

2.4 ИЗВЕРЖЕНИЯ В КАЛЬДЕРЕ АКАДЕМИИ НАУК И КАРЫМСКОГО ВУЛКАНА В 1996—1997 гг. И ИХ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

С. А. Федотов, Я. Д. Муравьев, В. В. Иванов, В. Л. Леонов, М. А. Магуськин,
Е. Н. Гриб, А. Ю. Озеров, Г. А. Карпов, С. М. Фазлуллин, Р. А. Шувалов,
Е. Г. Лупикина, С. В. Ушаков

Институт вулканологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский

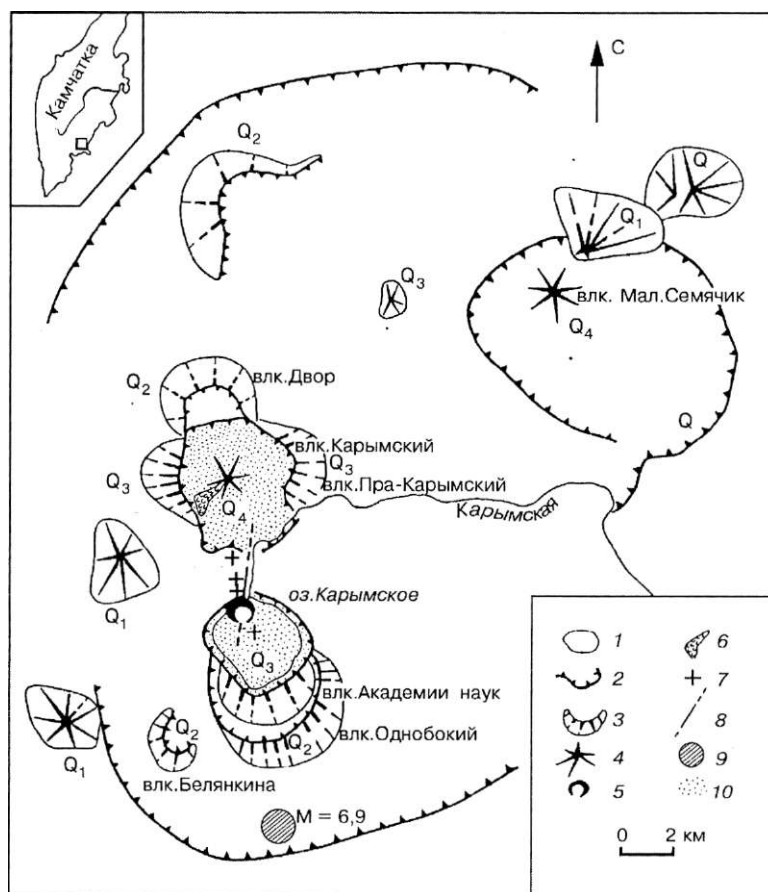
В начале 1996 г. в Карымском вулканическом центре на Камчатке (рис. 1) произошло редкое, сложное и чрезвычайно интересное природное явление — после необычайно сильного роя землетрясений одновременно начались извержение на вершине молодого стратовулкана — Карымского, и подводное фреатомагматическое извержение в 6 км к югу от него в древней кальдере Академии наук [Федотов, 1996, 1997], вулканическая деятельность в которой, как до этого считалось, завершилась еще в верхнем плейстоцене 28 тыс. лет тому назад.

Извержение вулкана Карымского ожидалось с марта 1995 г., когда станции сейсмической сети Геофизической службы РАН начали фиксировать характерные для подготов-

ки его деятельности вулканотектонические землетрясения. Период, непосредственно предшествовавший извержению, — 31 декабря — 1 января — отличался мощной вулканотектонической активностью, за которой последовали прорывы глубинного вещества к дневной поверхности через подводный канал вулкана Карымского в ночь с 1 на 2 января, и по новой питающей трещине извержения и тектоническому разлому в северной части кальдеры Академии наук днем 2 января 1996 г. Активизация вулканической деятельности в Карымском центре и начало извержения вулкана Карымского были успешно предсказаны. Изучение извержений и их последствий проводится экспедицией Института вулканологии ДВО

Рис. 1. Схема расположения кальдер, действующих вулканов Карымского вулканического центра и явлений, связанных с извержениями 1996—1997 гг.:

1 — оз. Карымское в кальдере Академии наук; 2 — уступы и границы кальдер; 3,4 — вулканы: потухшие (3), действующие (4); 5 — подводный кратер и новый полуостров, возникшие в кальдере Академии наук 2—3 янв. 1996 г.; 6 — лавовый поток вулкана Карымского в 1996—1997 гг.; 7 — центры дилатации земной поверхности в области радиусом 15 км, которая наблюдалась в 1975—1977, 1977—1981, 1981—1983 и 1983—1988 гг.; 8 — разлом — питающая трещина извержения в кальдере Академии наук 2—3 янв. 1996 г.; 9 — эпицентр главного землетрясения 1 янв. 1996 г., $M = 7,0$, которое предшествовало извержениям; 10 — кальдеры Академии наук и Карымского вулкана. Возрасты вулканов и кальдер: Q_1 — Q_4 . Их положение и возраст взяты из работ [Иванов, 1970; Вулканический центр., 1980].



ВЛИЯНИЕ ВУЛКАНИЗМА НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ

РАН и Камчатской опытно-методической сейсмологической партией (КОМСП) Геофизической службы РАН с первого дня по настоящее время [Федотов, 1996, 1997; Муравьев и др., 1997; Гордеев и др., 1998].

Краткая характеристика сейсмичности, предварающей и сопровождающей начало извержений

Основные сведения о развитии сейсмо-вулканических явлений в постоянно действующей Карымской сейсмогенной зоне [Леонов, Иванов, 1994] перед и во время извержений 1996—1997 гг. приведены в табл. 1.

В период с 1985 по 1995 гг. землетрясения в Карымском центре концентрировались исключительно в северной части его сейсмогенной зоны, в районе вулканов Карымский и Академия наук. В остальной части зоны в течение около 10 лет до извержений землетрясений практически не было. В марте 1995 г. в районе вулканов Карымского и Академии наук

начался рой слабых ($K_{\text{max}} = 9$; энергетический класс землетрясений K связан с магнитудой соотношением $K = 4,6 + 1,5 m$) вулканически землетрясений, который не прекращался в 1995 год. На этом основании в апреле 1995 общий Совет по прогнозу землетрясений вулканических извержений Института вулканологии ДВО РАН и КОМСП ГС РАН (заключение А. В. Сторчеуса) дал среднесрочный прогноз извержения Карымского вулкана, который в последующих сообщениях подтверждался вплоть до начала извержения 2 января 1996 г.

31 декабря 1995 г. в 18 ч 26 мин (здесь и далее время камчатское, разница 12 ч с Гринвичем) в Тихом океане под дном Кроноцкого залива в 60 км к юго-востоку от Карымского вулкана произошло сильное тектоническое землетрясение с $M = 5,6$. Его очаг лежал на глубине 60 км в верхней части сейсмофокального слоя (зона Вадати—Заварицкого—Беньоффа). Расстояние от эпицентра до г. Петропавловска-Камчатского было около 140 км, и

Таблица 1

Последовательность развития событий, предшествовавших и сопровождавших начало извержений вулканов Карымского центра в 1985—1996 гг.

Дата, время *		Содержание этапа	Примечание
начало	окончание		
1985 г.	1995 г.	Концентрация землетрясений в северной части Карымской сейсмоактивной области (в районе вулканов Карымского и Академии наук)	
Март 1995 г.	31 дек. 1995 г.	Рой слабых ($K_s \leq 9$) вулканических землетрясений в районе кальдер Карымской и Академии наук	Апр. 1995 г. — дан первый среднесрочный прогноз
1 янв. 1996 г. 16:00	1 янв. 1996 г. 18:00	Быстрый монотонный рост частоты и энергии слабых землетрясений в районе вулкана Карымского	
1 янв. 1996 г. 18:00	1 янв. 1996 г. 21:57	Сильная форшоковая активность в очаге землетрясения с $M = 7$ к югу от кальдеры Академии наук. Миграция активности вдоль будущего очага в направлении СВ—ЮЗ	Сообщение в штаб ГО и ЧС Камчатской области о возможном извержении вулкана Карымского (краткосрочный прогноз)
1 янв. 1996 г. 21:57		Необычайно сильное для континентальной Камчатки землетрясение с $M = 7$ примерно в 15 км к югу от вулкана Карымского	Ощущалось в г. Петропавловске-Камчатском силой 3—4 балла
2 янв. 1996 г. ~00:00		Начало извержения вулкана Карымского	
2 янв. 1996 г. ~12:00— 13:00	3 янв. 1996 г. ~5:00—8:00	Сильное подводное фреатомагматическое извержение в северной части кальдеры Академии наук; образование кратера Токарева диаметром 600 м и глубиной около 60 м в Карымском озере	Извержение продолжалось менее 21 ч
1 янв. 1996 г. 22:00		Афтершоковый рой вдоль вытянутой в СВ направлении области размерами 15×25 км на глубинах преимущественно до 20 км	Затухающий рой землетрясений
2 янв. 1996 г.		Продолжение эксплозивно-эффузивного извержения вулкана Карымского	Извержение продолжается и в настоящее время (октябрь 1998 г.)

*Время камчатское, разница с Гринвичем 12 ч.

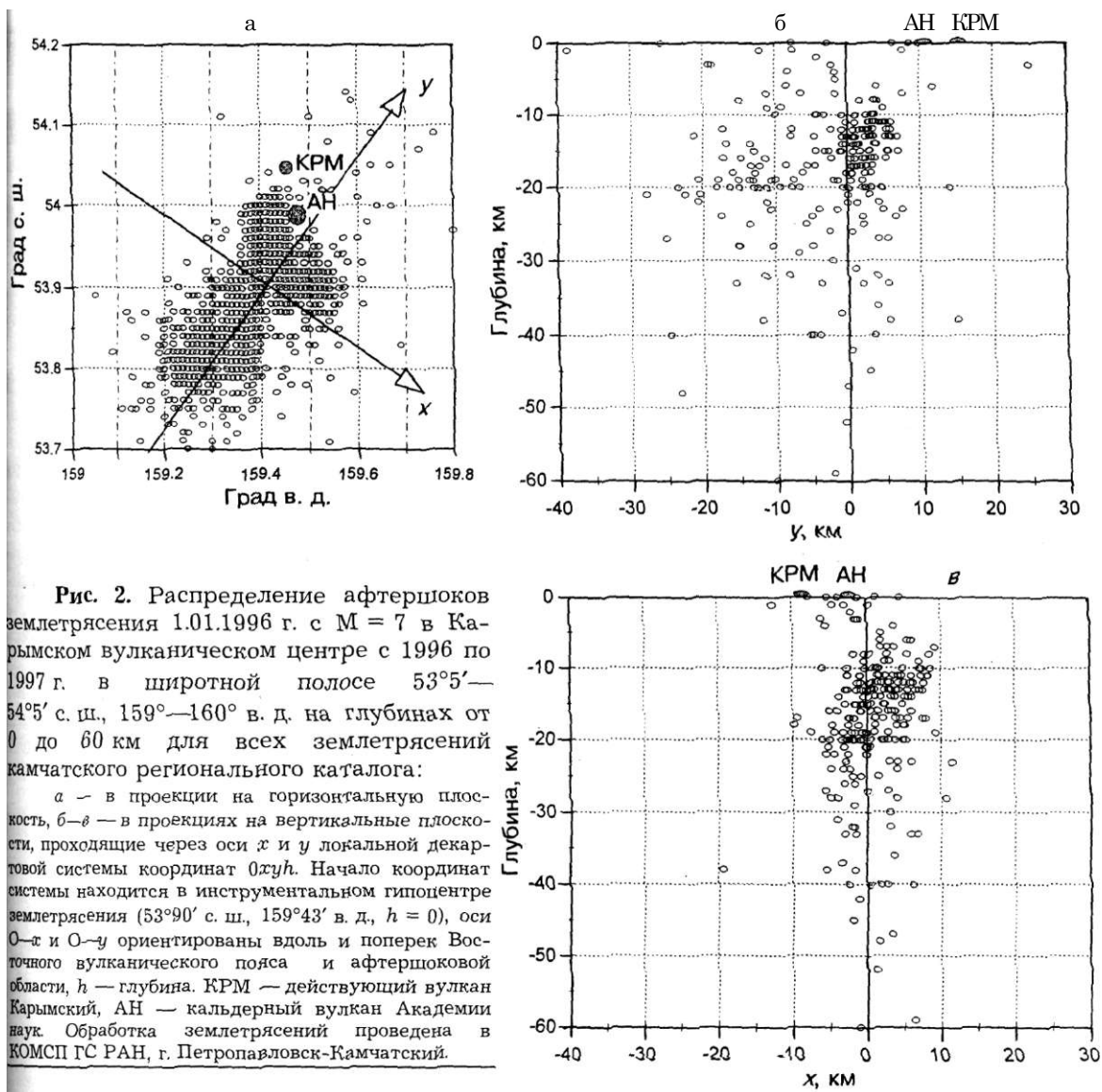


Рис. 2. Распределение афтершоков землетрясения 1.01.1996 г. с $M = 7$ в Карымском вулканическом центре с 1996 по 1997 г. в широтной полосе $53^{\circ}5' - 54^{\circ}5'$ с. ш., $159^{\circ} - 160^{\circ}$ в. д. на глубинах от 0 до 60 км для всех землетрясений камчатского регионального каталога:

а — в проекции на горизонтальную плоскость, б–в — в проекциях на вертикальные плоскости, проходящие через оси x и y локальной декартовой системы координат $Oxuy$. Начало координат системы находится в инструментальном гипоцентре землетрясения ($53^{\circ}90'$ с. ш., $159^{\circ}43'$ в. д., $h = 0$), оси $O-x$ и $O-y$ ориентированы вдоль и поперек Восточного вулканического пояса и афтершоковой области, h — глубина. КРМ — действующий вулкан Карымский, АН — кальдерный вулкан Академии наук. Обработка землетрясений проведена в КОМСП ГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский.

землетрясение опускалось в нем силой до 4 баллов. Вечером 1 января 1996 г. внезапно и очень сильно активизировалась южная часть Карымской сейсмогенной зоны, число землетрясений и их энергия начали очень быстро нарастать. Такой высокой сейсмической активности в районе Карымского вулкана ранее не наблюдалось. Поэтому в штаб ГО и администрацию Камчатской области были даны сообщения о возможной его активизации [Федотов, 1997]. Землетрясения постепенно мигрировали в ЮЗ направлении, захватывая очаговую область будущего землетрясения 1 января (рис. 2). Наконец, в 21 ч 57 мин активизация завершилась мощным коровым землетрясением ($M = 7,0$), примерно в 15 км к югу от вулкана [Гордеев и др., 1998]. После этого события начал развиваться мощный, длительный, затухающий афтершоковый процесс, а 2 часа позд-

нее, в ночь с 1 на 2 января, началось эксплозивное извержение Карымского вулкана. Несколько часов спустя, в полдень 2 января началось необычное для этого района базальтовое фреатомагматическое эксплозивное извержение в кальдере Академии наук, заполненной Карымским озером.

В первых числах января, непосредственно перед основным землетрясением 1 января 1996 г., и в течение недели после него происходил столь мощный рой землетрясений, что данные сейсмостанции "Карымская", расположенной на склоне Карымского вулкана, были малоинформативны; сейсмические явления (связанные с вулканической деятельностью) и начало извержений маскировались сеймотектонической активностью.

Энергия основного толчка 1 января 1996 г. на три порядка превышала энергию самого

ВЛИЯНИЕ ВУЛКАНИЗМА НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ

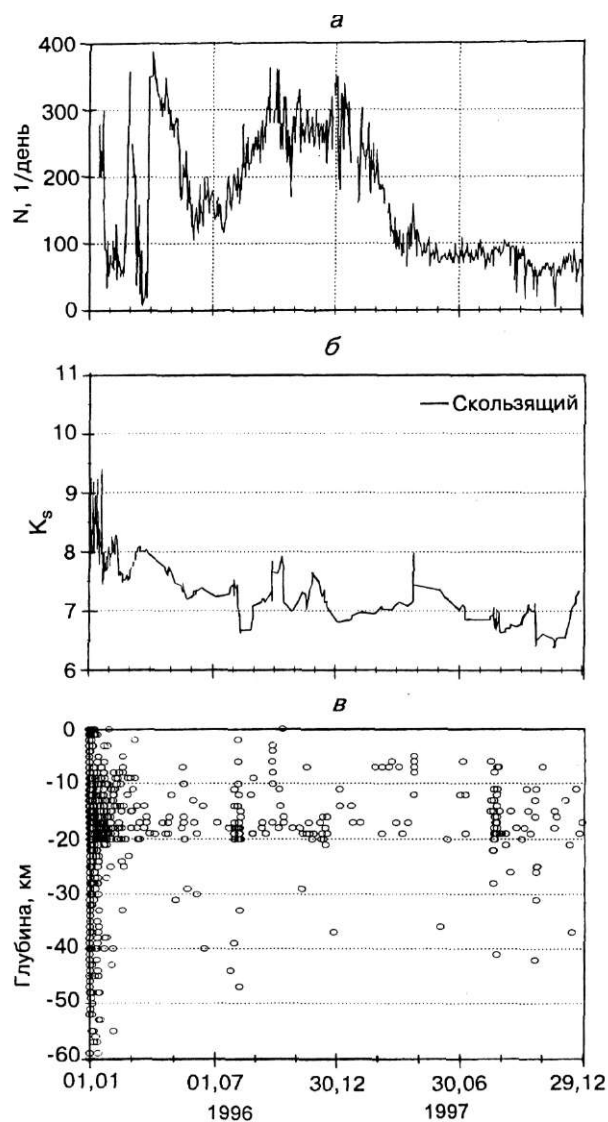


Рис. 3. Характеристики вулканической и сейсмической активности в Карымском вулканическом центре в 1996—1997 гг.:

a — ежесуточное количество (N) взрывных землетрясений на Карымском вулкане по данным сейсмостанции «Карымская» ($D = 1,5$ км), *б, в* — энергетический класс (K_s) и глубина вулканотектонических землетрясений для всех землетрясений камчатского регионального каталога в широтной полосе $53^{\circ}5' - 54^{\circ}5'$ с. ш., $159^{\circ} - 160^{\circ}$ в. д. на глубинах до 60 км. Значения энергетического класса сглажены скользящим средним.

и 16 ч 20 мин. На Карымском вулкане в 80 м ниже по склону от юго-западной кромки старого вершинного кратера образовалось эжпозивное жерло диаметром до 20—25 м. Здесь практически непрерывно происходила пепловая эмиссия в юго-восточном направлении. Полоса пеплопада шириной 2—3 км прослеживалась на заснеженной поверхности вулканического плато восточнее Карымского озера, а непрерывный шлейф эруптивного облака уходил в этом же направлении к океану на высоте около 2—2,5 км. Одновременно, в 6 км южнее, из Карымского озера поднималась мощная парогазовая колонна с диаметром основания до 300—400 м и до 2,5 км и более в высоту (рис. 4).

Фреатомагматическое извержение в Карымском озере

Оно длилось 18—20 ч и отличалось высокой интенсивностью [Федотов, 1997]. Последующие двое суток уровень сейсмической активности оставался чрезвычайно высоким [Fedotov et al., 1996; Karpov et al., 1996; Гордеев и др., 1998].

В северной части Карымского озера в среднем раз в 8—10 минут происходили мощные нагруженные пирокластичекие взрывы, которые сопровождалась базисными волнами [Влодавец, 1984], а также цунами до 15 м и более в высоту. В основании эруптивной колонны бурлила со всплесками на десятки метров горячая вода. Из озера через каньонообразный исток реки цунами нагнетали паводковые волны в южную часть Карымской кальдеры, где наводнение перекрывало пойму реки и плоское днище поля Карымских гидротерм слоев воды до 2,2—2,5 м. На замыкающем створе реки, в сужении долины около обсерватории Института вулканологии, уровень поднимался на 2,5 м при ширине потока воды на этом участке до 100 м, образовав временное подпорное озеро.

Сильные местные землетрясения 1 и 2 января, вероятно, были связаны с активизацией долгоживущего глубинного разлома субмеридионального простирания. Судя по поверх-

сильного его форшока или афтершока. В целом в 1996—1997 гг. энергетический класс (K_s) афтершоков в Карымском вулканическом центре непрерывно и практически монотонно экспоненциально снижался после главного толчка (рис. 3, б). Подавляющее количество афтершоков произошло на глубинах до 20 км (см. рис. 3, в).

Вероятный механизм процессов рассмотрен в работе С. А. Федотова [1997].

Динамика и геологический эффект извержений вулканов Карымского центра 1996—1997 гг.

К 10 часам утра 2 января уже было известно, что 60—70 км шлейф пеплопада от Карымского вулкана прошел на юго-юго-восток в сторону Шипунского мыса. Извержения наблюдались во второй половине дня с борта вертолета в течение 1 часа между 15 ч 20 мин 130

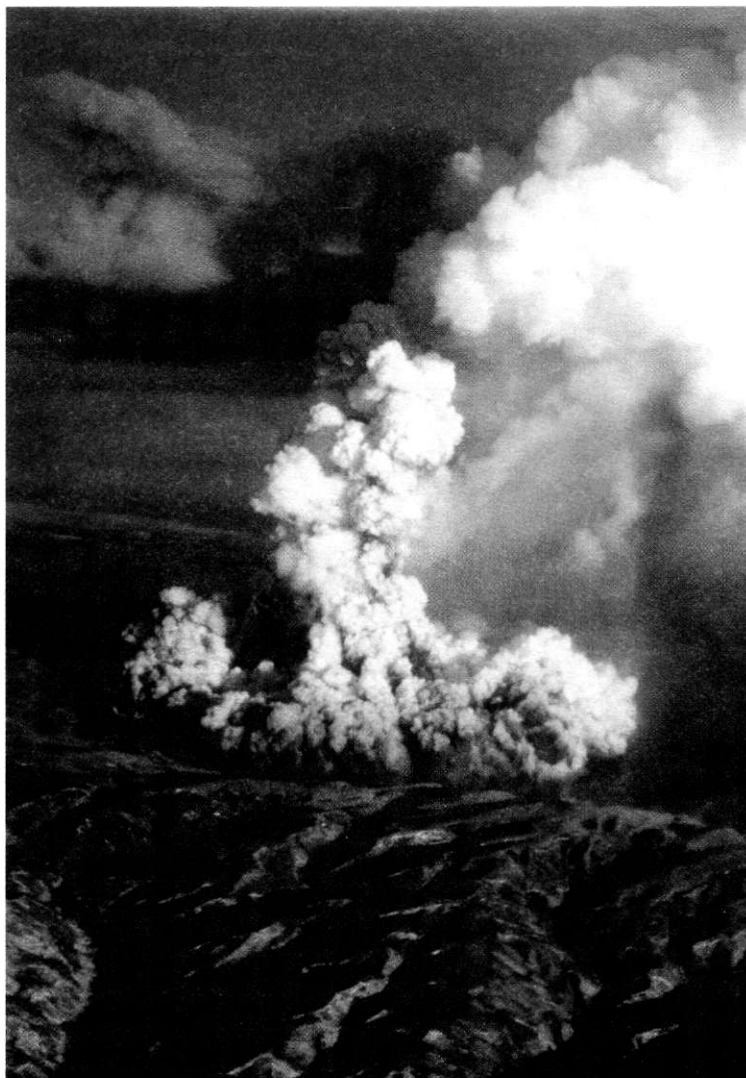


Рис. 4. Один из мощных фреатомагматических взрывов извержения в Карымском озере (кальдера Академии наук) во второй половине дня 2 янв. 1996 г.

Высота его поднимающейся колоннообразной тучи -1,5 км; от ее основания расходитя характерная базисная волна более 1,5 км в поперечнике (фото Я. Д. Муравьева).

ностным разрывным нарушениям и дислокациям в сезонном снежном покрове, подчеркнутым многочисленными снежными лавинами и грунтовыми оползнями, сила землетрясений на поверхности достигала 8—9 баллов. Последующие двое суток уровень сейсмической активности также оставался чрезвычайно высоким [Fedotov et al., 1996; Kargin et al., 1996; Гордеев и др., 1998].

Подводное извержение длилось 18—20 часов и отличалось высокой интенсивностью. В результате, в прибрежной зоне северной части Карымского озера образовалось кольцо пирокластических отложений в виде полуострова (рис. 5), облегающего с севера главный эруптивный центр — кратер Токарева [Федотов, 1997]. Диаметр его около 650 м. С юга кромка

кратера уходит под воду всего на 3—5 м. Внешний южный склон постройки круто погружается в озеро на глубину 50—52 м, в то время как на севере отложения базисных волн и цунами сформировали пологий пляж, упирающийся в береговую уступ кальдеры. Эта часть полуострова лежит на 17—18 м над уровнем озера.

Многочисленные цунами сильно размывали рыхлые берега озера, особенно северный, где в 850 м от главного центра эрупции его поверхность понизилась на 2,7 м. Продукты извержения к утру 3 января перекрыли исток р. Карымской из озера, сформировав плотину, через которую в конце января наблюдалась незначительная фильтрация воды с расходом около 20—30 л/с. Согласно гидрологическим



Рис. 5. Кратер Токарева в Карымском озере и полуостров отложений фреатомагматического извержения 2—3 января 1996 г. спустя два с половиной года, 28 мая 1998 г.

Поле озерного льда подчеркивает выходы горячих вод новых гидротерм вокруг эруптивного центра (фото А. В. Сокоренко).

измерениям, в течение последующих 4,5 месяцев происходило постепенное повышение относительного уровня воды в озере на 1,88 м. Спустя 4,5 месяца после извержения, 15 мая, начался переток воды через плотину с последующим ее размывом и спуском в течение трех-пяти суток около 35 млн м³ кислой (рН = 3,2) воды по долине реки в океан.

Половодье перекрыло термальные площадки Карымских гидротерм. Причем уровень воды этого эфемерного озера был на 0,9—1,0 м выше, чем 2—3 января, и на замыкающем гидрометрическом створе у обсерватории составил около 3,5 м. Это половодье фиксируется в границах изогипсы 601 м местного рельефа. Паводком на термальное поле был вынесен материал, слагающий дамбу в истоке. Так как на выходе реки из каньона скорость потока резко уменьшалась, то грубые пески его твердой составляющей перекрыли верхнюю половину гидротерм, нарушив или полностью заглушив деятельность многих теплых источников. На берегу океана уровень воды в устье реки поднялся на 1,5—1,7 м выше осенней межени.

Дальнейшие полевые исследования показали, что фреатомагматическое извержение в озере продолжалось всего 18—20 ч и вынос вещества эксплозиями составил в среднем >830 т/сут [Федотов, 1997]. Суммарный объем изверженного пирокластического материала оценивается величиной более 0,04 км³, общий вес превысил 70 млн т [Муравьев и др., 1997].

Специальные исследования, проведенные в 1996 г., а также ревизия предыдущих тефрохронологических данных показали, что в течение голоцена в Карымском озере с перерывами в несколько тысяч лет уже происходили подобные извержения [Белоусов и др, 1997; Брайцева, 1997].

Вершинное извержение вулкана Карымского

В отличие от впечатляющих событий в кальдере Академии наук извержение вулкана Карымского, начавшееся несколько ранее, в ночь с 1 на 2 января 1996 г., является типичным для его деятельности в историческое время. Эксплозивно-эффузивное извержение вершинного кратера вулкана повторяет основные черты, характерные для его деятельности в двадцатом столетии (вулканостромболианский тип извержения, изливание лавовых потоков, умеренные и слабые пеплопады, длительная эруптивная активность) (рис. 6, а, б). За прошедшие два с лишним года в динамике извержения выделяются следующие этапы:

1. Эксплозивный этап: 2—11 января 1996 г. Извержение Карымского вулкана, ускоренное активными сейсмическими событиями, началось около полуночи с 1 на 2 января 1996 г. [Федотов, 1997]. Кратер вулкана под вечер 3 января уже сформировался в виде амфиатра диаметром около 90 м, открытого на юго-запад. Из него происходили субвертикальные эксплозии вулканического типа до 1,0—1,2 км в высь.

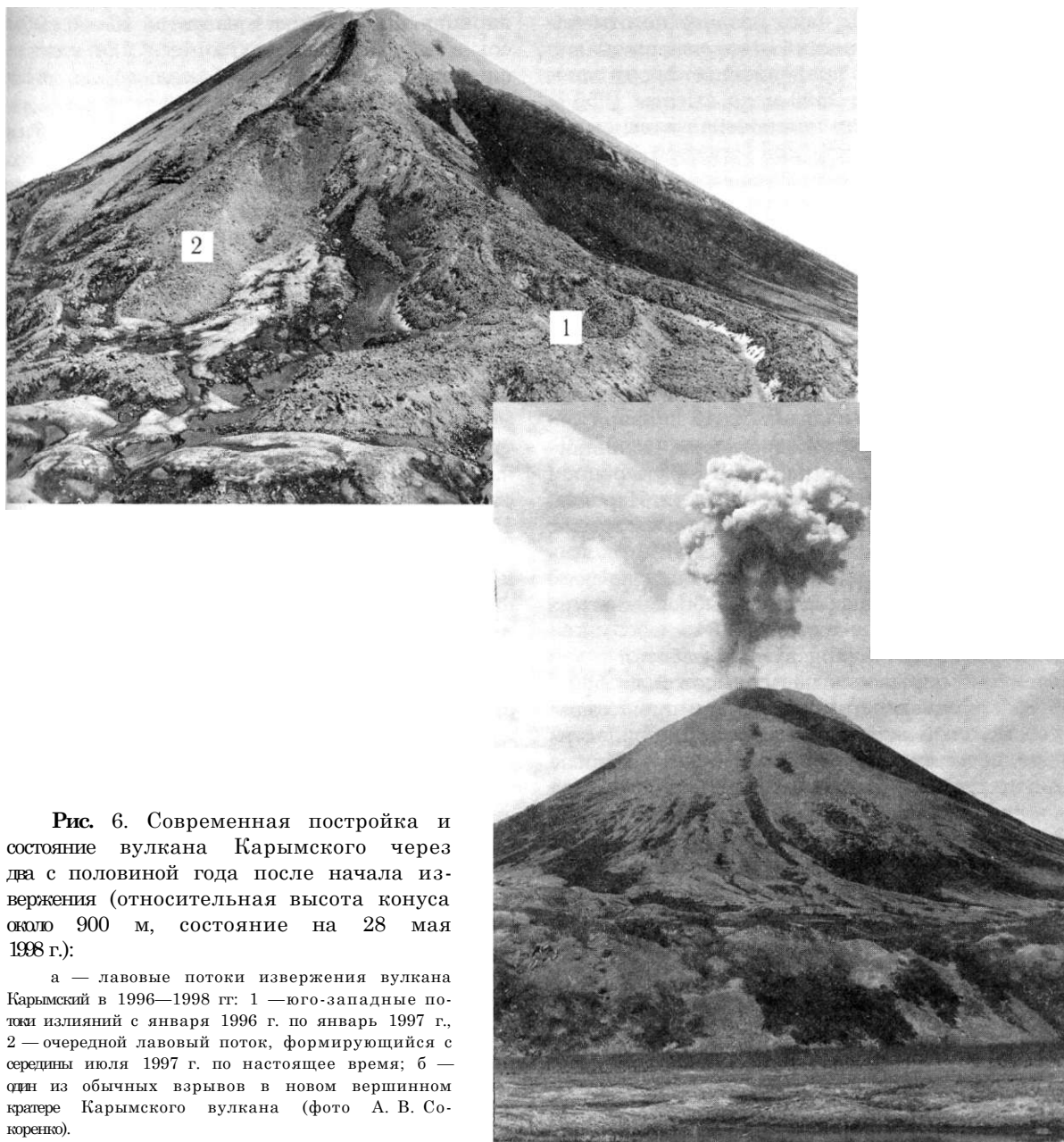


Рис. 6. Современная постройка и состояние вулкана Карымского через два с половиной года после начала извержения (относительная высота конуса около 900 м, состояние на 28 мая 1998 г.):

а — лавовые потоки извержения вулкана Карымский в 1996—1998 гг: 1 — юго-западные потоки излияний с января 1996 г. по январь 1997 г., 2 — очередной лавовый поток, формирующийся с середины июля 1997 г. по настоящее время; б — один из обычных взрывов в новом вершинном кратере Карымского вулкана (фото А. В. Сокоренко).

ту. Вечером в основании эруптивной колонны часто отмечались электрические разряды (молнии). Эти и следующие сутки происходило спазматическое истечение пеплогазовых выбросов из кратера: 3—5 взрывов высотой от 0,3 до 12 км через 3—5 мин. Затем, постепенно ослабевая, в течение 5—10 мин длилась парогазовая эмиссия и подобный цикл повторялся.

С полудня 4 января из кратера по юго-западному склону начали скатываться небольшие пирокластические потоки, сопровождавшиеся каменными лавинами взрывов. Отдельные из них достигали борта кальдеры. Изредка происходили выбросы раскаленного

материала за пределы кратера и до 100—150 м в высоту. Во второй половине дня сформировался пепловый шлейф на юго-запад и запад с видимым пеплопадом на расстояние 40—50 км от вулкана.

Характерным было усиление эксплозивной деятельности во второй половине суток, в период с 13 до 22 часов. В это время происходили частые пеплогазовые выбросы до 1000—1300 м с раскаленными лавинами. В другую половину суток — редкие взрывы и продувки.

2. Эксплозивно-эффузивный этап: 12—14 января. На юго-западном склоне появился первый глыбовый лавовый поток. Движение

его было активным, при наблюдениях 13 января с расстояния 1 км был слышен устойчивый шум движения лавы, чего позднее не отмечалось для других излияний этого извержения.

За трое суток продвижения фронт лавы спустился с высоты 1400 м до высоты 1050 м. Объем первой порции излившейся лавы составил 300—350 тыс. м³, при средней ширине 50 м и толщине около 10 м. Средний расход вещества (Q_l) за трое суток излияния составил 1,35 м³/с.

К этому времени справа от лавового потока уже был сформирован небольшой конус выноса пирокластических потоков. Кратер вулкана к середине января достигал 120 м в диаметре.

3. Эксплозивный этап с эпизодами слабых эффузивных излияний: 15 января — 5 апреля 1996 г. Кратковременное излияние лавы практически не отразилось на умеренном характере эксплозивной деятельности. Изредка, раз в 5—7 суток, наблюдались мощные взрывы, сопровождавшиеся пирокластическими волнами, и обрушением раскаленных лавин по всем склонам одновременно. Размер выброшенных из кратера блоков лавы достигал 3—4 м.

С 17 по 22 января вулкан работал в режиме: 5—6 взрывов в час с высотой до 500—900 м; в среднем один раз в сутки происходил более мощный взрыв с выбросом пирокластиков по всем склонам (раскаленные каменные лавины спускались до 1000—1100 м). В этот период вершинный кратер по верхней кромке достигал в диаметре 130—150 м.

После 22 января деятельность вулкана приобрела неритмичный характер: умеренные по мощности взрывы сменились перерывами продолжительностью от 30 минут до двух часов.

Во время ослабления пурги 5 февраля с Карымского озера было замечено появление свежих порций лавы на юго-западном склоне вулкана. Этот лавовый поток спустился ниже середины предыдущего, наращивая толщину первого потока, и по объему излившейся лавы не превышал 250 тыс. м³. В марте этот поток уже не двигался, на нем были видны оранжевые, желтые и сине-зеленые возгоны на площадках действующих fumarol. Средний расход поступления лавы 5—7 февраля составил 0,96 м³/с. Общий объем двух лавовых потоков извержения не превышал 0,6 млн м³.

Пепловые выбросы в этот период (5—11 февраля) становятся реже, не более 2—3 в день. 12—15 февраля вулкан работал единичными взрывами с 1—2-дневными перерывами. Следующую неделю в среднем происходил один парово-пепловый выброс в сутки на высоту до 300—500 м, после которого в течение 7—10 мин шла парогазовая продувка. Начиная с 22 февраля активность вулкана постепенно стала усиливаться — до 1—2 взрывов в час.

После 29 февраля эксплозивная активность вулкана вышла на стабильный незначительно варьирующий режим с частотой 10—20 выбросов в час, который сохранялся для всего последующего периода наблюдений до начала января 1997 г.

4. Эффузивно-эксплозивный этап: 6 апреля 1996 г. — январь 1997 г. 6 апреля из кратера началось длительное излияние лавы, продолжавшееся до конца января 1997 г. Это был самый большой лавовый покров, спустившийся к концу октября несколькими языками до отметок 870—880 м (см. рис. 6, а). Средняя мощность порций в нижней половине около 20—25 м. Движение языков было очень медленным, от 2 до 25 м в сутки. На этом этапе 25 мая и 13 августа была выполнена аэрофото съемка района извержения.

Согласно аэрогеодезическим измерениям, на 25 мая 1996 г. лавовый поток спустился до отметки 893 м. Его протяженность составила 1500 м. Наибольшая ширина, на уровне горизонтали — 1100—300 м. Мощность потока менялась от 10 м у истока лавы до 26 м вблизи фронтальных участков. Площадь лавового поля вместе с небольшим конусом вокруг активного жерла — 259 730 м², объем — 0,0045 км³. Расход лавы в период 6 апреля — 25 мая составлял 0,90 м³/с, или 3,9 млн м³ за 50 суток. Средний расход лавы с 12 января по 25 мая 1996 г. был равен 0,39 м³/с.

К моменту второй аэрофотосъемки (13 августа) с 25 мая объем лавового поля увеличился до 0,0068 км³. Расход лавы 25 мая—13 августа 1996 г. был равен в среднем 0,36 м³/с. Фронтальная часть сместилась до отметки 878,7 м. Протяженность лавового покрова практически осталась прежней, однако его наибольшая ширина выросла до 360 м.

В дальнейшем в основном происходило наращивание объема и площади лавового поля на высотах ниже 1200 м за счет смещения русла потока. Лава, поступающая из бокки, сначала двигалась на высоком пьедестале по хорошо выраженному руслу с четкими бортовыми валами. Ширина активной части потока на истоке составляла 5—7 м и в центральной части — около 10—15 м. На высотах 1100—1200 м лавовый поток эпизодически прорывался или переваливался через борта, формируя новые наступающие языки лавы. По двум кратным измерениям приращения лавового потока на его фронте 4, 9 и 16 сентября Q_l также равнялся 0,34 м³/с. Поэтому данная скорость поступления материала через лавовую бокку принята постоянной и в последующий период. Во время полевых работ в апреле было установлено, что последняя порция лавового потока была уже практически остывшей, хотя и большей по площади, чем в начале января. Поэтому, исходя из последней информации,

ИЗВЕРЖЕНИЯ В КАЛЬДЕРЕ АКАДЕМИИ НАУК И КАРЫМСКОГО ВУЛКАНА

мы приняли, что 4-й этап завершился примерно в конце января 1997 г. Общий объем эффузивов к этому времени был близок по величине к 11,8 млн м³.

5. Эксплозивный этап: с конца января по начало июня 1997 г. К началу этого этапа действующий кратер вулкана был уже практически заполнен пирокластическим конусом, в подножии которого находилась лавовая бокка.

В последующем расход вещества существенно снизился. До середины лета отмечалась умеренно слабая эксплозивная активность вулкана. Небольшой эпизод выжимания новой порции лавы из вершинного кратера отмечен только в середине апреля, но дальнейшего развития он не получил. Длина этого небольшого потока не превышала 150 м при ширине 15—20 м. Уровень эксплозивной деятельности, постепенно снизившейся к концу марта 1997 г. с 230 до 100—120 взрывов в сутки, в дальнейшем был мало изменчив (см. рис. 3).

6. Эксплозивно-эффузивный этап: с начала июля 1997 г. по май 1998 г. и далее. Новый эксплозивно-эффузивный этап, вероятно, начался в первой половине июля 1997 г. 26 июля замечен новый лавовый поток, медленно переваливающийся через изливающийся на западный склон конуса. На эту дату он имел в длину около 360 м при ширине потока 70 м и средней толщине не более 10 м (объем около 250 тыс. м³). Движение лавы фиксировалось лишь по редким (3—5 случаев в час) обвалам каменного материала с фронта потока.

Длина лавового потока в конце августа 1997 г. не превышала 600 м при ширине 100 м и средней толщине 10 м. Фронт находился на абсолютной высоте 1180 м. Поток был более активным, чем в конце июля, и с его фронта происходили почти постоянные обвалы раскаленной лавы. Судя по этим данным, расход лавы в августе составил 0,13—0,14 м³/с (0,3 т/с), что почти в три раза меньше, чем в

1996 г. Подобная эффузивная деятельность наблюдалась и в конце мая 1998 г. Фронт лавового потока находился на высоте 990 м (см. рис. 6, а), и, судя по залеганию лавы на подстилающем снежнике, его движение завершилось в марте—апреле. В то же время по его поверхности поступила свежая порция лавы, разделившаяся на два рукава на высоте около 1200 м над уровнем моря. Таким образом, лавовый покров этого этапа деятельности достиг объема в ~1 млн м³.

Извержение вулкана в 1997 и первой половине 1998 г. на порядок слабее, чем в 1996 г. Количество взрывов в среднем было одинаково, около 5 выбросов в час, но во второй половине года пепловая нагрузка выбросов существенно уступала парогазовому выносу. К началу 1998 г. активность вулкана снизилась до 60—70 взрывов в сутки, но в мае опять возросла до 200—230 выбросов (см. рис. 6, б). Характер эруптивной деятельности в 1997 г. эпизодически менялся. Если осенью 1996 г. и в апреле 1997 г. большинство эксплозивных выбросов содержали пепловую нагрузку, то летом и осенью 1997 г. взрывы чаще представляли собой мощные длительные газовые продувки с меняющимися звуковыми эффектами при малом количестве пепла. Результаты расчетов количества изверженного эксплозивного материала приведены в табл. 2.

Для непрерывной оценки эксплозивной деятельности вулкана Карымский использована причинно-временная связь между указанными выше вулканотектоническими землетрясениями и пепловыми выбросами. В течение всего 1996 г. частота взрывных вулканических землетрясений в основном сохранялась на высоком уровне (см. рис. 3, а). Согласно комплексу полученных данных, интенсивность эксплозивной деятельности второго года извержения была в 5 раз ниже, чем в 1996 г.

В целом частота взрывных вулканических землетрясений, отражающая интенсивность эксплозивно-эффузивной деятельности

Таблица 2

Распределение пирокластики извержения вулкана Карымского в 1996—1997 гг.

Радиус зон пеплопада, км	Площадь зоны пеплопада, км ²		Толщина пепла в зоне, см		Средний удельный вес пепла в зоне, кг/м ²		Масса пепла, тыс. т	
	1996	1997	1996	1997	1996	1997	1996	1997
1,5	7		6,0	3,0	60	30	500	210
4,0	50		2,0	0,6	22	6	1100	300
10,0	250		1,0	0,3	10	3	2500	750
20,0	—	390	—	0,1	—	1	—	40
50,0	8520		0,3	—	3	—	250	—
Сумма, год	8850	~ 700	—	—	5	~1,9	4350	1300
Сумма 1996—1997			—	—	6,3		5650	

ВЛИЯНИЕ ВУЛКАНИЗМА НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ

на Карымском вулкане, и афтершоковая активность в очаге сильного землетрясения 1 января 1996 г. вели себя по-разному. Следовательно, процессы в очаге этого землетрясения в основном не имели непосредственного отношения к извержению Карымского вулкана, и лишь на фоне общего спада афтершоковой активности отмечались ее небольшие пики, сопряженные со слабыми пиками в характере взрывной активности Карымского вулкана (см. рис. 3, а, б). На основании исследований в августе 1997 г. наблюдаемые сейсмо-вулканические события можно разделить на четыре категории: а) высокочастотные землетрясения, б) взрывные вулканические землетрясения, в) гармоническое дрожание и г) дрожание, связанное с извержениями [Yamasato et al., 1997].

Согласно оценкам, объем лавы, изверженной в течение всего 1997 г., достигает 1,7 млн м³, или 3,75 млн т. Общее количество изверженного материала в 1997 г., очевидно, не превышало 5,1 млн т.

Таким образом, общий вес изверженного материала за два года последнего извержения Карымского вулкана достигает 35,5 млн т (или 0,022 км³), а продуктивность вулкана за второй год извержения упала в 7 раз, по сравнению с первым годом. Индекс эксплозивности извержения остается в пределах 20—30 %, что не типично по сравнению с предыдущими эруптивными циклами этого вулкана, когда он достигал 60—80 %.

Вещественный состав продуктов извержения в Карымском вулканическом центре в 1996—1997 гг.

Состав продуктов извержения представлен тремя типами пород: базальтами, андезитами и риодацитами (табл. 3). В Карымском озере среди продуктов извержения преобладали базальты. В конце извержения были выброшены пемзовые бомбы, отвечающие в основном риодацитовому составу. Количество их не превышало 2—3 % от общего объема пирокластиков. Размер бомб варьировал в пределах 0,1—0,3 м, в единичных случаях достигая 1,0—1,5 м. Наличие в риодацитовых пемзах округлых включений шлаков базальтов и пластические деформации между двумя расплавами, базальтовые «рубашки» вокруг пемзовых блоков свидетельствуют об извержении магматической эмульсии, состоящей из различных по вязкости расплавов.

На вулкане Карымский за весь период извержения на поверхность устойчиво поступали андезиты в виде пирокластиков и лавовых потоков.

Базальты извержения относятся к высокоглиноземистому типу умеренной щелочности, калиевости (рис. 7) и расположены на границе известково-щелочной и толеитовой серий [Классификация..., 1981; Gill, 1981]. Они отличаются оливин-плагноклаз-клинопироксеновой ассоциацией минералов-вкрапленников, количество которых находится в пределах

Таблица 3

Химический состав продуктов извержения в Карымском вулканическом центре в 1996—1997 гг.

Оксид	Содержание, %										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	51,08	51,80	52,80	75,05	71,80	68,64	64,80	62,06	62,40	60,70	59,64
TiO ₂	0,88	0,70	0,74	0,04	0,23	0,23	0,88	1,11	0,96	0,82	0,94
Al ₂ O ₃	19,71	18,70	18,76	13,10	14,34	15,66	16,15	14,08	15,96	17,30	17,50
Fe ₂ O ₃	1,71	1,99	2,08	0,44	0,86	1,13	0,42	2,98	2,22	1,78	2,38
FeO	7,26	6,31	5,84	1,29	1,35	1,89	4,85	4,61	4,02	4,20	3,69
MnO	0,13	0,12	0,17	0,10	0,14	0,12	0,05	0,13	0,11	0,10	0,10
MgO	5,34	6,38	5,62	0,25	0,56	0,84	1,70	3,80	0,14	2,06	2,46
CaO	10,12	10,50	10,56	1,09	2,09	2,14	3,60	5,84	5,46	6,80	6,66
Na ₂ O	2,45	2,46	2,52	3,72	4,72	3,72	3,81	3,17	3,94	4,17	3,88
K ₂ O	0,69	0,60	0,84	3,90	3,30	4,80	1,07	1,15	1,77	1,45	1,67
H ₂ O	0,00	0,14	0,16	0,29	0,23	0,34	0,26	0,24	0,07	—	—
P ₂ O ₅	0,17	0,20	0,08	0,06	0,06	0,07	0,17	0,13	0,26	0,25	0,24
Сумма	99,54	100,96	100,17	99,32	99,69	99,58	99,50	99,66	99,31	99,73	99,51

Примечание: 1—3 — базальты извержения в Карымском озере 2—3 января 1996 г. (1 — вулканическая бомба, 2 — вулканический песок из воронки № 4, 3 — шлак из воронки); 4—8 — пемзовые бомбы риолитового (4), риодацитового (5, 6), дацитового (7), андезитового (8) составов; 9—11 — андезиты пирокластического (9) и лавового (10, 11) потоков вулкана Карымский извержения 1996—1997 гг.

Образцы из коллекций В. И. Андреева, Г. А. Карпова, Е. Н. Гриб. Анализ выполнен в ЦХЛ Института вулканологии ДВО РАН. Аналитики: Л. А. Карташова, В. В. Дунин-Барковская.

Рис. 7. Классификационные диаграммы:

а — общая щелочность; показана граница между породами нормальной щелочности и субщелочными [Классификация., 1981]; б — показано поле умеренно калиевых пород по [Gill, 1981]; в — граница между полями пород известково-щелочной (ИЩ) и толеитовой (Т) серий [Там же]:

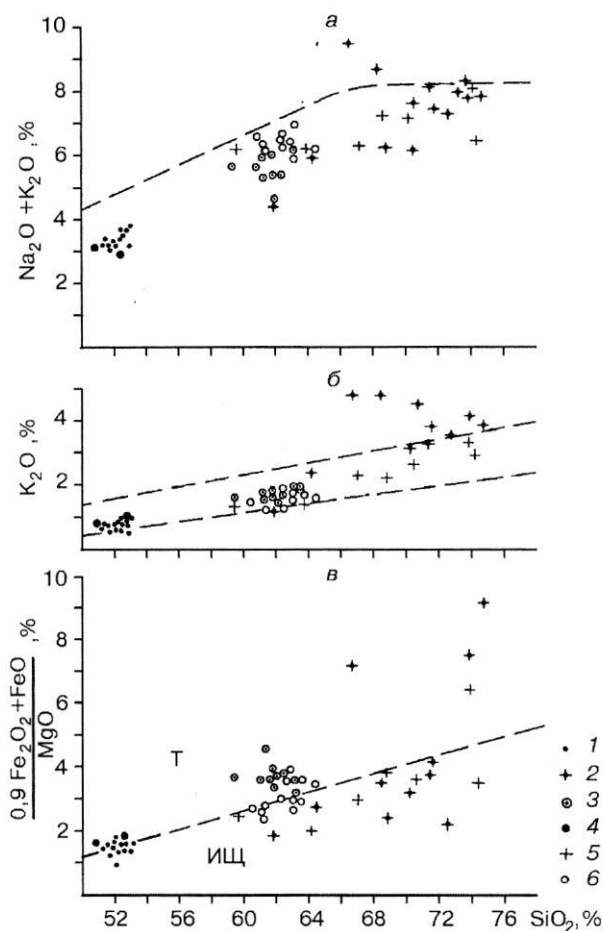
1, 2 — базальты (1) и пемзовые бомбы (2) эксплозивного извержения 1996 г. в кальдере Академии наук; 3 — андезиты извержения вулкана Карымский 1996—1997 гг.; 4 — верхнеплейстоценовые базальты основания разрезов вулканов Карымского вулканического центра; 5 — породы, слагающие постройку вулкана Академии наук и связанные с формированием одноименной кальдеры; 6 — андезиты вулкана Карымского извержений 1962—1965 и 1970—1982 гг.

26–38 %, составляя в среднем 35 % объема породы. Базальты близкого состава изливались в Карымском вулканическом центре в начале верхнего плейстоцена.

Пемзовые бомбы по содержанию кремнекислоты варьируют от андезитов до риолитов с преобладанием риодацитов. По щелочности они относятся к нормальному и субщелочному типам. Обращает на себя внимание повышенная концентрация калия (в двух из них она достигает 4,8 %), что не характерно для кислых вулканитов Восточного вулканического пояса Камчатки. На классификационной диаграмме, отражающей степень железистости пород, большая часть пемзовых бомб попадает в поле известково-щелочной серии. Здесь же расположены фигуративные точки верхнеплейстоценовых кислых вулканитов постройки вулкана Академии наук и связанных с формированием одноименной кальдеры. По степени кристалличности выделяются субафировые разновидности пемзовых бомб с содержанием кристаллической фазы не более 2–3 % и пемзы с повышенным содержанием кристаллов (8–15 % объема породы). В минералогическом отношении пемзовые бомбы отличаются большим разнообразием. Встречаются пироксенсодержащие, роговообманковые и биотитсодержащие типы бомб. Кроме «собственных» кристаллических фаз, кристаллизующихся из кислого расплава, пемзы содержат минеральные фазы, неравновесные с ним. Это клинопироксен *повышенной*

магнезиальности и хромистости, умеренно магнезиальный оливин и высококальциевый плагиоклаз. Состав их аналогичен составу вкрапленников базальтов, извергавшихся одновременно с пемзовыми бомбами.

Андезиты вулкана Карымский относятся к нормальному щелочному типу с умеренной калиевостью. От продуктов прежних исторических извержений они отличаются пониженной общей щелочностью и повышенной железистостью. По последнему показателю андезиты относятся к толеитовой серии, в то время как более ранние андезиты представлены известково-щелочным типом. Среди порообразующих



зующих минералов в андезитах преобладает (15–17 %) плагиоклаз (как в базальтах и риодацитах); пироксены и магнетит составляют 2–3 % от объема породы.

В незначительном количестве встречается оливин, что отмечалось в продуктах прежних извержений. Он определяется в ядрах гломеропорфировых сростков и окружен реакционной каймой клинопироксена.

Изучение состава и взаимоотношений расплавов и минералов в продуктах извержения 1996–1997 гг. в Карымском вулканическом центре позволяет сделать выводы, близкие к тем, **которые приводились** в работе С. А. Федотова [1997]:

1. 2–3 января 1996 г. слабо дифференцированные базальты из глубинных зон промежуточного магматического очага (5–7 кбар, или 18–20 км) при подъеме к поверхности «прошли» сквозь верхнекоровый магматический очаг под кальдерой Академии наук (или его северный край), находящийся в субсолидном состоянии (температура порядка 700 °С).

2. Воздействие высокотемпературных (1130–1200 °С) базальтов, даже кратковременное в течение одних суток, вызвало частичную мобилизацию кислого расплава в верхнекоровом очаге до состояния «кристаллической» ка-

ши и привело к выбросу пемзовых бомб с признаками взаимодействия двух магм. Мобилизация расплава осуществлялась, по-видимому, в узкой зоне по пути подъема базальтов по новой трещине-дайке: происходило как бы «опробование» отдельных зон корового очага в вертикальном разрезе. Этим, вероятно, и объясняется широкий диапазон валового химического и минерального составов пемзовых бомб.

3. Несмотря на различие в температуре и вязкости, наблюдаются активные процессы гибридизации расплавов: пемзовые бомбы насыщены кристаллическими фазами базальтов, извергавшихся одновременно с ними. Ведущим процессом гибридизации является механическое перемешивание расплавов при значительной роли флюидного массопереноса.

4. Инъекция базальтов 2—3 января 1996 г. из промежуточного магматического очага (с глубины 18—20 км) пополнила, вероятно, коровый очаг под кальдерой вулкана Карымского, передав далее тепловой и энергетический импульсы в периферический андезитовый, андезиодацитовый очаг под вулканом Карымским, что наряду с другими факторами способствовало извержению этого вулкана.

5. Возникновение аномальной сейсмологической обстановки в Карымском вулканическом центре привело к тому, что из двух расположенных рядом эруптивных центров происходило одновременное извержение трех различных по составу расплавов (базальты, андезиты, риодациты), разнообразие которых в процессе одного извержения на вулканах Камчатки в историческое время зафиксировано впервые и может свидетельствовать о существовании в недрах структуры взаимосвязанной корово-мантийной магматической системы.

О механизме извержений 1996 г. в Карымском вулканическом центре

Механизм одновременного извержения в кальдере Академии наук и на вулкане Карымском в 1996 г. и связанных с ним глубинных процессов рассматривался в работе С. А. Федотова [1997].

Деятельность Карымского вулканического центра происходит благодаря потоку энергии расплавов и флюидов, которые в течение длительного времени поднимаются к нему сквозь астеносферу из сейсмофокального слоя с глубины ~150 км и накапливаются первоначально в промежуточных магматических очагах в нижних слоях земной коры. Перемещение расплавов и флюидов на расстояние ~120 км вверх от сейсмофокального слоя за одни сутки, по-видимому, невозможно, но импульс давления мог быть передан за это время от сейсмофокального слоя в промежуточные магматические очаги Карымского центра.

Известна связь между извержениями вулканов Карымского вулканического центра и других вулканов Курило-Камчатской дуги с сильными землетрясениями, происходящими в сейсмофокальной зоне. Так, после двух наиболее крупных землетрясений с $M = 8,5$, происшедших у восточного побережья Камчатки 3 февраля 1923 г. и 4(5) ноября 1952 г., наблюдались вспышки вулканической активности. Несколько вулканов Камчатки (в том числе и Карымский) и Курильских островов стали извергаться в этот период [Гущенко, 1979]. По-видимому, сходная взаимосвязь проявилась вновь 31 декабря 1995 г. — 2 января 1996 г. Хотя магнитуда землетрясения, произошедшего в сейсмофокальном слое 31 декабря 1996 г., в этот раз была существенно меньше ($M = 5,6$), но очаг его находился близко к Карымскому вулкану. Поэтому ожидавшееся по ряду признаков начало извержения вулкана могло быть ускорено этим землетрясением средней силы.

Предлагаемый механизм извержений опирается на данные о том, что главный промежуточный магматический очаг Карымского вулканического центра расположен в нижних слоях земной коры. Центр этого очага (центр давления) находится на глубине $18,3 \pm 0,8$ км, а его проекция на дневную поверхность лежит в середине Карымской группы вулканов между кальдерами Карымской и Академии наук [Федотов, 1997; Магуськин и др., 1997]. Землетрясения на глубинах 0—5 км, где интрузивное давление магмы достигает наибольших величин, связаны в большей мере с вулканической деятельностью.

Из главного промежуточного очага, через неглубокий магматический очаг под Карымской кальдерой, расположенный на глубине 4,5—6,5 км, магма поднимается в небольшой периферический очаг современного Карымского вулкана, расположенный на глубине 1,5 км от уровня моря. Отсюда расплав поступает в выводной канал и жерло вершинного кратера вулкана во время его извержений.

Повышение давления в промежуточном магматическом очаге Карымского вулканического центра (1 января 1996 г.) могло послужить причиной возникновения двух разных роев землетрясений — одного вокруг неглубоких питающих очагов вулкана Карымского и другого, гораздо более мощного, связанного с образованием новых трещин, по которым произошло внедрение базальтов. После повышения давления в промежуточном очаге с некоторой задержкой во времени должно было повыситься давление и в неглубоком очаге вулкана Карымского. Вследствие этого возникли слабые землетрясения на глубинах 0—8 км под ним.

ИЗВЕРЖЕНИЯ В КАЛЬДЕРЕ АКАДЕМИИ НАУК И КАРЫМСКОГО ВУЛКАНА

Подготовка и развитие извержений происходили в результате сложного взаимодействия магматических, сейсмических и вулканических процессов [Федотов, 1997]. В 1962—1995 гг. наибольшее число землетрясений происходило на глубине $10 \pm 2,5$ км. По-видимому, прочность пород земной коры под Карымским вулканическим центром наибольшая на этих глубинах. Поэтому происходящие здесь землетрясения должны быть связаны преимущественно со структурами, движениями, сейсмотектоникой Карымского вулканического центра и Восточного вулканического пояса Камчатки, а не с извержением Карымского вулкана. Главной особенностью вулканотектонических явлений в Карымском центре 1—2 января 1996 г. явилось образование новой питающей трещины, по которой произошел прорыв базальтов к поверхности. При этом разрывные нарушения прошли между неглубокими очагами кальдер Академии наук и вулкана Карымского и вышли на дневную поверхность в перемычке между ними (см. рис. 1) в месте проекции центра главного промежуточного очага на дневную поверхность.

Необычайно сильный рой землетрясений предвещал активизацию Карымского вулкана и нового эруптивного центра в кальдере Академии наук, сопровождал внедрение магмы и сами извержения. В первые двое суток произошло коровое землетрясение с $M = 7$ и более 20 землетрясений с $M > 4,5$.

Одной из причин образования нового питающего магматического канала могло быть то, что во время длительного периода покоя между вершинными извержениями вулкана Карымского в верхней его части образовалась более прочная, чем ранее, лавовая пробка.

Фреатомагматический характер извержения в кальдере Академии наук в большой мере обусловлен тем, что питающая дайка вскрыла дно озера на глубине 50—60 м. Вследствие этого извержение было эксплозивным, бурным и непродолжительным, не более суток [Федотов, 1997].

Деформации и разрывные нарушения, связанные с извержением вулканов Карымского центра в 1996—1997 гг.

Изучение деформаций земной поверхности в Карымском вулканическом центре методом повторных геодезических измерений было начато в начале 70-х годов и с тех пор проводится регулярно, ежегодно вблизи действующего вулкана Карымского и с интервалом через несколько лет на всей площади вулканического центра с выходом на соседние геологические структуры. Основные результаты этих

работ изложены в работах [Магуськин и др., 1982; Магуськин, Шароглазова, 1992].

Вертикальные и горизонтальные подвижки геодезических пунктов, происшедшие в результате сильного ($M = 7,0$) поверхностного землетрясения в южной части Карымского вулканического центра 1 января 1996 г. и одновременных извержений в двух местах: в кальдере вулкана Академии наук и очередном (22-м по счету в 20 столетии) извержении Карымского вулкана, представлены на рис. 8.

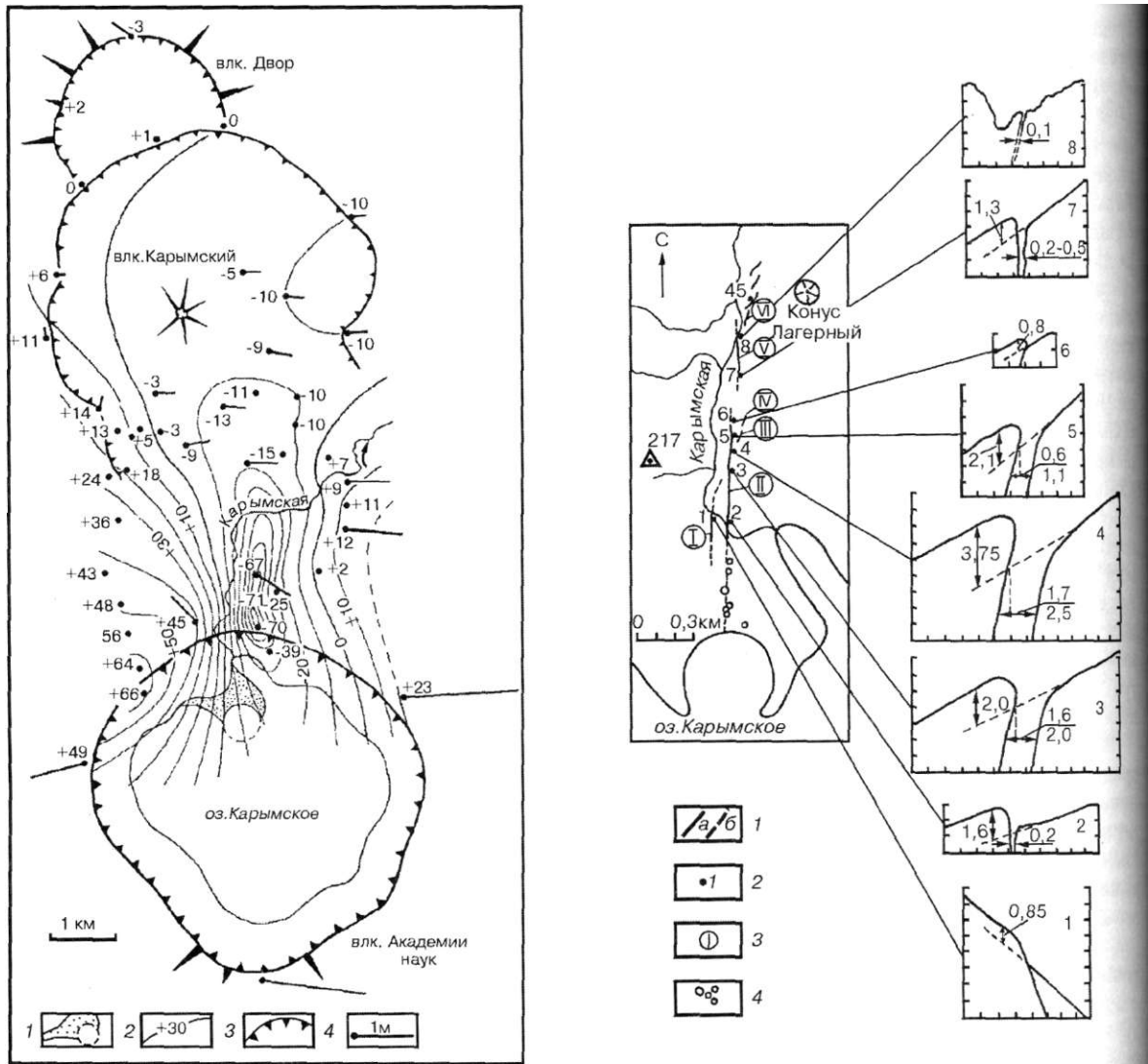
По прямым измерениям превышений и длин линий между геодезическими пунктами выяснилось, что относительные смещения пунктов, расположенных в кальдере древнего потухшего вулкана Двор, незначимы, т. е. находятся в пределах ошибок их определения ($\pm 2—3$ см как по высоте, так и в плане).

На основании этих фактов геодезические пункты, расположенные в кальдере вулкана Двор, приняты в качестве условно неподвижных и относительно них определены подвижки всех остальных геодезических пунктов.

Как горизонтальные, так и вертикальные максимальные подвижки испытали пункты, расположенные вблизи места извержения в кальдере вулкана Академии наук и в районе видимых на поверхности трещин. Вытянутая с севера на юг зона опусканий на величину более 70 см соседствует с зонами поднятий до 66 см на западе и до 23 см на востоке. Величины измеренных наибольших вертикальных подвижек приурочены лишь к местам закладки реперов и не могут считаться максимальными. В местах выхода на земную поверхность разрывов земной коры они могут быть еще большими. Горизонтальные деформации вдоль линий поперек зияющих трещин и через жерло извержения в кальдере вулкана Академия наук превысили $6 \cdot 10^{-4}$ и в целом имеют блоковый характер.

В 1996—1997 гг. проведено полевое обследование и изучение разрывов, сформировавшихся вблизи Карымского вулкана 1—2 января 1996 г. (рис. 9, табл. 4, 5). Они имели длину до 1—1,5 км, преимущественно меридиональное или северо-восточное простирание и разнообразный характер произошедших по ним подвижек (взброс, сброс или раздвиг). Некоторые разрывы имели сложное строение: пропеллерообразную плоскость сместителя, совмещение подвижек типа взброса и раздвига, изменение морфологических характеристик вдоль простирания разрыва. Многие нарушения были изучены с помощью канав, вскрытых вкрест их простирания. Установлено, что подвижки по разрывам происходили в два этапа. На первом этапе преобладало сжатие и формировались взбросы, наиболее широко распространенные по площади. На втором этапе

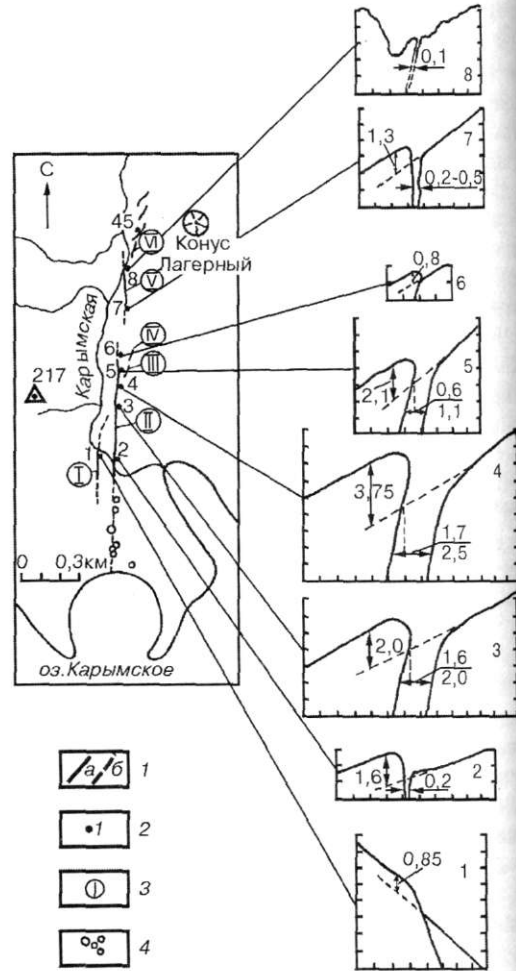
ВЛИЯНИЕ ВУЛКАНИЗМА НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ



↑

Рис. 8. Деформации (смещения) земной поверхности в связи с землетрясением 1.01.1996 г. с $M = 7,0$ и началом одноименного извержения вулкана Карымского и в кальдере Академии наук в Карымском вулканическом центре:

1 — постройка и кратер подводного извержения в кальдере Академии наук; 2 — вертикальные смещения реперов и линии равных вертикальных подвижек, в см; 3 — границы кальдер; 4 — величина и направление горизонтальных подвижек геодезических пунктов, масштаб в метрах.



↑

Рис. 9. Участок, где в начале января 1996 г. сформировались наиболее крупные поверхностные разрывы:

1 — разрывы (а — установленные, б — предполагаемые); 2 — точки, в которых были выкопаны каналы и построены поперечные профили; 3 — номера разрывов; 4 — эксплозивные и провальные воронки, образовавшиеся на вероятном продолжении к югу разрыва II. Стрелки и цифры на профилях показывают вычисленные амплитуды вертикальных и горизонтальных перемещений по разрывам. Амплитуды горизонтальных перемещений показаны как с учетом вертикальной подвижки (верхняя цифра), так и без ее учета (нижняя цифра). Расстояние между рисками на профилях соответствует 1 м.

ИЗВЕРЖЕНИЯ В КАЛЬДЕРЕ АКАДЕМИИ НАУК И КАРЫМСКОГО ВУЛКАНА

Таблица 4

Характеристика наиболее крупных разрывов, сформировавшихся 1—2 января 1996 г. вблизи вулкана Карымского

Номер разрыва	Простирание, град	Длина, м	Амплитуда вертикального смещения, см	Наклон плоскости сместителя		Тип разрыва	Раздвиговая составляющая, см
				направление, румб	угол, град		
I	0—10 25—30*	400	85	В	80	Сброс	До 20—50
II	0	700 1800***	80—375	З* В**	80—82	Взброс* Сброс**	До 250
III	30—70	40	20	ЮВ	80	Сброс	До 60
IV	20—45	60	10* 40—50*	ЮВ	63—80	Сброс	До 50
V	0	400	130	З	75—82	Взброс	До 50
VI	25—30	100	30	СЗ	76	То же	До 50
VII	10—15	1200	до 16—20	В	70—75	—	До 50
VIII	15—17	170	3—4	З	70—80	—	—
IX	20	250	до 40—50	З	70—80	—	—
X	20—25 40**	200	50—70 20**	ЮВ	70	—	До 25
XI****							
XII	20	150	10	В	81	—	—

* Данные о разрыве в северной его части.

** Данные о разрыве в южной его части.

*** Длина разрыва с учетом предполагаемого его продолжения на юг, к центру извержения в Карымском озере.

Таблица 5

Характеристика разрывов, сформировавшихся 1—2 января 1996 г. к югу от конуса Лагерный (зона XI, см. рис. 10)

Номер разрыва	Простирание, град	Длина, м	Амплитуда вертикального смещения, см	Наклон плоскости сместителя		Тип разрыва
				направление, румб	угол, град.	
1	20	25—30	2	Вертикальная		Взброс (?)
2	20—35	100	12	СЗ*	70	Взброс**
3	20	50	8	ЮВ*		Сброс
4	45	10	3—5	СЗ	70(?)	То же
5	20	100	10—20	СЗ	77	—
6	20 50**	100	15—20	ЮВ*		Взброс*
7	45	100	20—30	СЗ	60	Сброс
8	20	10	7	СЗ	67	То же
9	10	30	—	Вертикальная		— (?)
10	10	20	3	ЮВ	80	(?)
11	20	20	3	ЮВ	70	Сброс
12	20	20	—	ЮВ	80	Сброс
13	15	20	—	СЗ	73	(?)
14	20	20	—	СЗ	80	(?)
15	45	3030	10—20	СЗ	66	(?)
				ЮВ	80	Сброс

* Данные о разрыве в северной его части.

** Данные о разрыве в южной его части.

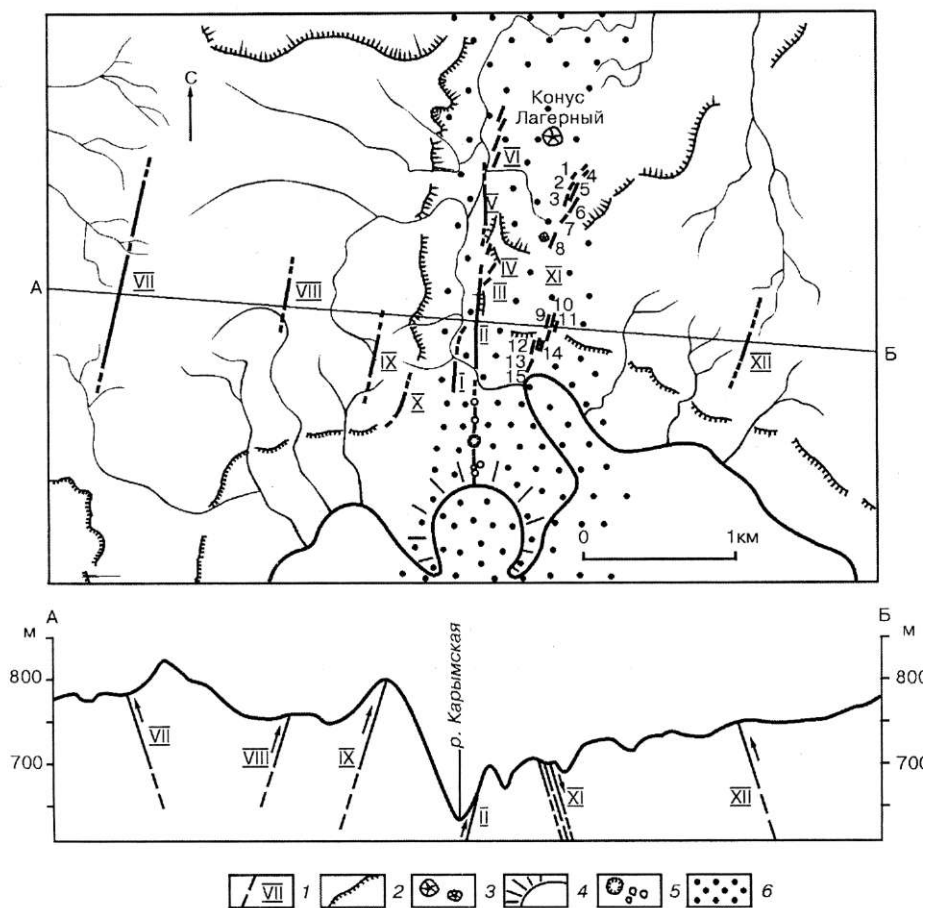


Рис. 10. Поперечные профили, построенные летом 1997 г. на разрывах I, II и V:

1 — разрыв и его номер (характеристика разрыва приведена в табл. 4 и 5); 2 — эрозионные уступы, обрамляющие кальдеры Карымского вулкана (вверху), Карымского озера (внизу) и ущелья р. Карымской (в центре); 3 — шлаковые, лавовые конусы, неки; 4 — основной центр извержения, произошедшего в Карымском озере 2–3 янв. 1996 г.; 5 — мелкие взрывные и провальные воронки, образовавшиеся вблизи основного центра извержения в Карымском озере; 6 — меридиональная зона растяжения и проседания

преобладало растяжение и формировались сбросы и раздвиги. Последние приурочены преимущественно к центру района, к узкой меридиональной зоне размером 1,5 x 5,0 км, расположенной в верховьях р. Карымской. Поперечные профили, построенные вкрест простирания разрывов I, II и V — наиболее крупных в этой зоне, показаны на рис. 10. Видно, что разрывы имеют сложное строение, а результирующая подвижка по разрыву II, в частности, составляет: амплитуда вертикального перемещения — до 3,75 м, амплитуда горизонтального перемещения (раздвига) — до 1,7 м. У некоторых разрывов, сформировавшихся в верховьях р. Карымской на втором этапе, выявлены очень пологие углы наклона плоскостей сместителей (до 27°). При этом восточные крылья разрывов сместились к востоку. Это позволяет считать, что на втором этапе происходили преимущественно субгоризонтальные перемещения. В результате произошедших подвижек у части нарушений, которые сформировались на первом этапе как взбросы (в частности, разрывов II и V), на втором этапе восточные крылья сместились к востоку и они превратились в зияющие расщелины (см. рис. 10).

Полученные данные о характере и амплитудах перемещений по выявленным нару-

шениям совпадают с инструментально измеренными горизонтальными и вертикальными деформациями, полученными прямыми геодезическими наблюдениями. Области, где произошли поднятия, зафиксированные по геодезическим данным, совпали с участками, где были выявлены разрывы со взбросовыми подвижками. Область, где, по геодезическим данным, произошли растяжение и опускание земной поверхности, полностью совпала с отмеченной выше меридиональной зоной, где были выявлены сбросы и раздвиги. Столь крупные деформации при извержениях вулканов впервые наблюдались на Камчатке.

Гидрогеохимические последствия подводного извержения в кальдере Академии наук и его воздействие на окружающую среду

Подводное извержение длилось менее суток, но по удельному выносу вещества и энергии оно оказалось наиболее интенсивным, и его воздействие на окружающую среду было оценено как катастрофическое [Муравьев и др., 1997]. В самом озере и в вытекающей из него р. Карымской погибла вся биота, в том числе заселенная в 1976 г. кокань (озерная форма лосося) [Куренков, 1985]. Рыба погибла из-за попадания в озеро более 70 млн т из-

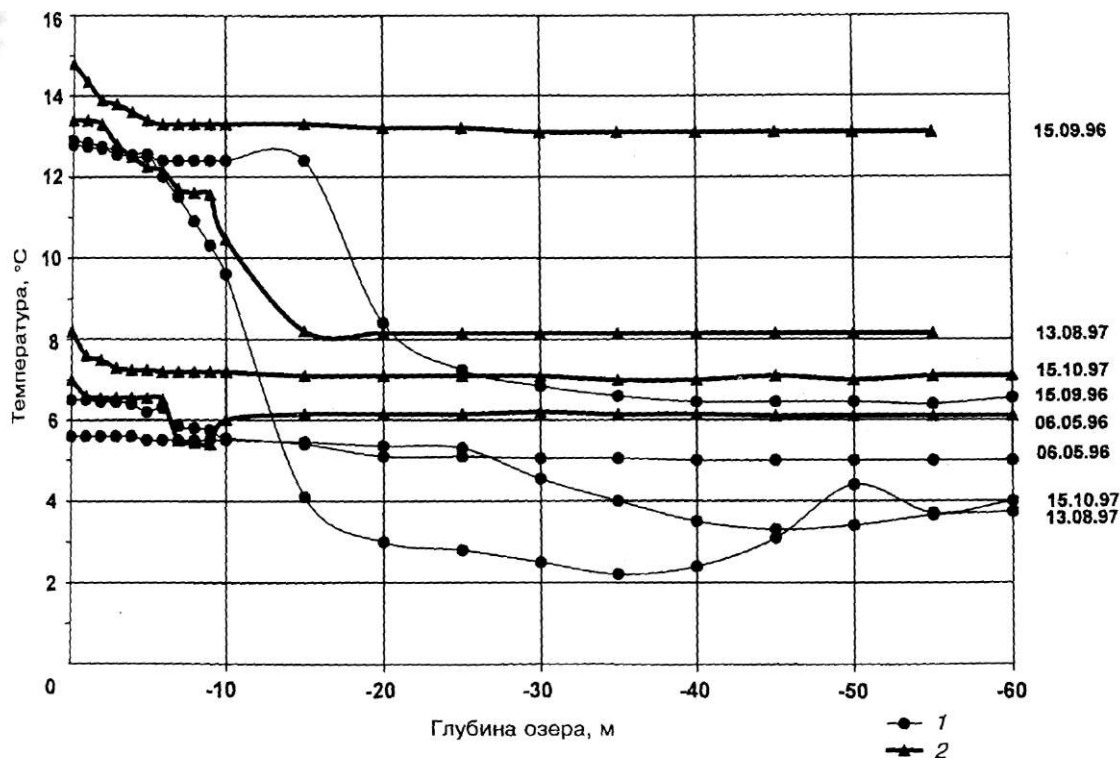


Рис. 11. Распределение температуры воды с глубиной на различные даты в центре Карымского озера и в кратере Токарева.
1 — озеро; 2 — кратер.

верженного материала, вследствие чего последовало практически мгновенное закисление и насыщение вулканическими газами его воды. Еще 22 января 1996 г. (т. е. спустя 20 сут после извержения) в кратере центра эрупции в поверхностных слоях температура воды была в среднем около 25 °С, тогда как до извержения Карымское озеро было покрыто льдом. Последующие замеры вертикального распределения температуры воды в кратерной и открытой частях озера (рис. 11) отражают постепенное восстановление термогидродинамического состояния этого водоема со временем.

Извержение привело к резкому изменению солевого состава воды. С магматическим материалом в озеро поступило около 25–29 тыс. т хлора, 250 тыс. т серы, 1,5 тыс. т фтора, 60 тыс. т натрия, 50 тыс. т кальция, 10 тыс. т магния, 250 тыс. т кремния, 4,5 тыс. т железа, 1,3 т марганца. Пресное озеро объемом 0,46 км³ превратилось в бассейн с кислой водой (рН = 3,2–3,4) хлоридно-сульфатного, кальциево-натриевого состава с общей минерализацией 0,9 г/л.

После извержения в воде озера повсеместно наблюдалось высокое (7–12 мг/л) содержание растворенного железа. Летом и осенью 1997 г. содержание растворенного железа уже упало до 1–2 мг/л в глубинной зоне и еще более существенно (до 0,1–0,5 мг/л) — в ин-

тервале глубин 0–10 м. Однако в 1997 г. почти на порядок увеличилось количество взвешенной формы железа. Аналогичная картина наблюдалась и для алюминия: в 1996 г. отчетливо выражена тенденция обогащения взвешенной формой алюминия поверхностной зоны озера (0–5 м) и, наоборот, в 1997 г. — придонной (55–60 м). Сразу после извержения и в течение всего 1996 г. в воде озера отмечалось повышенное содержание мышьяка (9–12 × 10⁻³ мг/л) в растворенной форме. В 1997 г. его содержание упало в 4 раза. В пробе пены охристого цвета, отобранной с поверхности воды в восточном секторе озера, определено (%): SiO₂ — 32,6, Fe₂O₃ — 14,26, FeO — 6,45, Al₂O₃ — 9,92, TiO₂ — 0,44, MnO — 0,04, MgO — 1,3, CaO — 2,64, Na₂O — 1,8, K₂O — 0,4, H₂O — 2,5, П.п.п. — 24,2, P₂O₅ — 0,45, SO₃ — 3,48 (аналитик В. В. Дунин-Барковская, ЦХЛ ИВ ДВО РАН). В этой пробе атомно-флуоресцентной фотометрией обнаружено 1,75 × 10⁻⁴ % ртути (аналитик И. И. Степанов, ЦХЛ ИВ ДВО РАН). Спектральным анализом здесь же определено до 0,003 % Cu; 0,044 — V; 0,005 — Mo (аналитик Н. И. Чеброва, ЦХЛ ИВ ДВО РАН).

Тонкозернистый и мелкообломочный материал извержения, вынесенный из озера в Карымскую кальдеру двумя паводками в первой половине 1996 г., в основном отложился на

площади Карымских гидротерм. Здесь мощность наносов составляет 0,5—1,0 м. Под слоем ила, пепла, шлаков и резургентного материала со дна и с бортов озера оказалась погребена древесная растительность (ольховый и кедровый стланик, ивняк), произраставшая в долине р. Карымской до извержения. Сотни кубометров мертвой древесины выброшены цунами во время извержения и позднее штормами на берег озера. В прибрежной зоне озера после извержения возникли шесть новых термальных площадок с выходами минеральных вод при температуре от 37 до 97 °С. Более подробно их распространение и состояние на июль 1996 г. рассмотрены в работе [Вакин, Пилипенко, 1998].

Наиболее сильно последствия подводного извержения сказались на биоте озера [Вергасова и др., 1998]. По результатам опробования летом 1996 г. автохтонный пелагический фитопланктон не был обнаружен, так же как и представители микро- и ихтиофауны. Биомасса водорослей пелагиали не превышала 0,1 мг/л, основной ее составляющей в интервале глубин 0—10 м были ксенобионты прибрежной зоны — единичные представители сине-зеленых водорослей (*Cyanophyta*) из рода *Synechocystis*, *Synechococcus*, *Phormidium*, *Mastigocladus*.

В июльских пробах планктона и перифитона 1997 г. из прибрежной зоны северного, восточного и южного секторов озера автохтонные диатомеи не обнаружены, но отмечено массовое развитие жгутиковых форм *Chlorophyta* и *Euglenophyta* (суммарная численность около 7 млн клеток на литр), которым сопутствовали отдельные экземпляры коллаток и бесцветных жгутиковых (представители зоопланктона). У уреза озера, особенно близ устьев холодных ручьев, в июле 1997 г. отмечалось развитие немногочисленных альгобактериальных матов с преобладанием *Cladophora*. Последние являлись локальным биотопом для личинок насекомых. Микрофлористический бентос и перифитон прибрежной зоны (глубина 0—0,5 м) в устьях ручьев восточного и южного секторов озера (в июле 1997 г.) был представлен ксенобионтами: *Synechocystis parvula*, *Synechocystis* sp., *Synechococcus* cf. *elongatus*, *Phormidium* sp. sp. (редкие экземпляры), а также *Diatoma hiemale*, *Eunotia exigua*, *Achnanthes lanceolata* и некоторыми другими диатомовыми. По данным люминесцентной микроскопии, физиологическое состояние бентических и перифитонных водорослей является угнетенным.

Для новых термальных источников северного и северо-восточного секторов озера Карымского в летне-осенний период 1997 г. было характерно развитие альгобактериальных матов с преобладанием гормогониевых

цианофицей, а для источников юго-восточного и южного секторов — коккобактериальных.

Заключение

О воздействии на окружающую среду

Несмотря на кратковременность (менее суток) вспышки базальтового вулканизма, мощных фреатомагматических взрывов и цунами в кальдере Академии наук, их последствия оказали тяжелое воздействие на окружающую природу: резко изменились гидрологический, тепловой и гидрохимический режим Карымского озера (его объем до извержения ~0,5 км³); прежде ультрапресное, оно превратилось в самый большой в мире водоем с кислой водой (рН <= 3,2); возникли новые мощные термопроявления по его берегам; погибла озерная биота; прорывными паводками был нарушен естественный режим Карымских гидротерм, расположенных за пределами кальдеры Академии наук, а также р. Карымской на всем ее протяжении до впадения в Тихий океан и т. д.

Состояние биоты Карымского озера в течение последних двух лет было резко отлично от такового в период, предшествовавший подводному извержению в кальдере Академии наук. В озере полностью погибли и пока не восстановились зоопланктон и диатомовые пелагиали. В субаквальных условиях и в новообразованных термальных источниках развиваются мезофильные сине-зеленые водоросли, а также железо- и серобактерии. Подобные изменения в развитии биоты ранее на Камчатке не наблюдались, так же как и в пресноводных озерах других вулканических областей мира.

В населенной местности последствия таких природных явлений были бы катастрофическими. Получены уникальные данные о процессах, предвещающих пробуждение кальдер, которые помогут следить за их состоянием и опасностью во многих вулканических областях мира.

В то же время связанное с этими событиями вершинное эксплозивно-эффузивное извержение Карымского вулкана монотонно происходит со 2 января 1996 г. до настоящего времени, поставляя на дневную поверхность обычную для него андезитодацитовую магму с постепенно уменьшающимся расходом с 0,9 т/с в начале активизации до 0,3—0,4 т/с в конце 1997 г. Геохимическое поражение растительности от пеплопадов отмечалось лишь в пределах Карымской кальдеры, а радиус зоны пеплопадов вокруг вулкана, оказывавших значимое влияние на окружающую среду, не превышал 10 км. Практически только в пределах этой зоны встречались павшие мелкие грызуны, зайцы и птицы. По-видимому, основной причиной гибели животных и птиц было механическое поражение пеплом их пищевого тракта. На протяжении всех лет извержения Карымского

ИЗВЕРЖЕНИЯ В КАЛЬДЕРЕ АКАДЕМИИ НАУК И КАРЫМСКОГО ВУЛКАНА

вулкана в угнетенном состоянии находятся также популяции различных видов насекомых.

Разнообразие вулканических явлений и их последствий, происшедших в Карымском центре в начале 1996 г., создало благоприятные условия для изучения процессов, протекающих в ходе уникального эксперимента, поставленного самой природой. Сразу после мощного кратковременного фреатомагматического извержения началось восстановление экосистемы озера и прилегающих территорий.

Министерство науки и технологий РФ и РФФИ в 1996 и 1997 гг. оказали важную финансовую поддержку работам Института вулканологии ДВО РАН по изучению уникальных извержений в Карымском вулканическом центре.

Литература

- Белоусов А. Б., Белоусова М. Г., Муравьев Я. Д. Голоценовые извержения в кальдере Академии наук и возраст стратовулкана Карымский (Камчатка) // Докл. РАН. 1997. Т. 354, № 5. С. 648—652.
- Брайцева О. А. Фреатомагматическое извержение в озере Карымское (Восточная Камчатка) ~ 6500¹⁴C лет назад и импульсы подачи базальтового вещества в районе Карымского вулкана в голоцене // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 138—144.
- Вакин Е. А., Пилипенко Г. Ф. Гидротермы Карымского озера после подводного извержения 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 2. С. 3—27.
- Вергасова Л. П., Карпов Г. А., Лупкина Е. Г. и др. Постэруптивная деятельность в кальдере Академии наук (Камчатка): минеральные новообразования, содержание радона в спонтанных газах и биотические изменения // Вулканология и сейсмология. 1998. № 2. С. 49—65.
- Влодавец В. И. Справочник по вулканологии. М.: Наука, 1984. 329 с.
- Гордеев Е. И., Дроздин Д. В., Касахара М., и др. Сейсмические явления, связанные с извержениями вулканов в Карымском вулканическом центре в 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1998. № 2. С. 28—48.
- Гущенко И. И. Извержения вулканов мира: Каталог. М.: Наука, 1979. 476 с.
- Вулканический центр: строение, динамика, вещество (Карымская структура). М.: Наука, 1980. 298 с.
- Иванов Б. В. Извержение Карымского вулкана в 1962—1965 гг. и вулканы Карымской группы. М.: Наука, 1970. 134 с.
- Классификация и номенклатура магматических горных пород / Ред. В. И. Гоншакова. М.: Наука, 1981. 160 с.
- Куренков С. И. Результаты интродукции кокани в Карымское озеро // Генетические и экологические проблемы разведения лососевых рыб. Л., 1985. С. 98—104.
- Леонов В. Л., Иванов В. В. Землетрясения Карымского вулканического центра и их связь с тектоникой // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2, С. 24—40.
- Магуськин М. А., Шароглазова Г. А. Деформации земной поверхности Карымского вулканического центра // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С. 90—110.
- Магуськин М. А., Энман В. Б., Селезнев Б. В., Шкред В. И. Особенности смещения земной поверхности на вулкане Карымский по геодезическим и фотограмметрическим данным за период 1970—1981 гг. // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 49—64.
- Магуськин М. А., Федотов С. А., Левин В. Е., Бахтияров В. Ф. Деформация земной поверхности в связи с сейсмической и вулканической активностью в Карымском вулканическом центре в январе 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 97—112.
- Муравьев Я. Д., Федотов С. А., Будников В. А. и др. Вулканическая деятельность в Карымском центре в 1996 г.: вершинное извержение Карымского вулкана и фреатомагматическое извержение в кальдере Академии наук // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 38—70.
- Федотов С. А. Пробуждение // Поиск. № 3—4 (349—350). 20—26 янв. 1996 г.
- Федотов С. А. Об извержениях в кальдере Академии наук и Карымского вулкана на Камчатке в 1996 г., их изучении и механизме // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 3—37.
- Fedotov S. A., Budnikov V. A., Karpov G. A. et al. Karymsky (Kamchatka) // Bull. of the Global Volcanism Network. 1996. V. 21, № 5. P. 5—8.
- Gill J. Orogenic andesites and plate tectonic. Berlin: Springer-Verlag, 1981. 390 p.
- Karpov G. A., Muravyev Ya. D., Shuvalov R. A. et al. Karymsky // Bull. of the Global Volcanism Network. 1996. V. 21, № 3. P. 9—10.
- Yamasato H., Tokarev E. P., Pashenko A. M. et al. Seismic and infrasonic observations at Karymsky volcano, Kamchatka // Abstract for Joint Meeting of the Japanese Earth Science, May 1997.