигмарайском массиве ими спровоцированы серии гранитных неинтрузий, а крупный, безамплитудный Геналдонский разрыв стал ослабленной зоной, предопределившей направление речного стока и заложение долины, служащей ныне зоной транзита для ледяных «выбросов» из колкинского цирка.

Геотектоническая дифференциация разнонаправленных глубинных процессов в земной коре обуславливает неоднородность температурного поля Земли. В Кармадонской котловине, в скважинах измерен тепловой поток, который вдвое выше, по сравнению с предгорьями (Рототаев и др., 1983). Это - известный геотермальный район с широким проявлением горячих источников, приуроченных к дну долины реки Геналдон. Подобное обстоятельство обязательно должно сказываться на режиме и динамике ледников в этом районе. Кроме того, современные тектонические движения и блоковые смещения в земной коре вызывают высокую сейсмичность территории и оказывают влияние на характер гравитационных процессов. На границе бассейна реки Гизельдон сосредоточены группы эпицентров землетрясений с магнитудой до 7 (Рототаев и др., 1983).

Истоки реки Геналдон, наиболее крупного правого притока реки Гизельдон, берут начало с ледников Колка и Майли, и после слияния ледниковых речек р. Геналдон течет в северном направлении. В верховьях расположены знаменитые термальные углекислые хлоридно-натриевые Кармадонские минеральные воды. Исходя из близости магматического очага современного вулканизма (последние извержения андезитовых лав Казбека - эруптивные центры 2-я Валгашка и вершина 4004 - были от 3 до 6 тыс. лет назад (Варданянц, 1932а; Святловский, 1959), допускается также, что в формировании запасов минеральных источников определенное участие принимают и ювенильные воды. Большое разнообразие макро- и микроэлементов в термальных водах Верхне-Кармадонского мес-

* Ольховский Г.П., Тибилев С.М. // Составление специализированной геологической основы масштаба 1:50000 для прогнозно-металлогенической карты Горной Осетии по работам 1992-1998 гг. Отчет. Фонды «Севосгеологоразведка», Владикавказ, 1998. 578 с.

торожения, с одной стороны, свидетельствует о большом разнообразии омываемых ими пород, а с другой – об активном влиянии пост-вулканических эксгаляций. В целом же выходы углекислых вод вокруг подножия горы являются косвенным доказательством деятельности магматического очага Казбекского вулканического массива (Пхалагова, 1976).

Наиболее информативным источником об эндогенности процессов проявляющихся на дневной поверхности, является химический состав газов, а также подземных и поверхностных вод. В связи с тем, что пробы газов отобрать сразу после схода ледника не удалось (да и вряд ли это на тот момент было возможно), попробуем оценить их состав и возможный генезис по химическим особенностям природных вод этого района.

Гидрохимические особенности природных вод района

Для начала рассмотрим состав атмосферных осадков, речного стока, ледникового льда и термальных источников, характерных для бассейна реки Геналдон в период, предшествовавший катастрофе. Данные взяты из монографий У.С. Дзгоева (1965) и Д.М. Пхалаговой (1976).

О фоновом химическом составе в этом районе можно судить по метеорным водам, а о степени влияния на них локальных условий – по химическим примесям в ледниковом льду и талом стоке из бассейна (табл.1). В вариациях содержания макрокомпонентов в пробах видно, что если жидкие и твердые атмосферные осадки отвечают региональному фону, то на их трансформацию в леднике Майли воздействуют выходы минеральных вод под правым бортом ледника. А талый сток, вообще, фиксирует значительную разницу в гидрогеологической обстановке бассейнов разных притоков (см. табл.1).

В конце июня 2003 г. сотрудниками Института географии РАН О.В. Рототаевой и Г.А. Носенко были отобраны несколько проб снега, льда и воды из бассейна ледника Колка (табл. 1, пробы 7-9, 14). Их анализ показал существенные различия содержания ряда элементов, в сравнении с данными о химических примесях в поверхностных водах до событий 2002 г. Лишь пробы сезонного снега зимы 2002/03 гг. близки фоновому составу атмосферных осадков района.

Величину отношения S/Cl в вулканологической практике принято считать показателем связи с глубинным флюидом. При анализе таблицы 1 видно, что это отношение несколько увеличилось для образцов льда, оставшегося в цирке после схода ледника, и возрастает в талом стоке из его бассейна (табл. 1, проба 14).

Перейдем теперь к подземным водам. Термальные источники в верховьях реки Геналдон связаны с трещиноватостью по глубинным разломам и группируются в три очага разгрузки (табл. 2):

а) Колкинские источники. Эти источники расположены в боковой морене ледника Майли, в 850 м к югу от Верхне-Кармадонской группы. Содержание углекислого газа в воде достигает 1100 мг/л. Воды углекислые хлоридно-гидрокарбонатные натриевые с температурой от 8 до 12°C и минерализацией от 2980 до 4860 мг/л. По температуре их нельзя отнести к термальным водам, но по макрокомпонентному составу они очень близки к верхнекармадонским источникам.

б) Майлийское подледниковое месторождение термальных углекислых вод. Исследования талого стока и льда на языке позволили косвенно установить наличие мощной разгрузки углекислых высокоминерализованных вод под ледником Майли с преобладанием в ионном составе Cl и Na.

в) Группа Верхне-Кармадонских источников, расположенных к северу от ледника Майли, наиболее изучена в этом районе и наблюдается с 1878 г. Температура воды на выходе меняется от 20 до 60°C, а минерализация - от 1.97 до 10.3 г/л. Содержание борной кислоты доходит до 300 мг/л, кремневой – до 80 мг/л. Содержание свободной углекислоты не превышает 600 мг/л.

При рассмотрении данных таблицы 2 необходимо отметить, что все эти минеральные углекислые хлоридные натриевые воды, очевидно, имеют единый источник формирования - гидротермальный резервуар (гидротермальную систему) и отличаются лишь приповерхностными условиями разгрузки. Последние существенно влияют на вариации в содержании макрокомпонентов и температуру воды.

Температуры гидрохимических равновесий, рассчитанные по геотермометрам из ионных отношений растворенных солей (Гогель, 1978; Таран и др., 1986) в недрах Верхнекармадонской системы показывают, что зафиксирован-

ПОДЛЕДНОЕ ГЕОТЕРМАЛЬНОЕ ИЗВЕРЖЕНИЕ

Таблица 1. Химический состав атмосферных осадков и речных вод в верховьях реки Геналдон, мг/л

№	Проба осреднен ная за сезон	S/Cl	pH	Мине- рали- зация	NH ₄ ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Верхний Кармадон (Пхалагова, 1976)												
1	Зима	1.59	6.0	9.23	0.34	0.27	0.17	1.46	0.25	0.45	2.14	3.90
2	Лето	1.78	5.85	7.75	0.34	0.21	0.15	1.16	0.19	0.34	1.81	3.31
3	Год	1.70		8.28	0.34	0.23	0.16	1.27	1.21	0.38	1.93	3.51
Лед на языке ледника Майли (Пхалагова, 1976)												
4	Пр. борт	0.12	6.83	42.31	0.46	5.86	3.69	3,35	0.39	9.31	3.36	15.79
5	Лев. борт	0.058	6.41	7.94	0.20	0.68	0.71	0.27	0.24	2.23	0.39	1.52
6	Центр	0.54	6.25	10.21	0.43	0.69	0.45	0.64	0.07	1.69	2.75	3.1
Состав снега, льда и талых вод на леднике Колка после катастрофы (отбор 28.06.2003 г.)												
7	Снег	0.19	5.60	6.3	-	0.14	0.11	0.4	0.7	2.80	1.60	0.6
8	Лед	3.48	7.31	81.2	-	0.4	0.28	15.2	3.9	2.1	21.9	37.4
9	Лед	7.87	7.10	50.8	-	0.3	0.25	10.4	1.9	0.70	16.5	20.70
Химический состав воды рек бассейна Геналдон 1968-69 гг. (Пхалагова, 1976)												
10	Геналдон	0.16		432.1	0.43	58.8	6.18	51.8	9.1	128.5	61.5	115.3
11	Кауридон	11.11		182.8	0.13	20.5	0.26	24.4	3.7	1.31	43.6	88.8
12	Геналдон подвижка 1969 г.	0.12	7.6	788	-	166	8.62	40.7	30.4	231	84.5	227.0
13	Колка, 1968 г.	0.7		166.0	0.15	11.0.	1.0	31.0	3.2	19.3	40.6	58.2
		0.69		196.0	0.65	14.1	1.6	34.1	3.0	17.1	35.2	89.2
Химический состав сточных вод из бассейна Колки после события, отбор 28.06.2003 г.												
14	Колка	32.3	7.90	1004		10.8	4.2	212	44	6.4	620	107.4

Примечание. Аналитик проб 2003 г. А.А. Смышляева (ЦХЛ ИВиС ДВО РАН)

ные гидрохимические отношения эквивалентны равновесию при глубинных температурах порядка 250-270°C. Мы опирались в основном на Na/K-геотермометр, так как его важным достоинством (по сравнению с другими геохимическими термометрами, например, Na-K-Ca) является наименьшая зависимость от побочного влияния процессов фазового разделения и смешения гидротермальных растворов с холодными поверхностными водами. В целом подобные глубинные температуры характерны для высокотемпературных гидротермальных систем, связанных с очагами действующих вулканов (Таран и др., 1986).

В многолетних колебаниях химического состава одного из самых типичных источников Верхнего Кармадона, № 9 по У. Дзгоеву (1965),

наблюдаются некоторые значимые закономерности (во время подвижки ледника в 1969 г. источник № 9 был уничтожен, но, тем не менее, с ним сегодня ассоциируют наиболее высокотемпературные современные выходы с этой площади).

Начиная с первой пробы, отобранной в 1878 г., за прошедшие 125 лет на фоне незначительных вариаций состав проб этих источников во время начала подвижки ледника Колка в августе 1969 г. заметно отличается от приведенных ранее в литературе. В частности, в этих пробах отмечено повышение на 50-60 % содержания сульфатов. Тогда же, после сильных ливневых осадков и оползневых процессов на площади термальных источников, изменились и физико-химические свойства воды в источни-

МУРАВЬЕВ

Таблица 2. Сравнительная характеристика химического состава минеральных вод в верховьях бассейна реки Геналдон, мг/л

№ проб	Дата отбора	S/Cl	pH	Температура, °С	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Колкинская группа гидротерм (в боковой морене ледника Майли) (Пхалагова, 1976)											
1	1968	0.024		8-12	930	150	226	64.5	1456	104	878
2	-	0.017		8-12	1107	176	249	83.0	1952	97.5	1052
5	-	0.030		8-12	657	190	154	46.3	1136	101	678
6	-	0.030		8-12	674	176	124	41.7	1137	100	581
Режимный источник № 9 в Верхне-Кармадонской группе гидротерм в 1878-1955 гг. (Дзгоев, 1965)											
№ 9	1878	0.011		53-57	2246	353	367	15	3973	134	842
-	1889	0.010		-	2119	274	243	19	3540	104	847
-	11.07.31	0.011		-	1930	274	377	54.8	3506	113	793
-	30.05.36	0.010		-	2265	297	434	52.4	4032	123	986
-	18.09.46	0.011		-	1934	308	403	64	3542	119	952
-	26.11.51	0.015		-	2270	316	403	54	4051	179	900
-	29.12.54	0.013		-	2426	0	425	58.8	3995	151	960
-	21.04.55	0.012		-	2326	294	410	56	4053	148	992
-	9.08.55	0.011		-	2267	278	410	55	3969	127	976
Верхне-Кармадонская группа гидротерм (в начале подвижки ледника Колка 1969 г.) (Пхалагова, 1976).											
3	1969	0.020		20-42	1624	190	272	42.7	2748	163	638
3	-	0.022		-	1500	172	260	36.5	2485	163	561
Д	-	0.018		-	2020	243	342	30.5	3408	179	787
10	-	0.017		-	1821	205	290	36.2	3016	154	729
31	-	0.010		-	2202	114	360	48.4	6201	188	845
Высачивания в пределах площади Верхне-Кармадонских гидротерм после 20.09.2002 г.											
1	7.10.02	0.012	6.85	52.8	1711	264	309	43.8	2908	106	790
100	29.06.03	0.010	7.80	30	299	47.4	32.1	9.7	404	12.3	201
330	-	0.012	7.55	50	1580	239	180	42.6	2589	91.3	390
Талые воды в колкинском цирке в июне 2003 г.											
36	29.06.03	32.3	7.90	1004	10.8	4.2	212	44	6.4	620	107
268	-	150	7.60	1498	15.4	5.1	316	65	2.1	946	148
286	-	106	7.69	960	9.5	4.3	200	40	2.80	591	112

Примечание. Аналитик проб 2002-2003 гг. А.А. Смышляева (ЦХЛ ИВиС ДВО РАН)

ках: максимальная температура понизилась с 60°C до 42°C, уменьшилось содержание свободной углекислоты (Пхалагова, 1976). Наступление ледника 1969 г. оказало влияние и на Колкинские источники. Оно выразилось в понижении температуры воды, изменчивости содержания отдельных макрокомпонентов и общей минерализации.

В 2002 г. отбор пробы был выполнен спустя 17 суток после разрушения ледником площадки Верхне-Кармадонских термальных источников. К этому времени через отложения пробилась на дневную поверхность только три наиболее мощных выхода горячей воды с температурой 50-54°C и дебитом до 0.3 л/с, вторичное минералообразование вокруг этих источников

ПОДЛЕДНОЕ ГЕОТЕРМАЛЬНОЕ ИЗВЕРЖЕНИЕ

практически только начиналось. Анализ проб, отобранных в конце июня 2003 г., также не показал существенных различий с пробами первой половины XX столетия.

Следует отметить также изменения в химическом составе воды в реке Геналдон в 1969 г. Во время подвижки ледника осенью ее минерализация увеличилась вдвое (табл. 1), чего не фиксировалось ранее. К сожалению, гидрохимические данные о талом стоке с ледника Колка, которые удалось найти в первоисточниках, весьма скудны, несмотря на то, что сами верхнекармадонские источники изучались сравнительно неплохо длительное время (табл. 2).

Химический состав талых вод в верховьях колкинского цирка (во временных озерах (рис. 2) и водотоках осевой части вместилища ледника Колка) в июне 2003 г. гораздо более контрастно отличается от всех других природных вод этого района, чего не отмечалось ранее. По типу эти воды относятся к сульфатным кальциево-магниевым (при рН близкой с нейтральной - слабощелочной), повышенной минерализации, 1-1.5 г/л (табл. 2). Очевидно, что спустя почти год после схода ледника, продолжается интенсивный вынос минеральных вод повышенной концентрации и кардинально иного

состава. Отношение S/Cl в проточных поверхностных озерах на леднике достигает 100-150, что также указывает на влияние растворенных гидротермальных (глубинных) газов на формирование химического состава этих вод.

Тем же отличается и химический состав колкинского льда в верховьях цирка. При невысокой в целом минерализации, отношения между макрокомпонентами такие же, как и в более минерализованных талых водах с ледника. Предполагается, что это могло произойти за счет вторичного обогащения при интенсивной дегазации на дне цирка во время и после схода ледника.

Воды колкинского цирка после схода ледника похожи по макрокомпонентному составу на шахтные воды ряда рудных месторождений Северной Осетии, а из минеральных источников - близки водам Тамисского месторождения (табл. 3). Состав всех источников этого месторождения однотипного сульфатно-кальциевого состава. Объясняется этот состав аномально высоким содержанием сульфидов в известняках района. Выходы вод структурно приурочены к блоку, ограниченному субширотными тектоническими нарушениями с интенсивно развитой трещиноватостью. Областью питания, кро-



Рис. 2. Озеро на леднике Колка выше ригеля цирка с повышенной минерализацией воды в ноябре 2002 г. Фото О.Н. Рыжанова.

Таблица 3. Макрокомпонентный состав воды в бассейне ледника Колка после 20 сентября 2002 г. в сравнении с водами месторождения Тамиск (температура 12-15°C)

Источник	pH	Температура, °C	Ионы в мг/л						
			Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻
Тамисские источники в долине р.Ардон, 10/X-1960 г. (Пхалагова, 1976)									
Тамиск 4		15	47.0	0	504.2	111.6	91.1	1422.5	251.1
Тамиск 6		12	41.4	0.3	397.4	99.6	61.3	1182.6	210.7
Состав талых вод и льда на леднике Колка после катастрофы, отбор 27-30 июня 2003 г.									
36 (река)	7,90	1	10.8	4.2	212	44	6.4	620	107
268 (озеро)	7.60	1	15.4	5.1	316	65	2.1	946	148
286 (озеро)	7.69	1	9.5	4.3	200	40	2.80	591	112
8 (лед Колки)	7.31	1	0.4	0.28	15.2	3.9	2.1	21.9	37.4
10 (лед Колки)	7.10	1	0.3	0.25	10.4	1.9	0.70	16.5	20.7
Высачивания в пределах площади Верхне-Кармадонских гидротерм после 20.09.2002 г.									
1 7/X-2002	6.85	52.8	1711	264	309	43,8	2908	106	790
100(В-Карм)	7,80	20	299	47.4	32.1	9.7	404	12.3	201
330 (В-Карм)	7.55	55	1580	239	180	42.6	2589	91.3	390

Примечания: аналитик проб 2002-2003 гг. А.А. Смышляева (ЦХЛ ИВиС ДВО РАН)

ме атмосферных осадков являются ледники и снежники Бокового хребта, служащего и поставщиком сульфатов. В известняках встречается гипс в виде отдельных небольших конкреций – это месторождение около горы Тепле (известной своими интрузивами того же возраста, что и гора Джимарай-Хох). Химический состав похож на колкинские воды после события, хотя отношение S/Cl гораздо ниже.

Таким образом, можно предположить, что не последнее место в ряду факторов, повлиявших на катастрофический характер схода ледника Колка, имеют процессы в гидротермальной системе, которая приурочена к трещиноватой зоне глубинного разлома в ущелье Колка и в той или иной мере связана с Казбекским магматическим очагом и/или неинтрузиями плиоценового возраста этого района (Ольховский, Тибилов, 1998). Сходство и различие природных вод района Кармадонского ущелья, рассмотренных выше, характеризуется диаграммой химического состава (рис. 3).

Возможные причины обрушений ледника можно разделить на две группы: физические и геохимические.

В той или иной мере *физические причины* Колкинской катастрофы рассматриваются большинством исследователей (Котляков и др.,

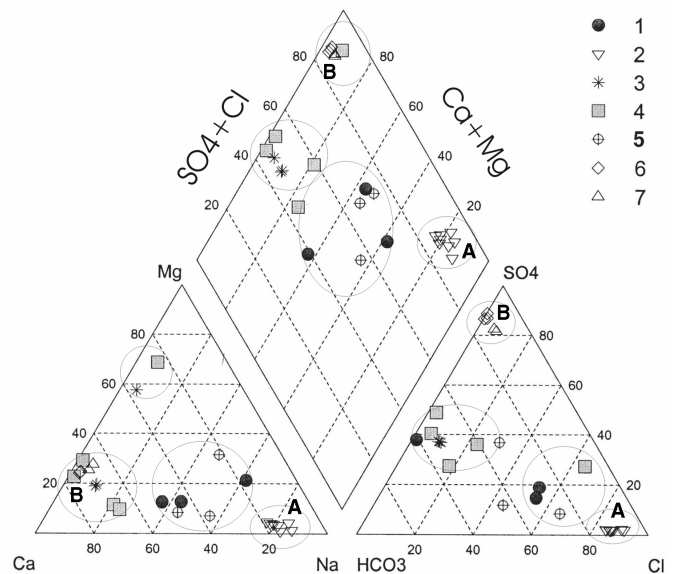


Рис.3. Диаграмма химического состава природных вод Кармадонского геотермального района. 1 - состав воды в истоках реки Геналдон (рр.Геналдон, Кауридон, Майли, Колка); 2 – Верхне-Кармадонские источники; 3 – атмосферные осадки; 4 – химический состав льда ледника Колка; 5 – состав льда ледника Майли; 6 – талые воды на ложе ледника Колка в 2003 г.; 7 – состав вод Тамисского месторождения. А и В - группы верхне-кармадонских углекислых хлоридных натриевых вод и сульфатных кальциево-магниевых вод в колкинском цирке, соответственно.



Рис. 4. Строение поверхности ледника Колка в верховьях долины после подвижки 1969-70 года. На боковой морене, прислоненной к левому борту, четко прослеживается уровень понижения поверхности ледника в результате оттока льда из верховьев цирка. Апрель 1970 г. Фото К.П. Рототаева.

2003; Поповнин и др., 2003 и др.). В современной гляциологии выделяется класс ледников (т.н. “пульсирующие”), периодические колебания которых зависят не от внешних воздействий (например, климатических изменений), а от динамических процессов, происходящих в самом леднике. При минимуме внешних воздействий (крупных обвалов висячих ледников, сильных землетрясений в пределах горста Центрального Кавказа, метеорологических аномалий, связанных с температурами воздуха и водой в леднике) обычно пульсационный цикл ледника в пределах периода 65-70 лет завершается большими подвижками, подобными 1969-70 гг. Особенность подобных «классических» пульсаций (сердечей) - неполное срабатывание ледоема в колкинском цирке (рис. 4). Это существенно, чтобы понять события 2002 г.

Геохимические причины связаны с активными поствулканическими процессами, происходящими в недрах Казбекско-Джидарайского вулканического массива, эманации которых поступают по разлому, вскрытому глубоким ущельем Колки. Эпизодическое (только в годы

подвижек ледника Колка) появление необычных для этих мест вод сульфатного кальциевого состава дают основание для разработки гипотезы об участии гидротермальных газов и термальных вод в катастрофическом процессе и их возможной роли в динамике некоторых ледников Казбекско-Джидарайского массива.

Гипотеза газового извержения

Напомним некоторые свойства серосодержащих веществ: сероводород (H_2S), бесцветный газ с характерным запахом, тяжелее воздуха, хорошо растворим в воде. В смеси с воздухом взрывоопасен, ядовит. Содержится в вулканическом газе, водах минеральных источников. Другое соединение - серная кислота, растворяется в воде с выделением большого количества теплоты, вследствие образования гидратов. Гипс — минерал, водный сульфат кальция ($CaSO_4 \cdot H_2O$), заметно растворим в воде, отлагаясь из гидротермальных растворов под ледником, может существенно снижать силы трения и способствовать скольжению на его ложе.

Таблица 4. Теплотворная способность и теоретические температуры горения газов, по (Справочник по химии, 1964)

Газ	Низшая теплотворность, ккал/м ³	Теоретическая температура сгорания, °С	Пределы взрываемости газа в смеси с воздухом, об. %	
			нижний	верхний
Водород	5660	1900	4.1	75
Сероводород	2570	2045	12.5	75
Окись углерода	3020	2100	4.3	45.5

В связи с физико-химическими свойствами газов, в состав которых входит H_2S и CO_2 (табл. 4), рассмотрим возможное их участие в развитии катастрофического процесса.

Представляются возможными два варианта газовых взрывов под ледником:

1. При достижении критической толщины ледника в тыловой части колкинского цирка (при давлении >4-5 атм.), на ложе подо льдом может происходить переход H_2S из газообразного в жидкое состояние при растворении в воде и накоплении его до объема, достаточного для взрыва при смешивании с атмосферным воздухом (Справочник по химии, 1964). В случае сильного резкого удара возможна детонация сероводорода. В этом случае скорость распространения пламени в воздухе составляет около 2000 м/с (!).

2. CO_2 также становится взрывоопасен, но при гораздо большем давлении, ~ 10 атм, т.е. при мощности ледника более 100 м. Во всем диапазоне давления углекислота хорошо растворима в воде и может накапливаться в огромных объемах. При резком сбросе давления газ освобождается из термальных вод в виде взрывов или газо-водяного (гейзерного) фонтанирования со скоростью выбросов до сотен метров в секунду.

Вопрос о механизме подледного газового извержения в условиях Колки остается открытым в связи с недостатком данных. Оба газа присутствовали в атмосфере колкинского цирка в достаточно большом количестве после выброса ледника. Отметим также, что выход вулканических газов под ледниками в кратерах активных вулканов - обычное явление, и они часто являются причиной фреатических (вторичных, т.е. не связанных с магматическим источником) взрывов в вулканических областях.

Возникает вопрос о реальности чисто газовых извержений?! О подобных извержениях под ледниками до последнего времени сведений не было. Но похожие события происходили из вулканических озер и кратеров. Ниже приведем

результаты исследования последствий газового извержения в Камеруне, приведшего к гибели множества людей. Курсивом нами выделены факты и явления, которые в какой-то мере могли иметь отношение и к событиям в Кармадонском ущелье.

Газовое извержение в Камеруне. Извержение произошло в густонаселенном гористом районе, на северо-западе страны в озере Ниос в темное время суток, по-видимому, в 9 ч вечера 21 августа 1986 г. В районе насчитывается большое количество вулканов, достигающих высоты 2000 м и более. Все они кроме вулкана Камеруна, относятся к потухшим.

Озеро, площадью 1.3 км², имеет *большую глубину* (до 220 м) и несколько повышенную, по сравнению с окружающей территорией, температуру. Площадь, затронутая катастрофой, составляет около 15 км². На этой территории до события проживало около 5 тысяч человек.

В составе вулканических газов, вырвавшихся из озера, *преобладал углекислый газ*, количество которого могло превышать 95% от объема. В значительно меньшем количестве *присутствовал сероводород*. Отмечается факт, что многие потерпевшие пострадали или от удушья или отравления в результате выброса CO_2 . Всего насчитано более 1700 погибших и свыше 500 раненых. В районе извержения найдено более 7000 трупов животных (Tazieff, 1989, и др.). Примечательно, что жители деревень, *расположенных на возвышенных участках*, почти не пострадали. Поступившие в больницу пациенты страдали в основном от заболевания легких, вызванного вдыханием удушающего углекислого газа или токсичных - сернистого газа и сероводорода. Несколько человек перенесли частичный паралич, вследствие поражения газом их нервной системы. Был сделан вывод, что все жертвы потеряли сознание через несколько секунд после воздействия газов. Для многих смерть наступила в течение 2 минут. Причиной смерти было *удушье*, обусловленное

поражением дыхательных путей, и *остановка сердца, вызванная облаком газа*, содержавшего большое количество углекислоты (Baxter, Kapila, 1989).

По словам очевидцев: они слышали *громкий взрыв*, после чего ощутили сильный *запах гари*. Из доклада паталогоанатомов следует, что большинство жертв пострадали во время сна, и значит, что поступление вулканических газов на поверхность хотя и происходило *в форме слабого взрыва*, но практически не потревожил их сон.

Трагическое событие в оз. Ниос – уникально по масштабам, хотя и не единственное. В том же Камеруне, за несколько лет до этого, из другого вулканического озера, Манун, также произошел выброс газов. Выделяются определенные условия, необходимые для столь мощного выброса вулканических газов, скопившихся в глубинах за длительное время:

а) Возможность накопления на глубине большого количества вулканических газов. В районах активного вулканизма они постепенно высвобождаются из магмы и в виде фумарольных, сольфатарных и моффетных струй большей частью спокойно рассеиваются в атмосфере. В длительно существующих крупных кратерных или кальдерных озерах могут возникать геохимические гидродинамические барьеры, способствующие растворению огромных объемов газов в воде (Faivre Pierret et al., 1992; Kusakobe et al., 1989).

б) Скорости поступления на земную поверхность скопившихся на глубине газов может способствовать какой-либо внешний толчок, например, землетрясение, или *внутренняя причина – возрастание давления газа до величин, превышающих сдерживающие условия гидрохимического барьера, которые создают препятствие для оттока газов*. Так как сейсмических толчков достоверно зафиксировано не было, то выброс из озера Ниос произошел, очевидно, в результате или внутренних причин, например, резкого притока более концентрированных вод ко дну озера в сезон дождей (Kanari et al., 1989), или накопления холодных дождевых вод на поверхности озера, вызвавших конвективный обмен в стационарной стратификации озерной воды (Giggenbach, 1990, Giggenbach et al., 1991), или подводного оползня. Возможным триггером для газового извержения из озера Манун, наряду с изложенным выше, мог послужить каменный обвал с кромки кра-

тера в воду, обломки которого быстро погрузились в глубоководную часть котловины.

На озере Ниос, являющемся кратерным, имел место выброс газов вулканического происхождения (Tazieff, 1989; Giggenbach, 1990; Le Guern, 1992). Извержение, по форме проявления, принадлежит к геотермальным или извержениям из кратерного озера. По своей природе – *это газовый тип извержения* (Allard et al., 1989, и др.). Объем изверженных газов из озера Ниос превысил 0.60 км^3 , при скорости их в газовой струе около 28 м/с (Pierret et al., 1992). Из более мелкого озера Манун объем изверженных газов составил по разным оценкам $0.1-0.2 \text{ км}^3$.

Подобные извержения могут происходить и из сухих кратеров. Так эманации CO_2 в феврале 1979 г., сопровождавшие фреатическое извержение на вулкане Диенг (Индонезия), погубили 142 человека. Объем залпового выброса магматического углекислого газа достигал 0.1 км^3 , что близко нижнему уровню оценок для камерунских озер (Allard et al., 1989).

У Э.П. Штебера (Штебер, 1903) приводится описание событий, сопровождавших обвал ледника: «Что происходило в ущелье Колка, никто не знает, но по Геналдону картина была ужасная: *страшный ветер предшествовал обвалу*, с ветром неслась пыль наподобие снега или, вернее, *мелкого града*. Неимоверный шум от движения льда заглушал крики людей и животных. Все это вместе взятое до того было ужасно, что одну женщину-осетинку нашли мертвой на тропинке, не тронутой обвалом. Несчастная, *полагают, умерла от страха*».

В связи с последней выдержкой из описания событий 1902 г. можно предположить, что ветер, насыщенный зернами льдистого фирна и льда, мог быть передовым фронтом фирново-ледяной лавины со стены Джимарай-Хох, достигшимся до широты с.Тменикау в виде облака. А гибель женщины могла быть спровоцирована большой концентрацией газов (в первую очередь CO_2) над движущимся льдом, по аналогии с газовым облаком в Камеруне.

О механизме ледниковых выбросов

Сегодня признается, что в процессе катастрофических обрушений ледника Колка в той или иной мере задействованы все или почти все отмечавшиеся выше причины. Так как предметом дискуссии в данном сообщении явля-

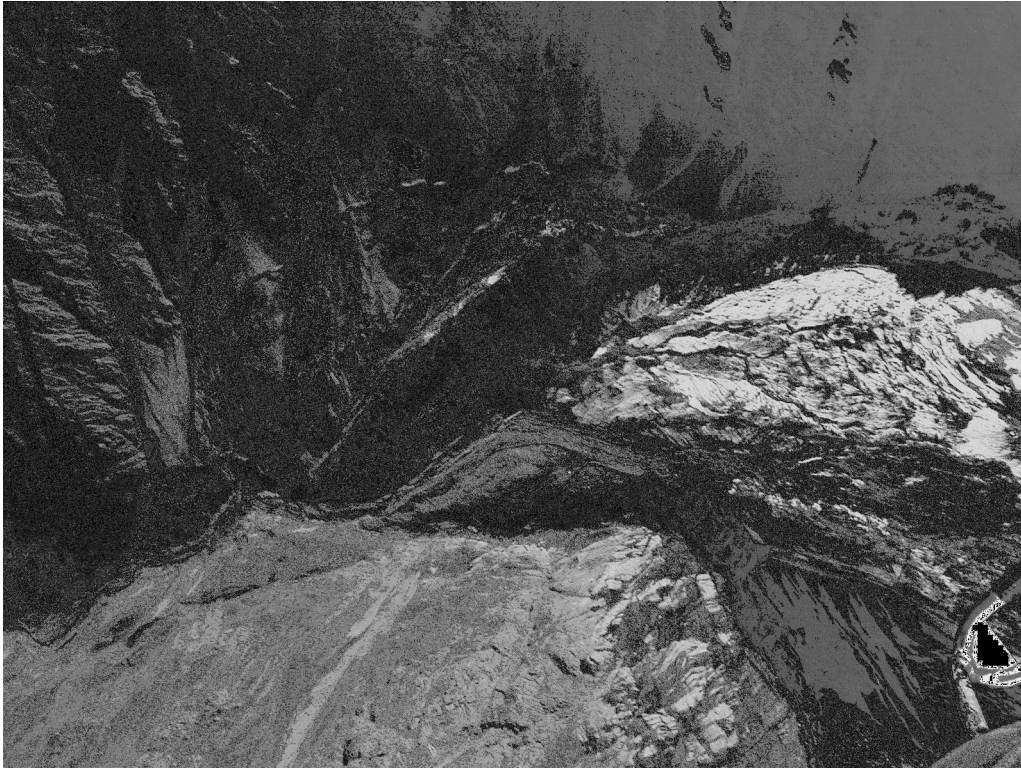


Рис. 5. Заплеск на правом борту ледника Майли, маркирующий прохождение фирново-ледяной лавины. Фото И.В. Галушкина.

ются геохимические причины, то мы не будем отвлекаться на другие геологические и вулканотектонические факторы, вносящие свой вклад в этот процесс, как это было показано нами ранее для случаев гляциальных оползней из вулканотектонических желобов Ключевского вулкана на Камчатке (Муравьев, Саламатин, 1993). Они в более полном виде должны быть представлены в следующей работе. Здесь же, в порядке обсуждения, предлагается следующая схема механизма развития подвижек-обрушений ледника Колка, приводящих к катастрофическим последствиям в бассейне реки Геналдон.

Создание условий для выбросов ледника начинается огромными обвалами висячих ледников (прежде всего, очевидно, с северо-восточной стены горы Джимарай-Хох), объем которых в начале движения может достигать трех и более миллионов кубических метров. При перепаде высоты на этом участке склона ~ 900-1000 м и угле падения ~ 40°, скорость фирново-ледяной лавины на выходе к пологой части ледника Колка на дне ущелья может превышать 75-80 м/с. При такой скорости быстро разуплотняющееся тело лавины насыщается воздухом и превращается в водно-газовую пульпу, несущую в себе массу фирново-ледяных и каменно-

обломочных включений. По механизму движения, такой гравитационный поток очень похож на пирокластические волны при катастрофических эксплозивных извержениях вулканов, только в последнем случае несущим агентом являются горячие вулканические газы в смеси с вулканическим пеплом.

Предполагается, что лавина прокатилась по леднику, вызвав многочисленные сотрясения в его теле, которые способствовали резкому уменьшению силы трения на большой площади ложа («отлипанию»). Это привело к переходу на блоково-глыбовый тип движения льда по всей толще ледника и вовлечению его в ускоряющееся движение. Далее лавина пересекла ледник Майли, захлестнула правый борт долины (рис. 5) и, повернув в прямое русло реки Геналдон, в течение 3.5-4 минут через 14 км достигла пос. Нижний Кармадон, где снесла опору ЛЭП (момент нарушения подачи электричества в местных населенных пунктах - один из основных временных реперов хронологии развития катастрофического события). Затем, уже в виде ледово-водно-грязевой массы через узкий каньон пересекла Скалистый хребет и вышла в долину реки Гизельдон. В конечном итоге, суммарный объем этой лавины, на каком-

то этапе трансформировавшейся в селевой поток, мог превышать 15 млн. м³.

К этому времени, ускорившийся собственнo ледник Колка, на скорости до 50 м/с (!?) подошел к воротам каньона, прорезающего Скалистый хребет, и перекрыл выход для грязевых потоков из Кармадонской котловины в долину реки Гизельдон. Очевидно, что в течение какого-то времени (по крайней мере, нескольких минут) каньон был открыт для стока, а только потом перекрыт льдом. В противном случае, ниже ледяной плотины не могло бы быть такого большого количества воды, вынесенной грязевыми потоками к уровню селения Гизель.

Во всем этом процессе особенно поражают два момента: объемы перемещаемого материала и скорости этого перемещения. И если с лавиной, имевшей условия для ускорения, которые физически вписываются в принимаемую модель, особых вопросов не возникает, то в случае с ледником оценка скорости перемещения весьма затруднительна, ввиду несколько иного характера передачи энергии в его теле и противодействия силам инерции. Конечные же скорости ледяного потока, по оценкам селевиков, перед достижением Скалистого хребта (около 30-50 м/с или до 110-180 км/час) предполагают стартовую скорость движения льда выше 100 м/с, при гораздо меньшем перепаде высот и уклонах в зоне транзита, по сравнению с фирново-ледяной лавиной.

В связи с упомянутыми выше неувязками, а также сопутствующими геохимическими аномалиями предположено, что на тыльном участке колкинского цирка, который сидит на трещиноватой зоне глубинного разлома широтного направления благодаря огромной глубине эрозионного вреза, по-видимому, вскрывается кровля гидротермальной системы, имеющей в качестве источника тепла одну из неинтрузий горы Джимарай-Хох или сам магматический очаг вулкана Казбек. За пределами площадей с выходами термальных источников на дневную поверхность, эта система может проявляться только при определенных изменениях гидродинамических и тепловых условий (по иному говоря, РТ-условий) в своих недрах. В нашем случае — это переменная нагрузка на дно цирка из-за пульсационной природы динамики ледника Колка, занимающего (и перекрывающего) эту площадь. Судя по разнообразию наблюдаемых признаков, в результате резкого нарушения гидростатического равновесия в системе

происходят извержения вулканических газов в ледник с участием, кстати, в этом процессе, и какого-то количества термальных минеральных вод.

Привлечение гипотезы участия геотермального извержения (за счет взрывообразного расширения газов во льду) в катастрофическом обрушении ледника Колка позволяет объяснить некоторые отклонения и явления в физике этого процесса:

1. Извержение может происходить только после достижения ледником толщины, достаточной для накопления газов во вмещающих породах на ложе, т.е. в результате существенных изменений РТ - условий на границе с гидротермальным резервуаром.

2. Поэтому, можно предположить, что к 2002 г. ледник Колка в верхней своей части достиг объема, достаточного для начала подготовки подвижки, что вполне реально, так как в верхней половине колкинского цирка понижение поверхности ледника за счет выноса льда, вовлеченного в подвижку 1969-1970 гг., было существенно меньше, чем на языке (см. рис. 5). Соответственно, прошедших 32 лет, оказывается достаточно для восстановления толщины льда, способствующей аккумуляции газов во вмещающих породах (и термальных водах) при благоприятных для этого гидродинамических условиях на ложе ледника.

3. Газ может взрывообразно расширяться или обильно дегазировать, только при быстром разрушении ледяной «крышки» и внезапном сбросе давления («эффект шампанского») на ложе, что наиболее вероятно при очень крупных обвалах висячих ледников на поверхность долинной части ледника Колка.

4. Расширение газов в теле ледника приводит к ускорению его движения, значительно превышающему гравитационный потенциал перемещаемого объема льда!

5. Отличие 1969 от 1902 и 2002 годов — не было огромных лавин с висячих ледников в колкинский цирк, «мгновенный» импульс от которых нарушает сплошность ледниковой «крышки», что выводит гидротермальную систему из газо-динамического квазистационарного состояния.

6. На поведении висячих ледников, которые «сидят» на том же разломе и перекрывают неинтрузии стены горы Джимарай-Хох, сказываются те же причины: изменения газо-термодинамических условий на ложе при росте ледника.

В пользу подобного порядка процессов свидетельствуют:

а) продолжительная интенсивная дегазация на ложе ледника и отдельных участках стены горы Джимарай-Хох после 20 сентября 2002 г.;

б) кардинальные изменения химического состава стока вод в реке Геналдон, связанные с подвижками (обрушениями) ледника Колка.

Заключение

Наличие вулканотектонических условий для поступления к дневной поверхности большого количества вулканических газов, в состав которых входят, в разных пропорциях, CO_2 и H_2S , схожесть явлений, сопутствующих взрывному характеру поступления газов в окружающую среду во время геотермальных извержений в кратерных озерах (Камерун; Индонезия) с подобными проявлениями в ущелье ледника Колка, качественные ощущения очевидцев и т.п.: — все это свидетельствует о возможности взрывной активности под ледником, что, в свою очередь, генетически связано с динамикой ледникового тела.

Воды, близкие по составу к верхнекармадонским гидротермам (А), и близкие по составу к талому стоку из колкинского цирка после 20 сентября 2002 г. (В) контрастно обособляются в две группы. Причем на диаграмме (рис. 4) видно, что химический состав майлийского льда вместе с водами истоков реки Геналдон тяготеет к верхнекармадонским гидротермам, в то время как к колкинской воде смещаются состав атмосферных осадков в этом районе и содержание химических примесей в колкинском льду, отобранном в июне 2003 г.

По-видимому, те же причины могли стимулировать частые обвалы Девдоракского ледника («сидящего» на том же широтном разломе), происходившие в первой половине XIX столетия на ветви завершения Малого ледникового периода. К концу XIX века его толщина настолько уменьшилась, что эффект ледниковой «крышки» не сработал, вследствие чего завершились и обрушения этого ледника.

Так как наблюдается связь динамики ледника Колка с изменениями химии и газового состава местных поверхностных вод, необходимо наладить регулярный отбор проб воды в режимных точках из р. Колка и р. Майли до их слияния, а также оборудовать газовой-гидрохимический пост на Верхне-Кармадонских гидротермах для гидрохимического слежения за се-

зонными вариациями химического состава, дебита, температуры воды.

Современные технические средства позволяют создать измерительный комплекс для этих видов работ и в недалеком будущем перейти на мониторинг в автоматическом режиме. Это даст возможность оперативно оценивать тенденции релаксации (или реакции) гидротермальных систем в этой части Казбекско-Джидмарайского вулканического массива. Очевидно, что подобные наблюдения будут полезны и для другой важной задачи - прогноза сильных землетрясений с эпицентрами, приуроченными к высокогорью Центрального Кавказа.

Автор крайне признателен В.Р. Болову (Центр «Антистихия» МЧС РФ) за возможность чрезвычайно познавательного посещения района исследований. В процессе обобщения данных получена неоценимая консультационная помощь по физико-химическим свойствам вулканических газов и геохимии гидротермальных растворов от Ю.А. Тарана (Institute of Geophysics, UNAM, Mexico) и Р.Л. Дунин-Барковского (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН).

Также считаю своим долгом выразить искреннюю благодарность за полное содействие в выполнении этой работы И.А. Галушкину, О.А. Гончаренко и А.И. Караеву (НИЛ «Геологоразведчик» ФГУГП, Владикавказ), М.Ю. Никитину (Геологический факультет МГУ, Москва), А.А. Овсянникову (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН), и полезное обсуждение событий 2002 г. в Кармадонском ущелье Д.Г. Цветкову, Г.Б. Осиповой, О.В. Рототаевой, Н.А. Володичевой, С.В. Черноморцу и другим гляциологам Института географии РАН и Московского государственного университета.

Работа частично финансировалась по проекту Минпромнауки РФ «Катастрофические процессы и их влияние на природную среду» (руководитель академик Н.П.Лаверов).

Список литературы

Абих Г.В. Несколько слов о состоянии в настоящее время Девдоракского ледника // Изв. Кавк. Отд. РГО. 1873/74. Т. 5.

Варданыц Л.А. Геотектоника и геосейсмика Дарьяла как основная причина катастрофических обвалов Девдоракского и Геналдонского ледников Казбекско-Джидмарайского массива // Изв. РГО. 1932а. Т. 64. № 1. С. 51-60.

- Варданянц Л.А.* Эпоха оледенений в горной Осетии, Центральный Кавказ // Изв. РГО. 1932б. Т. 64. №. 6. С. 499-537.
- Гогель Ж.* Геотермия. М.: Мир, 1978. 171 с.
- Дзгоев У.* Курорт Кармадон. Орджоникидзе, 1965. 119 с.
- Духовской А.И.* Наблюдения за Девдоракским ледником в 1909-1912 гг. // Изв. Кавк. Отд. РГО. 1915. Т. 23. № 1.
- Котляков В.М., Рототаева О.В., Десинов Л.В., Осокин Н.И.* Причины и следствия катастрофического выброса пульсирующего ледника Колка в Центральном Кавказе // Докл. РАН. 2003. Т. 389. № 5. С. 688 –692.
- Лейцингер Р.Р.* Обвал Генал-донского ледника // Ежегод. Кавк. горного общества. 1904. № 1. Пятигорск. С. 61-66.
- Муравьев Я.Д., Саламатин А.Н.* Прогнозная оценка динамики ледниковых масс в вулканотектонических желобах Ключевского вулкана // Вулканология и сейсмология. 1993. № 4. С. 43-53.
- Поповнин В.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С.* Гляциальная катастрофа 2002 года в Северной Осетии // Криосфера Земли. 2003. Т. 7. № 1. С. 3-17.
- Пхалагова Д.М.* Химическая география вод и гидрогеохимия Центрального Кавказа. Орджоникидзе: Ир, 1976. 359 с.
- Растворова В.А.* Формирование рельефа гор. М.: Наука, 1973. 144 с.
- Рототаев К.П., Ходаков В.Г., Кренке А.Н.* Исследование пульсирующего ледника Колка. М.: Наука, 1983. 169 с.
- Святловский А.Е.* Атлас вулканов СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 174 с.
- Справочник по химии. М.: Просвещение, 1964. 360 с.
- Таран Ю.А., Пилипенко В.П., Рожков А.М.* Геохимия гидротермальных растворов и газов Мутновской гидротермальной системы // Геотермические и геохимические исследования высокотемпературных гидротерм (на примере Мутновского геотермального месторождения) / Под ред. В.М. Сугрובה. М.: Наука, 1986. С.140-189.
- Хатисян Г.С.* Казбекские ледники в период с 1862 по 1887 год // Изв. РГО. 1899. Т. 24. № 5.
- Шершенко А.И.* Куртатинское ущелье и Цейский ледник. (Путешествие 1901 г.) // Изв. ИРГО. Т. 15, В. 3. 1904.
- Штебер Э.П.* Ледниковые обвалы в истоках Геналдона. Владикавказ. Терский сб. № 7. 1903. С. 72-81.
- Allard P., Dajlevic D., Delarue C.* Origin of carbon dioxide emanation from the 1979 Dieng eruption, Indonesia: Implications for the origin of the 1986 Nyos catastrophe // J.Volcan. and Geothermal Res. 1989. Т.39. № 2-3. P. 195-206.
- Baxter P.J., Kapila M.* Acute health impact of the gas release at Lake Nyos, Cameroon, 1986 // J.Volcan. and Geothermal Res. 1989. Т.39. № 2-3. P. 265-275.
- Faivre Pierret R.X., Berne P., Roussel C., Le Guern F.* The Lake Nyos disaster: model calculations for the flow of carbondioxide // J.Volcan. and Geothermal Res. 1992. Т. 51. № 1-2. P.161-170.
- Giggenbach W. F.* Water and gas chemistry of Lake Nyos and its bearing on the eruptive process // J.Volcan. and Geothermal Res. 1990. Т. 42. № 4. P. 337-362.
- Giggenbach W. F., Sano Y., Schmincke H. U.* CO₂-rich gases from Lakes Nyos and Monoun, Cameroon; Laacher See, Germany; Dieng, Indonesia, and Mt. Gambier, Australia-variations on a common theme // J.Volcan. and Geothermal Res. 1991. Т. 45. № 3-4. P. 311-323.
- Kanari S.* An inference on the process of gas outburst from Lake Nyos, Cameroon // J. Volcan. and Geothermal Res. 1989. Т. 39. № 2-3. P. 135-149.
- Kusakabe M., Ohsumi T., Aramaki S.* The Lake Nyos gas disaster: chemical and isotopic evidence in waters and dissolved gases from three Cameroonian crater lakes, Nyos, Monoun and Wum // J.Volcan. and Geothermal Res. 1989. Т. 39. P. 2-3. P. 167-185.
- Le Guern.F., Shanklin E., Tebor S.* Witness accounts of the catastrophic event of August 1986 at Lake Nyos (Cameroon) // J. Volcan. and Geothermal Res. 1992. Т. 51. № 1-2. P. 171-184.
- Tazieff H.* Mechanisms of the Nyos carbon dioxide disaster and of so-called phreatic steam eruptions // J. Volcan. and Geothermal Res. 1989. Т. 39. № 2-3. P. 109-116.

Subglacial Geothermal Eruption – the Possible Reason of Catastrophic Surge of Kolka Glacier in Kazbek Volcanic Massif (Caucasus)

Ya. D. Muravyev

*Institute of volcanology & seismology RAS,
Piyр Boulevard, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia*

Together with glacial, meteorological and seismic reasons of Kolka glacier descent from its receptacle, we assume that volcanic (or postvolcanic) phenomena take part in the catastrophic development of this process.

Presence of volcanic-tectonic conditions for accumulation and advance to the day surface of great quantity of volcanic gases which include CO₂, H₂S and SO₂ in various proportions; resemblance of phenomena which accompany explosive character of gas exit into environment in volcanic regions and similar displays in Kolka glacier canyon; as well as qualitative sensations of eye-witnesses - all these facts testify the possibility of explosive activity under the glacier, and it is genetically connected with glacier body dynamics.

Perhaps, another factor (which is not the last in the list of important ones) that had caused catastrophic character of Kolka glacier descent is the process in the geothermal system which is located in the fissure zone of deep fracture in Kolka canyon and this system is connected with Kazbek magmatic chamber and/or with neointrusions of the region.

Basing upon these premises we offer a hypothesis of recurring gas eruptions on the Kolka glacier bed. Taking it into consideration, we can explain some peculiarities of glacial catastrophe development both in this valley and in some other glaciers of Kazbek-Gimaraisky volcanic massif.