

Вулканизм Камчатки

2.1. Извержение вулкана Карымский в 1998-2000 гг., связанные с ним сейсмические, геодинамические и поствулканические процессы, их воздействие на окружающую среду

В сообщении приведены данные о трехлетнем периоде извержения вулкана Карымский (1998-2000 гг.). Эта работа - продолжение серии публикаций, посвященных эруптивному процессу, начавшемуся в Карымском вулканическом центре 1-2 января 1996 г. [Муравьев и др., 1997; Озеров, 1997; Федотов, 1997; Извержения..., 1998]. В ней приводятся новые данные о динамике извержения, о объемах твердых и рыхлых продуктов, поступивших на поверхность, о сейсмичности, о деформациях земной поверхности на площади 40x60 км; проводится реконструкция извержений в Карымском озере за последние 100 тыс. лет; рассматриваются биогидрохимические процессы в экосистеме Карымского озера, большое внимание уделяется влиянию извержений на окружающую среду. В данной работе изложены также отдельные результаты комплексных геолого-геофизических исследований в Карымском вулканическом центре в 1996-2000 гг. Вначале кратко напомним опубликованные данные, необходимые для более полного представления о процессе описываемого извержения.

Вулкан Карымский - один из самых активных вулканов Камчатки - он расположен в 125 км к северу от г. Петропавловска-Камчатского. Вулкан имеет сложное строение и представлен древней кальдерой и молодым конусом, расположенным в ее центральной части.

Диаметр кальдеры ~ 5 км, ее возраст ~ 7 700-7 800 лет. Абсолютная высота молодого конуса составляла 1546.4 м до извержения 1996 г. (по состоянию на 6 сентября 1995 г.), относительное превышение - 700 м. В это время конус венчался центральным кратером, который до извержения имел в плане эллипсоидную форму, его размер 120x160 м. Рост молодого конуса начался ~ 5 300 лет назад, средняя продуктивность его за этот период составила ~ 0.002 км /год. В настоящее время Карымский - это типичный андезитовый стратовулкан центрального типа, сложенный потоками лавы с прослоями пирокластики.

Характерная черта эруптивной деятельности Карымского вулкана - продолжительные вершинные эффузивно-эксплозивные извержения. Предыдущее извержение происходило в 1970-1982 гг.

Извержению 1996-2000 г. предшествовал ряд событий. Первые признаки грядущей активизации были обнаружены в сентябре 1993 г., когда И.К. Дубровская и В.Н. Двигало при проведении тепловой и аэрофотосъемок, обнаружили прогретые площадки и фумаролы, которые не фиксировались с 1982 г. Ими было сделано официальное заключение о «пробуждении» вулкана. Таким образом, первые признаки готовящегося извержения были отмечены более чем за два года до его начала.

О подготовке извержения свидетельствовали и сейсмологические предвестники. В апреле 1995 г. в этом районе начался «рой» вулканических землетрясений. Изучение полученных данных позволило сотрудникам Института вулканологии ДВО РАН и КОМСП ГС РАН сделать заключение о значительном повышении вероятности нового извержения вулкана Карымский. По этим данным был дан прогноз начала извержения вулкана [Федотов, 1996; Извержения..., 1998].

Извержение вулкана Карымский началось в ночь с 1 на 2 января 1996 г., в это время были отмечены первые яркие сполохи в районе вулкана. Облет, проведенный во второй половине дня 2 января, позволил значительно детализировать картину начавшегося извержения [Муравьев и др., 1997; Озеров, 1997].

В этот период извержение происходило одновременно из двух эксплозивных центров, находящихся на расстоянии 6 км друг от друга: из вершинного кратера Карымского вулкана и из кальдерного озера (северный сектор) вулкана Академии Наук.

На вулкане Карымском извержение происходило из нового субтерминального кратера, который образовался на юго-западном склоне в 80 м от кромки главного кратера, диаметр эруптивного образования достигал 25 м. Наблюдался почти непрерывный подъем из жерла газо-пеплового столба на высоту 500-1200 м, на поверхности которого формировался рисунок типа «цветной капусты». От поднимающейся колонны извержения на юг простирался темный шлейф, из которого постоянно выпадала тефра, его длина достигала 50-70 км. Шлейф распространялся на высоте 2-2.5 км над уровнем моря и имел ширину 2-3 км, склоны вулкана и борта кальдеры в южном направлении, вплоть до Карымского озера, были покрыты мощным слоем пепла. Особенно большое количество пирокластики выпало на южном склоне вулкана - здесь отмечены короткие пепловые лавины длиной 500-700 м. На кромке главного кратера вулкана Карымский наблюдалась лишь слабая фумарольная деятельность. Излияние лавы 2 января 1996 г. еще не происходило.

В Карымском озере одновременно происходили вулканические события, по масштабу превосходящие деятельность терминального кратера. Здесь в северной части озера наблюдалось подводное извержение. Из эруптивного центра, расположенного на удалении ~ 500 м от берега, происходили мощные дискретные фреато-магматические взрывы, они следовали друг за другом с интервалом 10-15 мин. Во время эксплозий поверхность озера воздымалась, стрелы широкие фонтаны воды и пара выбрасывались вверх, вслед за ними следовали тугие, нагруженные пеплом облака пара, они поднимающиеся на высоту 2-4 км. При наиболее сильных взрывах выбрасывалось большое количество бомб (размером от 10 см до 2 м), радиус их разлета составлял более 1 км от центра эруптивной активности. На береговой полосе, непосредственно примыкающей к району извержения, в снегу зафиксировано большое количество воронок, образовавшихся в результате их падения. В результате эксплозий на поверхности озера отмечались волны - своеобразные микроцунами. Высота их достигала 10 м, они с большой скоростью прокаты-

вались по всему зеркалу озера, заплески этих волн в отдельных местах достигали высоты 50-60 м. По Карымской прошли грязевые потоки.

3 января 1996 г. ослабела взрывная активность в Карымском озере. В первой половине дня в районе прорыва магмы еще отмечалось интенсивное парообразование. Белые облака поднимались на высоту до 1000 м, но их плотность была уже значительно ниже, чем 2 января, а пепел полностью отсутствовал. Кроме этого, наблюдалось слабое парение над всей поверхностью озера. Изменился и химический состав воды, особенно хорошо это было заметно непосредственно в районе извержения, где вода имела зеленый цвет. Измерения показали, что вода в озере имеет рН 3.2. В 11 ч утра в северной части озера четко прослеживалась черная овальная полоса новых отложений, образовавшихся вокруг эруптивного центра. Во второй половине дня 3 января взрывная активность в оз. Карымском полностью прекратилась. За время извержения температура воды в озере поднялась до 25°C - вся поверхность озера интенсивно парила.

В ходе извержения в Карымском озере был выброшен большой объем магматического материала. В результате около северного берега в течение 2-3 января сформировался новый полуостров площадью ~ 0,7 км². Форма его в плане на дневной поверхности напоминает полумесяц. Полуостров имеет плоскую, почти горизонтальную поверхность, на которой расположены 7 воронок диаметром от 2 до 30 м. Отложения в пределах полуострова хорошо стратифицированы, имеют горизонтальную слоистость. Мощность прослоев от 2-3 до 15 см. Они сложены в основном довольно изометричными обломками изверженных пород, имеющими размер от первых миллиметров до 5-7 см.

3 января изменился режим эруптивной деятельности и на вулкане Карымский. Размеры нового субтерминального кратера значительно увеличились, и он соединился с центральным, не действующим кратером. Диаметр образовавшегося кратера достигал уже 90 м. Из него происходили одиночные взрывы на высоту 1-1,3 км. Вечером в основании газо-пепловых столбов отмечались электрические разряды (молнии). Выбросы следовали с интервалом 3-5 мин. В отличие от предыдущего дня склоны центрального конуса были практически полностью покрыты пеплом. Максимальное количество пепла отложилось в юго-западном секторе

вулкана; мощность пеплового слоя на удалении 3 км от вершинного кратера составляла 30 см.

С 4 января вся эруптивная деятельность в Карымском вулканическом центре, продолжавшаяся в течение 5 лет, происходила только из вершинного кратера Карымского вулкана и значительно изменялась во времени. В целом извержение характеризовалось стромболианским типом эксплозивной и эксплозивно-эффузивной активности разной силы. Временами оно приобретало черты извержения пелейского типа.

2.1.1. Описание извержения вулкана Карымский и его продуктов 1998-2000 гг.

Эруптивная деятельность вулкана Карымский в 1998-2000 гг. значительно изменялась во времени. Общий ход извержения приведен на рис. 2.1.1. Для рассматриваемого периода деятельности вулкана количество землетрясений почти полностью соответствует количеству взрывов, происходящих в вершинном кратере. Представленный график дает возможность проследить общую динамику эксплозивной активности.

В течение всего 1998 г. эруптивная деятельность вулкана характеризовалась закономерным ступенчатым увеличением количества взрывов. В начале января их количество составляло 32-60 в сутки, а к концу декабря - 350-390 в сутки. После пика эксплозивной активности (430-480 взрывов в сутки), произошедшего в начале января 1999 г., началось резкое (вторая-третья декады января 1999 г.), а затем постепенное (февраль-июль 1999 г.) уменьшение интенсивности эксплозивной активности. В середине июля на вулкане происходили лишь единичные взрывы (2-10 взрывов в сутки). С 25 июля эруптивная деятельность на вулкане полностью прекратилась. В течение последующих 9 дней какие-либо признаки извержения отсутствовали, вулкан был спокоен. Ряд исследователей, проводивших анализ динамики эруптивного процесса в реальном времени, приняли начавшуюся паузу за окончание извержения. Как выяснилось несколько позже, это предположение оказалось ошибочным.

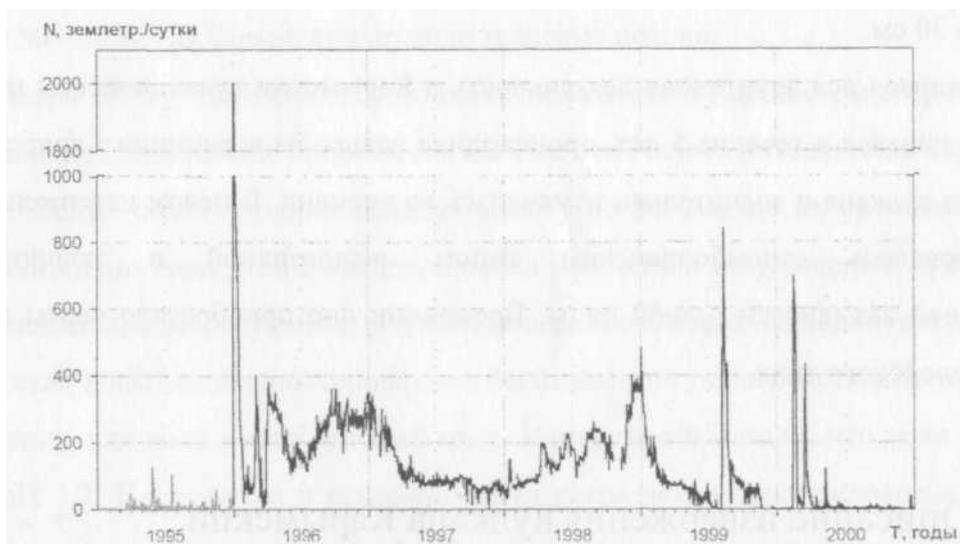


Рис. 2.1.1. График ежесуточного количества вулканических землетрясений на сейсмической станции «Карымская» в 1995-2000 гг. Серым цветом показаны землетрясения в течение 1995 г., предвещающие извержение вулкана, черным - взрывные вулканические землетрясения 1996-2000 гг.

3 августа 1999 г. в районе вершинного кратера было зарегистрировано 1 взрывное землетрясение, 4 августа - 2. Затем в течение 7 дней вулкан вышел на пик эксплозивной деятельности - 12 августа зафиксировано 840 взрывов в сутки. Высокий уровень активности сохранялся всего несколько дней, затем в течение полумесяца он резко снизился. В начале сентября кривая количества взрывов выполаживается, и в течение 2,5 мес. на вулкане наблюдается закономерный процесс ослабления эксплозивной деятельности. С 19 ноября в вершинном кратере происходили лишь единичные взрывы, а 22 ноября эруптивная активность вновь прекратилась. Наступил продолжительный перерыв в динамике извержения, он продлился около 3 мес. Мало у кого из исследователей вулкана в это время возникали сомнения в том, что извержения прекратились. Во второй раз были опровергнуты наши представления о том, как должно заканчиваться извержение, и вулкан произвел в 2000 г. пять мощных коротких эруптивных всплесков.

Первый всплеск начался 8-10 февраля 2000 г. В течение 5-6 дней взрывы достигли своего апогея (696 взрывов в сутки) и затем столь же быстро прекратились. Второй всплеск произошел в марте 2000 г., он во многом повторял предыдущий, однако максимум взрывов был несколько ниже (432 взрывов/сут). Затем последовало еще два более слабых всплеска активности - 14 апреля (36 взрывов/сут) и 8 мая (120 взрывов/сут). После этого интервал между

единичными взрывами увеличился до нескольких недель. Сильный единичный взрыв на высоту 600-700 м (здесь и далее высота взрыва указывается над кромкой вершинного кратера) произошел 25 июня. Вслед за ним наступила самая продолжительная пауза в динамике эруптивного процесса, и вновь, после почти полугодового периода полной тишины, происходит неожиданный резкий очень короткий (40 мин) эпизод активизации 21 декабря 2000 г. Согласно сейсмическим данным, произошло около десяти сильных взрывов. Конус вулкана вновь был покрыт пеплом, а от кратера вниз по склонам наблюдались широкие полосы, по-видимому, следы пирокластических потоков.

Описанная взрывная активность вулкана характеризовалась дискретными газо-пепловыми выбросами на высоту 100-500 м над кромкой кратера, в редких случаях до 800-1000 м (рис. 2.1.2). В нижней части поднимающейся эруптивной колонны наблюдались раскаленные бомбы, размер которых достигал 2 м, а в редких случаях 10 м. Бомбы монолитные, плотные, часто имели раковистый излом, в результате остывания на них образовывалась поверхность типа «хлебной корки». На поверхности отдельных вулканических бомб наблюдались экструзивные борозды, процарапанные в результате подъема сильно вязкой магмы вдоль неровных стенок выводного канала.

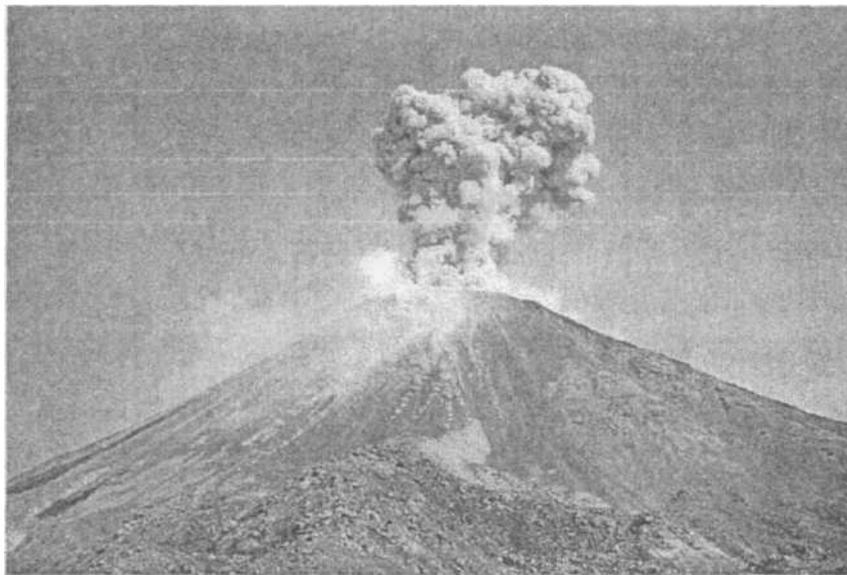


Рис. 2.1.2. Мощный взрывной выброс из вершинного кратера вулкана Карымский, сентябрь 1998 г. (вид с запада). Высота эруптивной колонны над кромкой кратера 300 м (фото А.Ю. Озерова).

Газо-пепловые выбросы продуцировали большое количество тефры. Как правило, количество рыхлого материала, было пропорционально силе взрыва. Эруптивные облака слабых выбросов (100-200 м) имели обычно светло-серые и серые оттенки. Облака взрывов средней силы (300-500 м) имели темно-серый цвет, а цвет эруптивных облаков сильных выбросов (800-1000 м) приближался к черному из-за большой пепловой нагрузки. Пепел взрывов распространялся под воздействием ветра на расстояние 10-50 км, а в периоды сильной активности длина шлейфов достигала 100-250 км. Мощность отложений тефры значительно уменьшалась с удалением от вулкана. Например, в результате эруптивных активизаций в феврале и марте 2000 г. у южного основания конуса (1.2 км от вершины) выпало 65 кг тефры на 1 м, на п-ове Новогодний (5.8 км от активного кратера) уже 0.694 кг/м^2 , а в районе источников Академии Наук (9.3 км от кратера) - 0.187 кг/м^2 . Пепловые шлейфы, в соответствии с «розой ветров», протягивались в основном в восточном и западном направлениях.

По аэрофотограмметрическим данным, объем пирокластического материала, накопившегося в пределах конуса вулкана Карымский за весь период извержения 1996-2000 г., оценивается в 0.0274 км. Следует указать, что общее количество тефры, поступившей в ходе извержения и распространившейся за пределы кальдеры в 1.5-2 раза больше указанного объема.

Важная особенность эксплозивной деятельности вулкана - существование двух уровней временной периодичности в динамике эксплозивного процесса (минуты-часы и секунды). Выброс и следующий за ним интервал покоя соответствуют большому периоду, который обычно составлял 5-60 мин в зависимости от уровня эруптивной активности. Собственно выбросы, представляющие поступление магматического вещества на поверхность, начинались как очень резко, так и постепенно. Кроме этого, было отмечено, что непосредственное развитие взрывов также имело несколько сценариев. Одни из них затухали монотонно и быстро, в течение 10 с. В ходе других, продолжительных взрывов (20-40 с, реже до 1 мин и более), наблюдались интервалы относительного усиления и ослабления активности. Интервалы покоя между эксилозиями характеризовались полным отсутствием какой-либо активности в вершинном кратере и, как правило, продолжались значительно дольше самих взрывов.

В ходе продолжительных взрывов иногда возникали модуляции интенсивности акустического шума и видимого объема выделяющегося газа с характерным периодом в 1 с. Эти колебания определяют второй (короткий) уровень периодичности активности вулкана. Обычно наблюдались цуги, состоящие из 10-20 односекундных периодов.

В течение описываемого извержения (1998-2000 гг.) на склонах вулкана наблюдались лавовые потоки. Они изливались из эффузивной бокки на внешней привершинной части вулкана в юго-западном секторе. Шлаковые конуса или насыпные пирокластические валы на истоке лавового потока не образовывались.

В 1998-1999 гг. было отмечено извержение нескольких порций лавовых потоков. Движение последней эффузивной порции этого периода закончилось не позже начала сентября 1999 г. Все потоки двигались по юго-западному склону вулкана, формируя широкое лавовое поле (рис. 2.1.3). Морфология и динамика движения этих лавовых потоков имели много общих черт. На всем протяжении потоков были хорошо выражены бортовые валы, между которыми и происходило движение раскаленного лавового материала. Мощность эффузивных порций постепенно увеличивалась в направлении от истока (первые метры) к фронтальной части (20-25 м). Ширина потоков на истоке (на высоте ~ 1500 м) составляла 10-20 м, в нижней части склона (на высоте 900-1000 м) - 100-200 м. Отдельные порции лавовых потоков в 1998 и 1999 гг. достигали длины ~ 1 км. Структура поверхности потока крупноглыбовая, размер наиболее крупных обломков достигал 7-10 м.

Лавовые потоки в процессе этого извержения текли очень медленно. Как правило, визуальное движение во фронтальных частях потоков практически не фиксировалось даже при продолжительном, в течение нескольких часов, наблюдении. На то, что потоки «живые», указывали камнепады, эпизодически происходившие в разных частях потоков. Промежутки между камнепадами составляли 5-15 мин. При падении глыб (размер которых от 0.5 до 2-3 м) выделялось небольшое количество пыли рыжеватого оттенка - вторичного пепла. Средняя скорость движения фронтальной части лавовых потоков составляла несколько метров в сутки.

В начале 2000 г. во время либо февральской, либо мартовской активизации произошло излияние еще одного лавового потока на южный склон вулкана. Его

морфология отличалась от потоков, наблюдавшихся ранее. Ширина потока на всем протяжении была 70-100 м, бортовые валы отсутствовали, мощность потока составляла 5 м, длина 650-700 м. Анализ параметров потока и активности вулкана в этот период позволяет полагать, что этот поток был одним из самых «стремительных» в ходе описываемого извержения. Он образовался всего за несколько дней и двигался, по-видимому, со средней скоростью 50-100 м/сут.

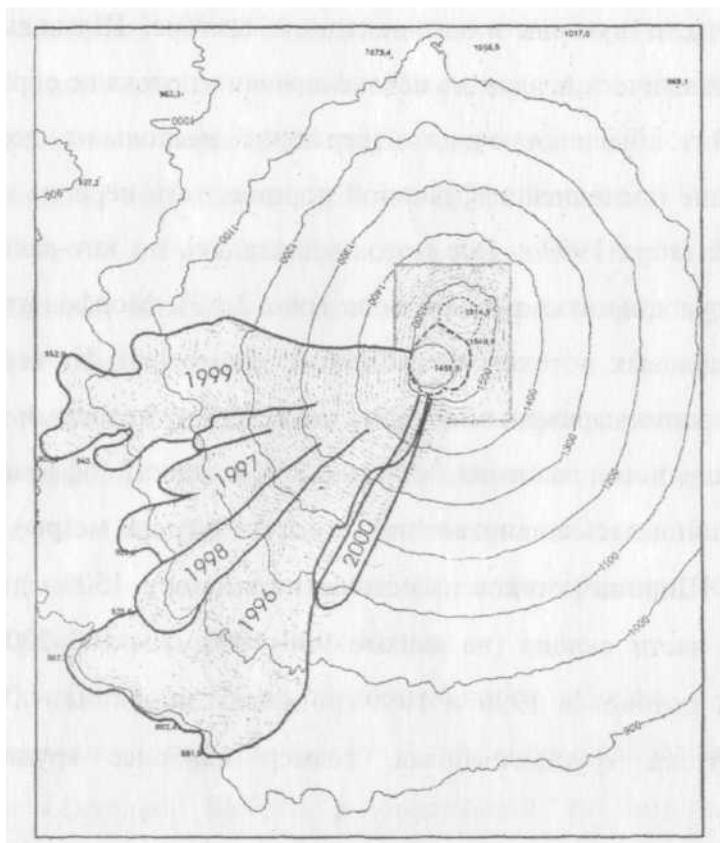


Рис. 2.1.3. Схема распространения лавовых потоков извержения 1996-2000 г. Серым цветом показаны пирокластические потоки, образовавшиеся в 2000 г.

Объем эффузивного материала, поступивший на поверхность в период с июня 1998 г. по сентябрь 2000 г., по данным аэрофотограмметрических исследований, составил 0.0119 км³, а за весь 5-летний период извержения объем излившейся лавы достиг 0.0229 км³.

Из-за большой удаленности вулкана режимные наблюдения за ходом извержения носили дискретный характер. Кроме этого, отсутствие явно выраженных визуальных эффектов, обычно сопровождающих движение лавовых потоков, не позволило создать полной картины движения разных эффузивных порций.

Следует указать, что в отдельные моменты извержения на склонах вулкана отмечались пирокластические потоки. Например, 10 июля 1999 г. взрывные события происходили с интервалом около 1 ч. Фиксировались мощные, сильно нагруженные пеплом выбросы с большим количеством крупных бомб размером до 10 м. Выбросы достигали высоты 700-900 м. Во время этих взрывов бомбы покрывали все склоны вулкана до абсолютных отметок 1000-1100 м. В результате наиболее мощных взрывов отмечалось такое достаточно редкое явление, как коллапс эруптивной колонны, что и приводило к образованию пирокластических потоков (рис. 2.1.4).

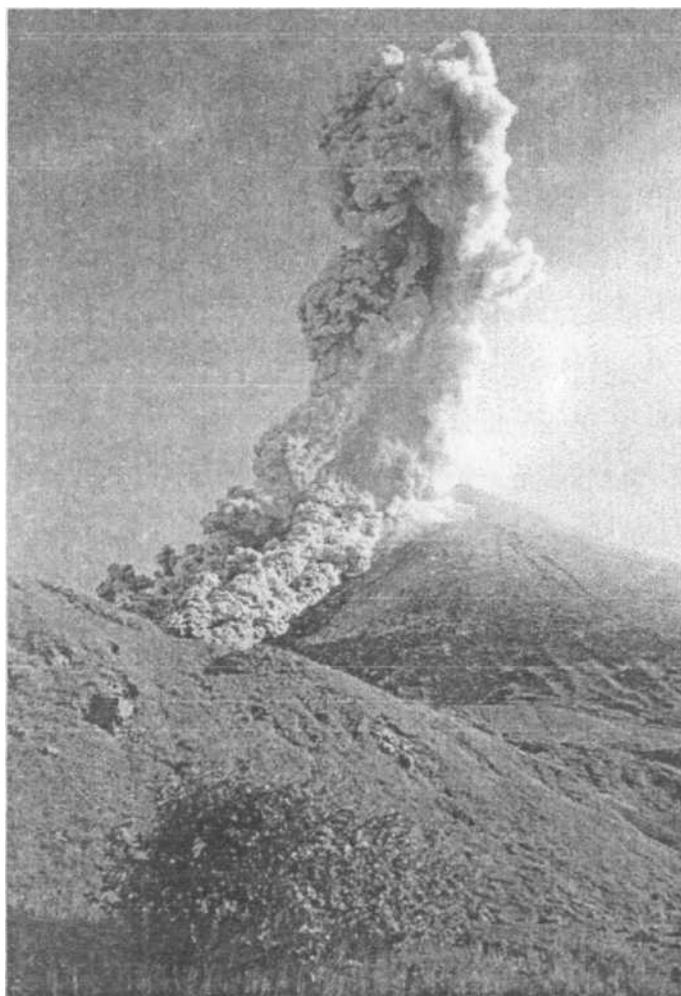


Рис. 2.1.4. Пирокластический поток, распространяющийся по западному склону вулкана Карымский 10 июля 1999 г. (вид с юго-запада). Высота эруптивной колонны 700 м над кромкой кратера (фото А.Ю. Никифорова).

Они распространялись в основном в западном направлении, но иногда покрывали и южный склон вулкана. Наиболее длинные пирокластические потоки

достигали атрио вулкана Карымский. Скорость распространения пирокластических потоков достигала 10-15 м/с. За пять лет извержения пирокластические потоки отмечались всего несколько раз. Однако их появление свидетельствует о том, что при таком характере эруптивного процесса вулкан неожиданно может перейти в крайне опасное состояние.

Эруптивные события, происходившие на вулкане, привели к значительным морфологическим изменениям вершины вулкана Карымский. В течение описываемого извержения вершину венчал двойной кратер, напоминающий в плане цифру 8. Старый, не действующий, север-северо-восточный кратер вулкана (диаметр 120 м) в ходе извержения менялся незначительно, в основном за счет выпадающих на него новых порций тefры. Все эруптивные события происходили в новом, активном, юг-юго-западном кратере, образовавшемся в 1996 г. Средний диаметр этого кратера к маю 1998 г. достигал 90 м, а глубина его составляла 25 м. Кратер был открыт в юго-западном направлении, абсолютная отметка дна составляла 1509.4 м. Исток лавы находился на внешнем склоне вулкана, в 40 м юго-западнее кромки активного кратера. Высота вулкана в это время составила 1543.2 м.

К апрелю 1999 г. благодаря мощной эксплозивной деятельности диаметр активного кратера увеличился в 1.3 раза и достиг 125 м. Абсолютная высота вулкана увеличилась до 1554.6 м. Этому способствовало обилие тefры, образовавшейся в результате взрывов. Уровень дна кратера не изменился. Эффузивная бокка по-прежнему находилась на внешнем склоне вулкана.

Фотограмметрические измерения, проведенные в апреле 2000 г., показали, что размер кратера вновь значительно увеличился. К этому времени его диаметр составил 190 м. Глубина кратера понизилась на 40 м до отметки 1469.6 м. Абсолютная высота вулкана уменьшилась на 6.2 м до отметки 1548.4 м. Можно предположить, что диаметр кратера увеличился либо благодаря мощнейшим эксплозивным активизациям в августе 1999 г. и в феврале 2000 г., либо вследствие начавшихся просадок, вызванных опусканием магматической колонны. Не исключается, конечно, и совокупное воздействие этих двух факторов.

Исследования, проведенные 26 сентября 2000 г., показали, что за пять прошедших месяцев внутренняя поверхность активной эксплозивной воронки претерпела значительные изменения. Дно кратера опустилось еще на 9.7 м (до

отметки 1459.9 м), на крутых участках образовались сплошные оползни, покрывшие около 50 % поверхности склонов. Появились крутые обрывы. Следует указать, что сотрудники полевых отрядов, проводившие исследование у подножья вулкана в августе-октябре 2000 г., часто отмечали звуки обвалов внутри активного кратера. Причем движение материала на внешних склонах вулкана в это время вообще не фиксировалось. Все это указывает на то, что просадки в кратере, вызванные оттоком магматического вещества, продолжались.

К 26 сентября 2000 г. вершину вулкана Карымский венчал двойной кратер. Диаметр старого, неактивного, северного кратера составлял 110-120 м, внутренняя его часть была пологой. Высота кромки в северной части - 1528.9 м, в южной - 1548.9 м. Дно кратера имело абсолютную отметку 1515.1 м. Диаметр нового, активного кратера, располагающегося в южной части вершины, был 180-190 м. Он представлял собой крупное чашеобразное углубление, открытое на юго-запад. Внутренняя часть кратера имела крутые стенки. Высота северо-восточного гребня - 1548.9 м, западного - 1496.4 м. Дно кратера находилось на отметке 1459.9 м.

Продукты извержения - пепел, бомбы и породы лавовых потоков - отвечают по химическому составу андезитам (SiO_2 - 61.5, TiO_2 - 0.8, Al_2O_3 - 16.7, Fe_2O_3 - 2.4, FeO - 5.1, MnO - 0.1, MgO - 2.0, CaO - 5.3, Na_2O - 3.7, K_2O - 1.6, P_2O_5 - 0.2). Химический состав пород оставался постоянным в ходе извержения (за редким исключением появления светлых пеплов, анализ которых проводится). Поступающие на поверхность андезиты в основном плотные, реже пористые разности темного цвета. Главный породообразующий минерал в них - плагиоклаз; его количество изменяется в пределах 20-25 %, размер отдельных зерен 3-5 мм. В крайне подчиненном количестве отмечены фенокристаллы клино - и ортопироксена размером до 2-3 мм. Магнетит присутствует в виде акцессорного минерала.

Начато сравнительное микронзондовое исследование пород, поступивших из вершинного кратера вулкана Карымский в 1996-2000 гг. Первые результаты представлены на графиках рис. 2.1.5. Результаты анализов показывают, что плагиоклаз кристаллизовался в широком интервале составов An_{91-38} . Как правило, в ядрах фено- и субфенокристаллов содержание анортитовой составляющей выше, чем в их краевых частях и микролитах. Интервал кристаллизации клино- и ортопироксенов находится в более узких пределах ($-\text{Mg} = 75-60$). Следует

указать, что для пород 1996 г. и 1998 г. микролиты будут исследоваться в ближайшем будущем. К концу извержения содержание TiO_2 в магнетите несколько увеличивается. Это может свидетельствовать об изменении окислительно-восстановительного режима кристаллизации.

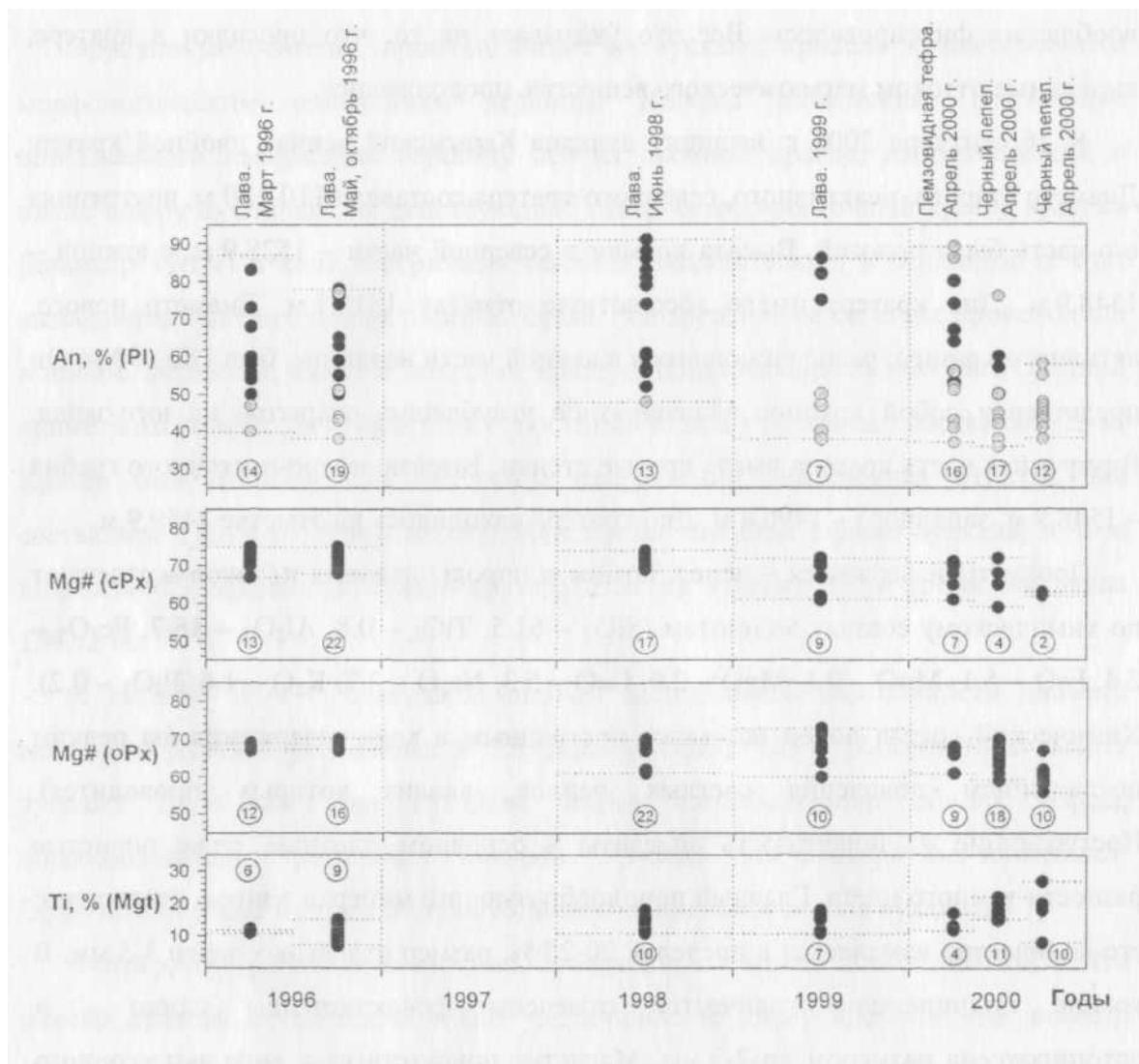


Рис. 2.1.5. График химического состава минеральной ассоциации андезитов, поступивших на поверхность в ходе извержения вулкана Карымский в 1996-2000 гг. Цифры в кружках - количество проанализированных минеральных зерен. Черные кружки - составы ядер фенокристаллов, серые - составы микролитов.

Анализ графиков показывает, что в ходе извержения минеральный состав андезитов, поступающих на поверхность, оставался в основном постоянным и существенного фракционирования в ходе извержения не происходило.

2.1.2. Сейсмические явления, связанные с извержениями в Карымском вулканическом центре в 1996-2000 гг.

Карымский вулканический центр за время детальных сейсмологических наблюдений, начиная с 1962 г., характеризуется как район постоянной, высокой местной сейсмичности [Токарев, Фирстов, 1967; Токарев и др., 1969; Токарев, Фирстов, 1977; Токарев, 1989; Леонов, Иванов, 1994]. В январе-феврале 1978 г. там произошел рой землетрясений, самое сильное событие которого имело магнитуду $M_h = 5.5$ [Зобин и др., 1983]. На основе изучения пространственного распределения землетрясений в районе вулкана Карымский в 1985 г. было обнаружено наличие под ним на глубинах 4-10 км асейсмичной области, которая идентифицировалась как периферический магматический очаг [Широков и др., 1988]. Ранее наличие такого очага было показано по гравиметрическим данным [Зубин и др., 1971]. Однако до 1996 г. не было замечено определенной связи местных землетрясений с извержениями вулкана Карымский. 2 января 1996 г. в Карымском вулканическом центре началось одновременное извержение двух вулканов, предварявшееся и сопровождавшееся мощной местной сейсмичностью с магнитудой $M_s = 6.6$ [Муравьев и др., 1997; Федотов, 1997; Гордеев и др., 1998; Zobin, Levina, 1998]. Местные землетрясения продолжают в этом районе и в настоящее время.

2.1.2.1. Предвестники, прогнозы и начало одновременных извержений

В период с октября 1982 г. до 2 января 1996 г. вулкан Карымский находился в покое (устные сообщения В.В. Степанова и В.В. Ящука). Первые признаки его пробуждения были обнаружены в августе 1993 г. по результатам аэрофотосъемок в видимом и инфракрасном диапазонах (отчет по проекту 1.2.1. ГНТП № 18 за 1993 г., В.Н. Двигало, И.К. Дубровская). Ретроспективно также было показано, что начиная с 1985 г. местные землетрясения стали преимущественно концентрироваться в районе вулканов Карымский и Академии Наук, а не рассеиваться по всей сравнительно широкой сейсмоактивной области в Карымском вулканическом центре, как было в 1962-1994 гг. Землетрясения, как обычно, происходили роями, но продолжительность их не превосходила 2-3 недель. Состояние вулкана контролировалось радиотелеметрической

ровалось радиотелеметрической сейсмостанцией ГС РАН «Карымская», установленной на склоне вулкана Карымский.

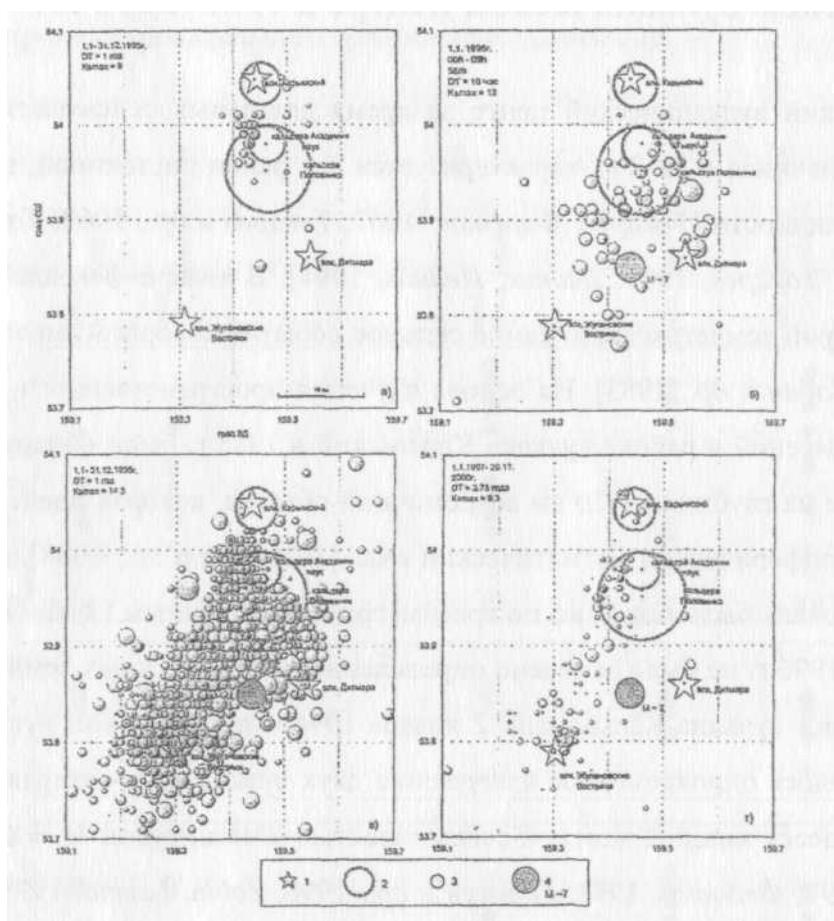


Рис. 2.1.6. Распределение эпицентров землетрясений в связи с одновременными извержениями и землетрясением с магнитудой $M \sim 7$ в Карымском вулканическом центре за период 1995–2000 гг. (определения КОМСП ГС РАН), а) - с 1.01 по 31.12.1995 г. (в течение одного года до начала одновременных извержений); б) - 1.01.1996 г. с 00h до 09h 56m (в течение 10 ч форшоковой активности); в) - с 1.01. по 31.12.1996 г. (в течение одного года после землетрясения 1.01.1996 г. с магнитудой $M \sim 7$ и начала одновременных извержений); г) - с 1.01.1997 по 20.1.2000 г. (во время продолжения извержения вулкана Карымский и ослабления сейсмической активности в очаге землетрясения с магнитудой $M \sim 7$).

В марте 1995 г. в этом районе начался предвещающий рой вулканических землетрясений, который без перерывов продолжался в течение 9 мес. вплоть до начала извержений 1-2 января 1996 г. [Извержения..., 1998]. В отдельные дни на расположенной на вулкане Карымский радиотелеметрической сейсмостанции отмечалось до 120 землетрясений в сутки. По определениям КОМСП ГС РАН, они охватывали вытянутую в меридиональном направлении область длиной около 20 км от вулкана Двор на севере до вулкана Дитмара на юге (рис. 2.1.6, а). Землетрясе-

ния происходили на глубинах от 0 до 10 км, их энергетический класс $K_s < 9$. На основании развития этого роя были даны первые среднесрочные прогнозы извержения вулкана Карымский. В служебных записках А.В. Сторчеуса и В.В. Иванова на имя директора Института вулканологии (от 7 апреля 1995 г.) и в Камчатский центр мониторинга (от 13 апреля 1995 г.) сообщалось, что извержение вулкана Карымский ожидается в течение первых дней и недель, а также указывались ожидаемые параметры будущего извержения, его опасность для авиации и населения. В служебной записке от 7 апреля также предлагались мероприятия, которые необходимо провести в связи с готовящимся извержением: выдать предупреждение для авиации, организовать регистрацию землетрясений Карымской сейсмостанции в расширенном варианте, создать в Институте вулканологии полевой отряд для изучения будущего извержения, просить областную администрацию выделить средства для финансирования работ по прогнозу извержения. 30 мая 1995 г. прогноз был подтвержден в письме директора Института вулканологии ДВО РАН С.А. Федотова на имя командующего Северо-Восточным пограничным округом В.Л. Бекетова. В последующие 8 мес прогноз извержения вулкана Карымский подтверждался еженедельно вплоть до начала извержений.

К вечеру 1 января 1996 г. на сейсмостанции «Карымская» начался катастрофический рост числа и энергии землетрясений, которые следовали настолько часто, что сливались в сплошную запись. Поэтому В.В. Ящук в своих телефонограммах 18 ч 15 мин (время местное) оперативному дежурному МЧС по Камчатской области и директору Института С.А. Федотову сообщает об усилении сейсмичности в Карымском районе и о вероятном начале извержения в Карымский. Позднее, вечером того же дня, в Карымском районе произошло два землетрясения энергетических классов $K=11$ и $K=12$, которые ощущались в г. Петропавловске-Камчатском силой $I=II-III$ балла (рис. 2.6, б). Директор Института С.А. Федотов подтвердил администрации Камчатской области свою оценку сейсмической обстановки на Камчатке, сообщил о том, что велика вероятность извержения вулкана Карымский, и просил выделить вертолет для полета к району извержения [Федотов, 1997]. На следующий день (2 января 1996 г.) утром из ПДСП Елизовского аэропорта сообщили о том, что над вулканом Карымский отмечается облако извержения (сообщение В.Н. Плоцкого по телефону). Полет вертолета МЧС в район извержения состоялся днем 2 января.

Все указанные выше прогнозы реализовались в ночь с 1 на 2 января 1996 г. с началом извержения вулкана Карымский. Однако 2 января, спустя примерно 12-14 ч после начала извержения вулкана Карымский (устное сообщение А.Г. Коваленкова), началось второе извержение - в Карымском озере, которое не прогнозировалось.

В дальнейшем Институтом вулканологии ДВО РАН было дано несколько успешных прогнозов развития извержения вулкана Карымский.

2.1.3. Сейсмичность Карымского района в 1995-2000 гг.

Сейсмичность района контролируется Камчатской региональной сетью сейсмических станций ГС РАН, которая без пропусков определяет координаты землетрясений из этого района, начиная с энергетического класса $K_s > 8.0$, с конца 1980-х гг. ($K_s > 7.5$). Одна из станций располагается непосредственно на вулкане Карымский и может регистрировать более слабые ($K_s \geq 4.0$) местные события (без определения их координат). Сейсмические станции региональной сети располагаются сравнительно далеко от исследуемого района, поэтому точность определения координат местных землетрясений была сравнительно невысокой (средняя ошибка около 10 км, максимальная до 20 км). Расстояние между двумя центрами извержений в 1996 г. было равно 6 км, следовательно, разрешающая способность Камчатской региональной сети была недостаточна для различения сейсмичности, связанной с указанными двумя центрами извержений. Таким образом, проводить сравнение определений координат землетрясений с тектоникой и вулканической активностью в этом районе следует с большой осторожностью и рассматривать полученные данные как предварительные.

В марте 1995 г. в Карымском районе начался рой слабых местных землетрясений, который не прекращался вплоть до начала извержения 2 января 1996 г. Энергетический класс событий $K_s < 9$. Согласно определениям КОМСП ГС РАН, эпицентральная область землетрясений охватывала кальдеры Академии Наук и Карымскую и имела диаметр около 10 км, глубина очагов была от 0 до 10 км (рис. 2.1.6 а). При этом большинство определений было приурочено к западному и северо-западному бортам кальдеры вулкана Академии Наук.

1 января в 14-16 ч (время местное) в Карымском районе началось резкое усиление сейсмичности (мощный форшоковый рой). Форшоки охватывали огромную территорию от вулкана Жупановские Востряки (на юге) до северного борта кальдеры вулкана Академии Наук (на севере) размером примерно 25x17 км (рис. 2.1.6, б). Глубина, на которой произошло событие, была от 0 до 65 км, в основном от 0 до 30 км. Завершился рой в этот же день в 9 ч 57 мин сильнейшим коровым землетрясением с магнитудой около $M \sim 7$ ($K_s = 14.3$). На континентальной Камчатке событие такой силы за время сейсмологических наблюдений с 1962 г. отмечалось впервые.

Согласно предварительным определениям В.В. Иванова, учитывающим поправки за неоднородности скоростных свойств среды, эпицентр основного толчка лежал примерно в 25 км к югу от вулкана Карымский (обозначен на рис. 2.1.6 б, - г в виде зачерненного кружка). Через 8-10 ч после этого события началось извержение вулкана Карымский, а вскоре произошло кратковременное подводное извержение базальтов в Карымской кальдере.

Сразу после основного толчка происходил мощный и очень продолжительный афтершоковый процесс. Эпицентры афтершоков захватили еще большую площадь (размеры ее ~ примерно 40x17 км). Глубины событий были от 0 до 65 км.

Возможно, некоторые из этих землетрясений были связаны с внедрением базальтов по дайке, питавшей подводное извержение, однако недостаточное разрешение региональной сети не позволяет этого утверждать определенно. 1-2 января 1996 г. форшоки следовали настолько часто, что сливались в сплошной непрерывный фон даже на станциях, удаленных на 100 км от района.

На сейсмостанции «Карымская» 3 и 4 января 1996 г. отмечалось около 2000 событий в сутки, в дальнейшем интенсивность и сила форшоков быстро спадала во времени, однако афтершоки отмечались еще 2-3 года после основного толчка.

В последующем (в 1997-2000 гг.) в рассматриваемом районе отмечалась более слабая сейсмичность, события следовали реже, их энергия была существенно меньше, чем в 1996 г. ($K_s \leq 9.3$) (рис. 2.1.6, г). Они занимали диапазон глубин 0-60 км, в основном 0-20 км.

2.1.4. Деформации, связанные с сильным ($M=7.0$) землетрясением, прорывом магм и извержениями в Карымском вулканическом центре в 1996-2000 гг.

Для изучения современных движений земной поверхности в ныне активном Карымском вулканическом центре Камчатки в 1971-1977 гг. был создан геодезический полигон Институтом вулканологии ДВО РАН совместно с Дальневосточным подразделением Федеральной службы геодезии и картографии РФ (рис. 2.1.7). Многолетние наблюдения на этом полигоне подтвердили высокие скорости деформаций земной поверхности, особенно в средней зоне вулканического центра. После сильного ($M=7.0$) землетрясения, происшедшего здесь 1.01.1996 г. и последовавшего за ним одновременного извержения двух вулканов - Карымского и Академии Наук, которое сопровождалось видимыми разрывами земной поверхности, возникла необходимость выявления области и границ распространения значимых - ($1-3 \cdot 10^{-6}$ и более) - горизонтальных и вертикальных подвижек, необходимых для понимания механизма питающих магматических систем, определения глубины залегания близповерхностных очагов магмы и давления в них. Первые же инструментальные измерения обнаружили горизонтальные подвижки в виде растяжения величиной до $6 \cdot 10^{-4}$ и вертикальные подвижки разного знака суммарной амплитудой до 1.5 м [Магуськин и др., 1997]. Повторные измерения на ранее заложенных геодезических пунктах, относительное местоположение которых было известно с точностью $(1-2) \cdot 10^{-6}$, были продолжены в 1996-2000 гг. Количество таких пунктов на полигоне более 160, около 100 из них имеют относительную высотную отметку с точностью первых миллиметров и более 60 пунктов - относительное плановое положение с точностью первых сантиметров. На некоторых из этих пунктов были выполнены высокоточные гравиметрические наблюдения. В инструментальной вулканологии это редкая удача, когда «театр» предстоящих вулканических и сейсмических событий заранее покрыт сетью повторных высокоточных геодезических измерений. Повторение измерений на всех этих пунктах после упомянутых выше событий - важнейшая научная задача. В настоящее время только благодаря поддержке Министерства промышленности, нау-

ки и технологий удалось выполнить некоторое количество повторных геодезических измерений. Часть результатов этих работ представлено на рис. 2.1.8 и 2.1.9.

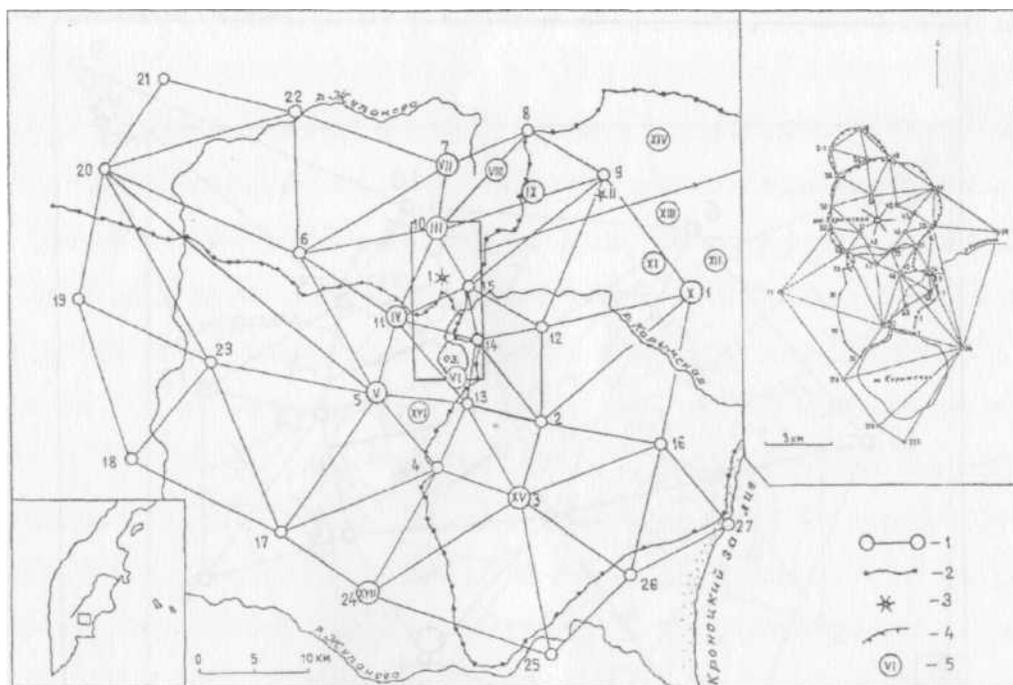


Рис. 2.1.7. Схема геодезических измерений в Карымском вулканическом центре. 1 - сторона линейно-угловой триангуляции; 2 - линии высокоточного нивелирования; 3 - действующие вулканы; 4 - кальдера вулканов Карымский и Академии Наук; 5 - вулканы Карымской группы (цифры в кружках): I - Карымский, II - Малый Семячик, III - Двор, IV - Разлатый, V - Крайний, VI - Академии Наук и Однобокий. VII - Соболиный, VIII - Ступенчатый бастион, IX - Сухой, X - Прибрежный Южный, XI - Стена, XII - Прибрежный Северный, XIII - Массивный, XIV - Березовый, XV - Дитмара, XVI - Белянкина, XVII - Жупановские Востряки.

Ориентировка главных осей плоской деформации в конечных элементах (в треугольниках) показывает, что подъем магмы в периферический очаг вулкана Карымский и последующее за ним вершинное извержение этого вулкана, а также прорыв магмы на дне кальдерного озера вулкана Академии Наук сопровождались растяжением земной поверхности по направлению запад-восток. Максимальные растяжения до $234.4 \cdot 10^{-6}$ наблюдались на площади от места подводного извержения до южной границы кальдеры вулкана Карымский (см. рис. 2.1.8).

На рис. 2.1.9 показано изменение площадей (дилатации) плоских фигур. Эти данные очерчивают область положительных деформаций, максимальное значение ее в районе подводного кратера в кальдере вулкана Академии Наук. К сожалению,

данных пока недостаточно, чтобы уверенно наметить границу нулевых деформаций (в данном случае границу между областями растяжения и сжатия).

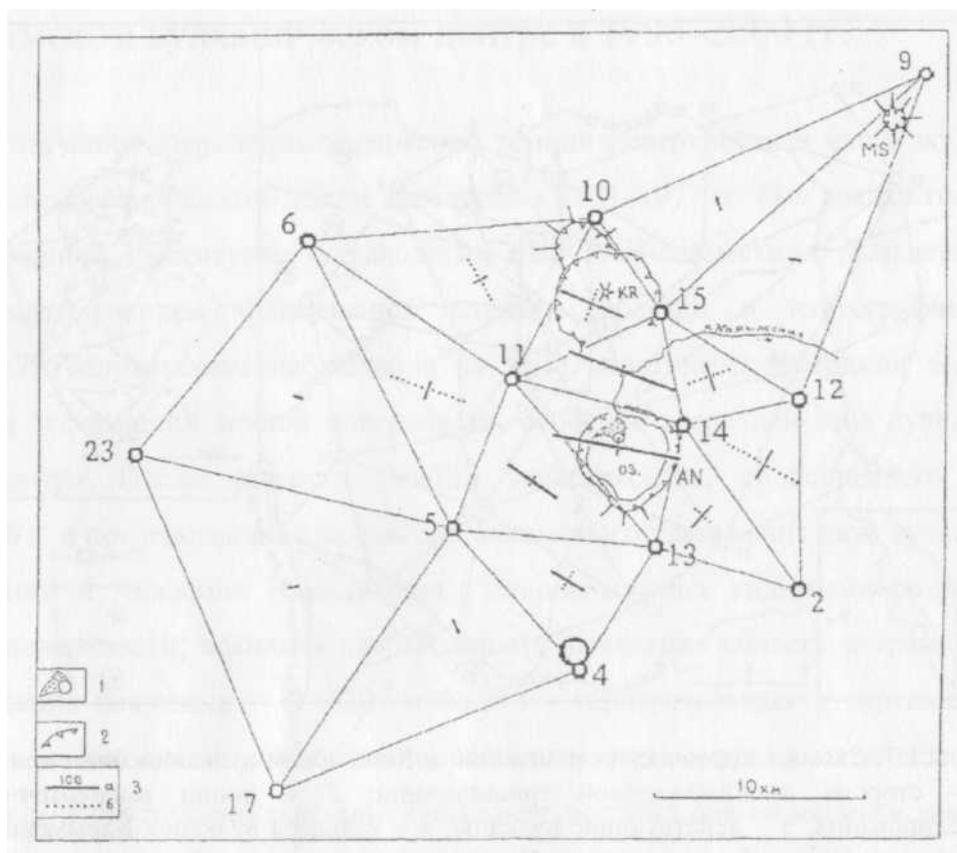


Рис. 2.1.8. Направления главных осей плоской деформации и их величины в Крымском вулканическом центре в период 1988-(1996-1999) гг. 1 - кратер подводного извержения в Кальдере Академии Наук и новый полуостров, образовавшийся при извержении; 2 - кальдера; 3 - направления главных осей деформации и их величины в ед. 10^{-6} : а - растяжение, б - сжатие. Большим кружком отмечен эпицентр землетрясения с магнитудой $M=7.0$. Вулканы: KR - Крымский, AN - Академии Наук, MS - Малый Семячик.

На рис. 2.1.9 ее примерное положение показано утолщенной изолинией.

По предварительным данным, горизонтальные деформации оказались несимметричными относительно как центра подводного извержения к кальдере вулкана Академии Наук, так и относительно кратера вулкана Крымский. Судя по форме равных дилатаций (см. рис. 2.1.9), источник, где возникают избыточные давления, вызывающие горизонтальные и вертикальные смещения точек земной поверхности, имеет сложную форму и вытянут по направлению северо-восток.

Расстояние от земной поверхности до центра такого источника может колебаться в пределах 7-22 км. Заметим, что возникающие горизонтальные деформации от избыточного давления в сферических, цилиндрических и линзообразных очагах примерно схожи.

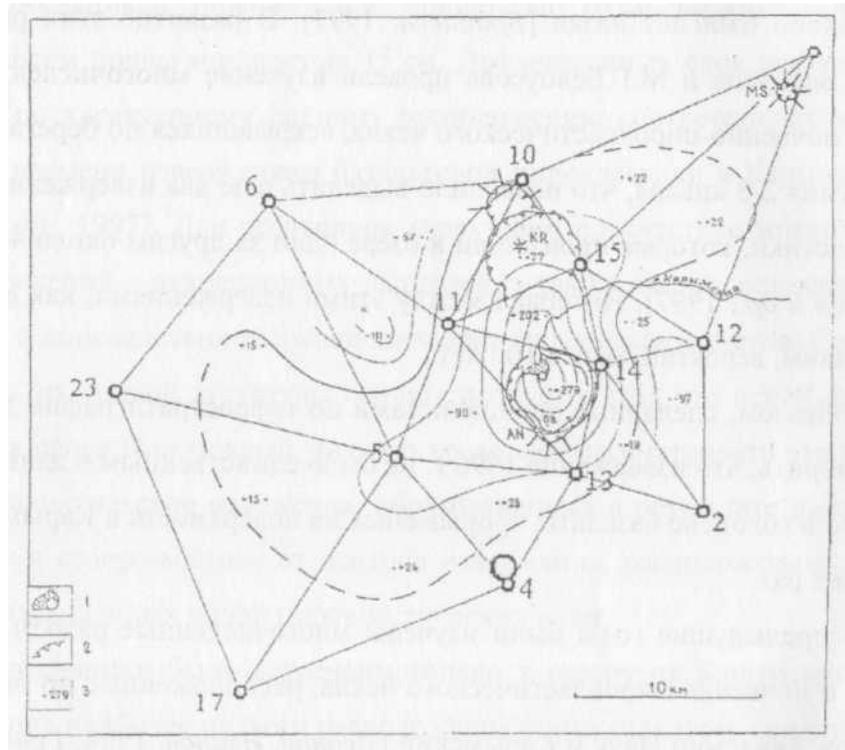


Рис. 2.1.9. Относительные изменения площадей плоских фигур (треугольников) в Карымском вулканическом центре в период 1988-(1996-1999) гг. 1, 2 - то же, что на рис. 2.1.8; 3 - дилатация в ед. 10^{-6} ; 4 - изолинии равных дилатаций.

2.1.5. Палеоизвержения базальтовой магмы в пределах кальдеры вулкана Академии Наук (Карымском озере)

Извержение, происшедшее 2-3 января 1996 г. в Карымском озере (в кальдере вулкана Академии Наук), необычно тем, что на поверхность были выброшены породы базальтового состава. Все вулканические постройки, сформировавшиеся в этом районе в среднем, верхнем плейстоцене и голоцене имеют более кислый состав лав и пирокластики - от андезито-базальтов до риолитов [Вулканологический..., 1980]. В связи с этим возник целый комплекс вопросов: происходили ли

подобные извержения в Карымском озере ранее? Как часто? Каковы были их последствия?

Сразу после извержения были пересмотрены результаты проведенных в этом районе ранее тефрохронологических исследований [Брайцева, 1997]. Был сделан вывод, что извержение базальтов в Карымском озере происходило и в середине голоцена, около 6500 лет назад [Брайцева, 1997]. В развитие этих работ летом 1996 г. А.Б.Белоусов и М.Г.Белоусова провели изучение многочисленных новых обнажений почвенно-пирокластического чехла, вскрывшихся по берегам озера после извержения 2-3 января, что позволило выделить еще два извержения базальтовой пироклаستيки, которые произошли в озере одно за другим около 4800 лет назад [Белоусов и др., 1997]. Интервал между этими извержениями, как отмечалось, был небольшим, вероятно, менее 100 лет.

Таким образом, сделанные специалистами по тефростратиграфии выводы позволили говорить, что извержение 1996 г. не было единственным в данном районе, и что только в голоцене базальты прорывались на поверхность в Карымском озере не менее трех раз.

Нами в предыдущие годы были изучены многочисленные разрезы пемзовых отложений и почвенно-пирокластического чехла, расположенные по бортам кальдер вулканов Академии Наук и Карымский [Леонов, Иванов, 1994; Гриб, 1997; Леонов, 1997]. Основываясь на результатах этих работ, а также проведенных в последние годы исследований, в настоящее время можно, с одной стороны, более подробно рассмотреть особенности извержений, происшедших в Карымском озере около 4800 лет назад, а с другой - оценить количество и частоту подобных извержений за последние 100 000 лет.

2.1.5.1. Особенности извержений, происшедших в Карымском озере около 4800 лет назад

Как уже отмечалось, около 4800 лет назад в Карымском озере, примерно в том же месте, где произошло извержение 2-3 января 1996 г., произошло два сближенных по времени извержения, в результате которых на поверхность были выброшены базальтовые шлаки [Белоусов и др., 1997]. В разрезах почвенно-пирокластического чехла на расстоянии от 2 до 4 км к северу и северо-востоку от предполагаемых центров извержений нами были встречены два характерных слоя

песчаников, содержащих аккреционные лапилли. Точки наблюдений (т.н.), где были встречены эти слои, показаны на рис. 2.1.10.

Наиболее полно разрез почвенно-пирокластического чехла был вскрыт в т.н. 158. Здесь на глубине около 4 м от поверхности и примерно в 2 м выше пемзовых туфов, связанных с Карымской кальдерой, залегают два слоя плотных зеленовато-серых песчаников: нижний слой, мощностью 10 см, верхний - 40 см. Они разделены слоем почвы мощностью 15 см. Два описанных слоя песчаников и по возрасту, и по характерному парному расположению соответствуют двум сближенным по времени извержениям базальтовой пирокластики в Карымском озере [Белоусов и др., 1997]. Для песчаников характерно присутствие многочисленных округлых стяжений - аккреционных лапиллей, а также пустот, оставшихся от захороненных и впоследствии разрушившихся веток деревьев и кустов. Сохранность следов веток, их тонкой структуры свидетельствует о том, что пепел при формировании этих слоев был мокрым. Все это позволяет рассматривать эти песчаники как фреатомагматические отложения, образовавшиеся в результате распространения к северу и северо-востоку от центров извержения, расположенных в Карымском озере, насыщенных водой пирокластических волн.

То, что песчаники были встречены только к северу от Карымского озера и только в районе наиболее низкого расположения борта кальдеры, свидетельствует, что пирокластические волны распространялись преимущественно в этом направлении через понижение в рельефе. Как видно на рис. 2.1.10, именно к северу от кальдеры сформированы обширные плато, полого погружающиеся к северу и северо-востоку. Без сомнения, одной из основных причин формирования плато была фреатомагматическая деятельность, происходившая в Карымском озере в голоцене.

Несогласное залегание песчаников на нижележащих отложениях было описано нами в т.н. 168 (см. рис. 2.1.10). Песчаники здесь облекают нижележащий рельеф и круто, под углом 38°, падают вниз по склону.

Другим следствием извержений, происшедших около 4800 лет назад в Карымском озере, было формирование лахара, распространившегося по долине р. Карымская [Белоусов и др., 1997].

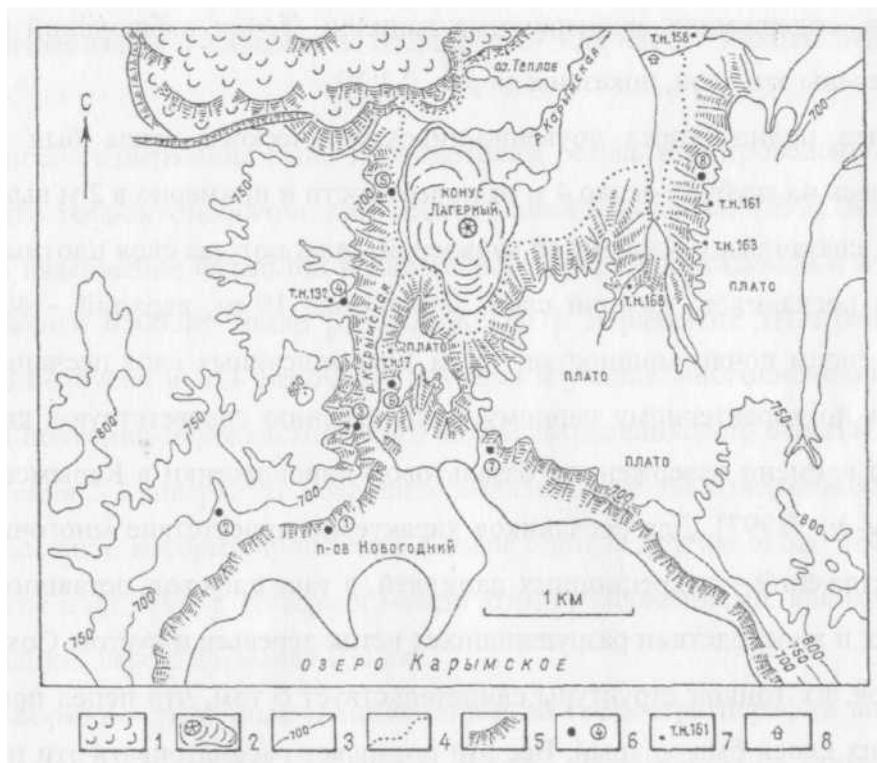


Рис. 2.1.10. Схема расположения изученных разрезов и точек наблюдения. 1 - лавовые потоки вулкана Карымский; 2 - конус Лагерный и его лавовые потоки; 3 - изолинии рельефа; 4 - границы долины Ключевой; 5 - обрывы, крутые склоны; 6 - места расположения и номера разрезов, приведенных на рис. 2.1.7; 7 - места расположения и номера точек наблюдения, где были встречены фреатомагматические отложения, связанные с извержениями, происшедшими в Карымском озере около 4800 лет назад; 8 - стационар Института вулканологии.

Проведенное нами дешифрирование крупномасштабных аэрофотоснимков на рассматриваемый район показало, что всю западную, приближенную к реке Карымской, часть лавовых потоков конуса Лагерный перекрывают отложения, которые были вынесены при крупном паводке со стороны Карымского озера. Поскольку возраст конуса и его потоков оценивается в 5000 лет [Брайцева, 1997], то лахар, перекрывший потоки, скорее всего, был связан именно с извержениями, происшедшими около 4800 лет назад.

Кроме описанных особенностей извержений, происшедших в Карымском озере 4800 лет назад, необходимо отметить связанное с ними разрывообразование. Свидетельства этого были обнаружены нами при раскопке участка, где 2-3 января 1996 года сформировался разрыв VIII [Извержения..., 1998]. Этот разрыв имел простирание 15-17°, характер взброса и амплитуду вертикальной подвижки 3-4 см (было поднято западное крыло). При раскопке обнаружилось, что по этому же

разрыву около 4-5 тыс. лет назад произошла значительно более крупная подвижка, которая также имела характер взброса (было поднято западное крыло), но амплитуда вертикального смещения составляла 92 см.

Сравнивая извержения, происшедшие 4800 лет назад и 2-3 января 1996 г. в Карымском озере, можно отметить, что хотя они имеют много общего (близкие центры извержений, катастрофический характер, формирование лахаров, прошедших по долине р. Карымская, однотипное разрывообразование), но последнее извержение было значительно меньше по масштабу и не сопровождалось формированием фреатомагматических отложений.

2.1.5.2. Оценка частоты извержений базальтовой магмы в районе Карымского озера в последние 100 000 лет

На рис. 2.1.11 приведены изученные нами разрезы, в которых были встречены слои шлаков базальтового состава или фреатомагматические отложения (маломощные слои переслаивающихся песчаников и гравелитов, содержащих аккреционные лапили). Последние отложения нами также рассматриваются как следствие извержений базальтов в Карымском озере, так как, с одной стороны, они часто встречаются совместно со шлаками, с другой – песчаники часто содержат включения шлаков и лав базальтового состава. Кратко опишем некоторые из этих разрезов.

В разрезе 2 слой черных шлаков (мощностью 1 м) встречен в толще слоистых озерных отложений, залегающих с наклоном 18° в сторону озера.

В разрезе 3, расположенном в истоках р. Карымской (здесь вскрыт один из наиболее полных разрезов отложений пироклаستيку, связанной с кальдерами вулканов Однобокий и Академии Наук), в основании встречен слой базальтовых шлаков (мощностью до 2 м). Кроме того, в этом разрезе среди пемзовых агломератовых туфов в пяти местах были встречены слои тонкослоистых песчаников (мощностью от 0.6 до 2 м) – предполагаемые фреатомагматические отложения.

В разрезе 4 слой псефитового шлакового туфа (мощностью 3 м) встречен в основании 20-метровой пачки белых агломератовых пемзовых туфов.

В разрезе 5 вскрыт разрез, аналогичный разрезу 4, но в верхней его части обнаружен еще один слой базальтовых шлаков. Мощность этих слоев базальтовых шлаков составляла 1.5-2 м. Отмечалось, что базальты в значительной степени за-

грязнены кислым материалом, который присутствовал в виде примазок, тонких прослоев, включений и кристаллических фрагментов.

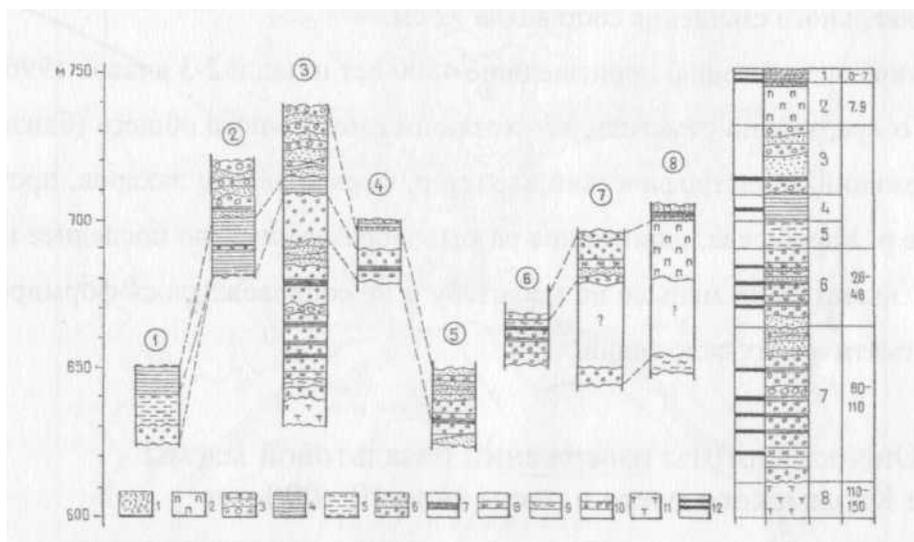


Рис. 2.1.11. Сопоставление разрезов и сводная колонка изученных отложений в районе Карымского озера.

1 - почвенно-пирокластический чехол, голоцен; 2 - пемзовые отложения, связанные с формированием кальдеры вулкана Карымский, ранний голоцен; 3 - тefра, взрывные отложения, связанные с кальдерой вулкана Академии Наук, поздний плейстоцен; 4 - озерные отложения древнего озера, заполнявшего кальдеру вулкана Академии Наук, поздний плейстоцен; 5 - агломератовые пемзовые туфы, вложенные в кальдеру вулкана Академии Наук, поздний плейстоцен; 6 - агломератовые пемзовые туфы, связанные с формированием кальдер вулканов Академии Наук и Однобокий, верхний плейстоцен; 7 - слои фреатомагматических отложений; 8 - слои шлаков базальтового состава; 9 - слои игнимбритов; 10 - слои брекчий; 11 - плотные гидротермально-измененные агломератовые и псефитовые туфы, средний-верхний плейстоцен; 12 - условное обозначение слоев шлаков базальтового состава и фреатомагматических отложений на сводной колонке. В правой части сводной колонки цифрами обозначены пачки (1-8) и возраст (тыс. лет) отложений, между которыми установлены стратиграфические и угловые несогласия. Возраст приведен по данным работ [Вулканологический..., 1980; Брайцева и др., 1997].

В разрезе 6, расположенном недалеко от истоков р. Карымской по правому борту, вскрыт сложный разрез белых пемзовых агломератовых туфов, среди которых встречены два прослоя (мощностью 1 и 0,2 м) песчаников - предполагаемых фреатомагматических отложений. Кроме того, в верхней части этого разреза был встречен слой плотных игнимбритов (мощностью 1 м).

В разрезе 7 слой черных шлаков (мощностью 3 м) встречен в средней части толщи агломератовых пемзовых туфов. Шлаки представлены порфиоровыми P1-cPx-O1- базальтами, близкими к базальтам извержения 1996 г.

В правой части рис. 2.1.11 приведена сводная колонка отложений, вскрытых в описанных разрезах. Выделено 8 пачек, между которыми установлены стратиграфические и угловые несогласия. Самая нижняя (8) пачка - это так называемые «дикие» туфы, подробное описание которых приведено в работе [Вулканологический..., 1980]. Залегающие выше отложения пачек 5-7 ранее не разделялись и рассматривались как единая толща «благородных» туфов [Вулканологический..., 1980]. Нами эта толща разделена на три пачки, из которых нижняя (пачка 7), как мы предполагаем, связана с кальдерой вулкана Однобокого, а верхние (пачки 5 и 6) - с кальдерой вулкана Академии Наук. Их возраст, соответственно, оценен в 80-110 и 28-48 тыс. лет [Вулканологический..., 1980].

Показанная в верхней части сводной колонки пачка 2 - это пемзовые туфы, связанные с Карымской кальдерой. Их возраст, по последним данным, 7.9 тыс. лет [Брайцева и др., 1997]. Самую верхнюю часть колонки занимает средневерхнеголоценовый почвенно-пирокластический чехол, строение которого подробно описано в работах [Брайцева, 1997; Белоусов и др., 1997; и др.].

С левой стороны от сводной колонки показаны слои шлаков и фреатомагматических отложений. Как видно из рисунка, за последние 100 000 лет произошло 15 извержений, сопровождавшихся выбросом базальтовых шлаков и формированием фреатомагматических отложений, т.е. в среднем одно извержение происходило примерно каждые 7 тыс. лет. Эта оценка, конечно, очень приблизительная. Работы по выявлению палеоизвержений базальтовой магмы в данном районе только начаты и, надо полагать, их развитие в дальнейшем может значительно уточнить эту цифру. Но ряд выводов вполне определенно можно сделать уже сейчас: базальты в районе Карымского озера извергались многократно, при этих извержениях не было излияний лавы, извержения были, по-видимому, небольшими и быстро заканчивались (сохранившиеся прослойки шлаков имеют очень небольшую мощность), многие извержения сопровождались фреатомагматической деятельностью, в результате которой на склонах кальдеры формировались прослойки фреатомагматических отложений.

В заключение отметим, что, хотя извержение, происшедшее 2-3 января 1996 г. в Карымском озере, было неожиданным для людей, но, как свидетельствуют полученные данные, оно было, по-видимому, одним из подобных событий, происшедших в верхнем плейстоцене и голоцене.

Сравнивая извержение 2-3 января 1996 г. с наиболее близкими по времени извержениями, происшедшими в Карымском озере около 4800 лет назад, надо отметить, что последнее извержение при всей грандиозности фреатомагматических взрывов было небольшим. В то же время имеющиеся данные позволяют предположить, что сценарий, по которому происходят такие извержения, каждый раз повторяется. По-видимому, при каждом прорыве базальтов происходит возобновление подвижек по издавна существующим здесь разломам, при этом повторяется и характер этих подвижек. Обычен вероятно, и сход больших лахаров по долине р. Карымской. При крупных извержениях обычно, и формирование пирокластических волн, которые перехлестывают через перемычку, имеющую между впадиной Карымского озера и расположенной севернее впадиной Карымской кальдеры, и распространяются на несколько километров в северном и северо-восточном направлениях. Надо также отметить, что извержения, подобные тому, которое произошло 2-3 января 1996 г., могут оставлять небольшие следы в разрезе, и при изучении разрезов древних отложений могут быть пропущены. Поэтому оценка частоты подобных извержений, сделанная выше, может быть сильно занижена.

2.1.6. Динамика биогидрохимических параметров экосистемы Карымского озера и подводного кратера Токарева

2.1.6.1. Термогидрохимический режим водной массы, состав свободных газов и содержание макро- и микроэлементов в донных осадках Карымского бассейна

Природный катаклизм - подводное фреатомагматическое извержение в Карымском озере 2-3 января 1996 г. - можно рассматривать как гигантский естественный эксперимент, в результате которого гидрохимическая система крупного озера в очень короткий срок была выведена из равновесия [*Karpov et al.*, 1996; *Вакин, Пилипенко*, 1998; *Извержения...*, 1998). Произошло резкое изменение химического состава большого объема воды.

Можно выделить следующие процессы, участвующие в формировании нового типа раствора:

1) растворение газообразной части продуктов извержения;

2) извлечение водно-растворимых комплексов из твердых продуктов извержения как в процессе извержения, так и после его завершения, так как извергнутое магматическое вещество в большинстве своем попало в озерный бассейн (а также промывается поверхностными водотоками в настоящее время);

3) смешение вод разных типов (попадающих в озеро из очагов наземной разгрузки гидротерм, атмосферных осадков и воды озера). Гипотетически можно предположить приток ювенильных вод из апикальной зоны внедрившегося расплава.

К сожалению, строгая количественная оценка величин всех обозначенных составляющих минерального состава воды озера практически невозможна. Е.А. Вакин и Г.Ф. Пилипенко [1998] попытались сделать некоторые количественные расчеты, исходя из концентраций элементов-индикаторов - Cl , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , определяющих химический тип воды и величины разгрузки различных типов вод, и пришли к выводу, что «большая часть гидрохимического стока из озера обеспечивается растворенными компонентами продуктов извержения и веществами, извлеченными из горных пород в ходе гипергенных процессов, инициированных извержением».

По результатам наших экспериментов, с подводными осадконакопителями в акваторию Карымского озера в 1999 г. попадало порядка 100 т пепла в сутки от извергнувшегося вулкана Карымский. В 1996 г. интенсивность эксплозивной деятельности этого вулкана была на порядок выше, к тому же в озеро с латеральным стоком привносилось вещество, вымываемого из базальтового материала молодого п-ова Новогоднего (и кратера Токарева).

Нами в составе окклюдированных газов вулканических бомб подводного извержения был обнаружен SO_2 . В составе минеральных продуктов постмагматической стадии деятельности в одной из взрывных воронок в северном секторе озера обнаружены самородная сера, сульфаты - гипс, кокимбит, вольтаит, галотрихит-пиккерингит, алуноген, эпсомит, а также свободная серная кислота [Вергасова и др., 1998].

По данным анализа водной вытяжки из пробы пеплов андезитодацитового состава, отобранной 3 января 1996 г., в ней содержалось (мг/л): H^+ - 0.42, Na^+ - 133.4, K^+ - 23.5, Ca^{2+} - 872.0, Mg^{2+} - 54.4, $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$ - 24.0, СГ - 163.5, SO_4^{2-} - 2643.0, $\text{pH} = 3.07$. В воднорастворимом комплексе пеплов преобладают сульфат-ион, а также кальций, натрий, магний. Естественно, раствор имел кислую реакцию, причем очень близкую к той, которая наблюдалась в озере сразу после подводного извержения 1996 г.

По данным режимных наблюдений, солевой состав воды озера с 1996 г. качественно не изменился (табл. 2.1.1), но заметно понизились общая минерализация, содержание Са и SO_4^{2-} в поверхностном слое воды как в кратере вулкана Токарева, так и в основной акватории озера (рис. 2.1.12). Очень медленно повышается рН воды. В вертикальном профиле водной толщи озера наблюдается еще более четкая картина изменений.

Из рис. 2.1.13, 2.1.14, объединивших материалы, опробованные в 1996 г. и 2000 г., видно, что к 2000 г. довольно резко упало содержание в озере таких компонентов, как Na, Ca, Mg. Содержание сульфат иона также заметно снизилось в акватории озера, но в кратере вулкана Токарева остается близким к уровню 1996 г. Содержание хлора в 2000 г., наоборот, увеличилось, особенно в кратере.

Кроме того, обнаружилось, что если в 1996 г. на глубине 30 м отмечены прямо противоположные значения содержания сульфат-иона в воде кратера вулкана Токарева (пониженные значения) и в акватории озера (резко повышенные значения), то в 2000 г. в обеих зонах наблюдаются согласованные вариации.

Определенная стратификация отмечена в распределении содержания ряда элементов. Так, в кратере вулкана Токарева к интервалам глубин 10-300 м приурочено увеличение содержания в воде K, Ca и стабильно высокое содержание Cl, Mg. Общая минерализация также имеет тенденцию к увеличению именно на глубине 30 м. Наконец, кривая температуры в центре кратера вулкана Токарева в 2000 г. также имеет характерный профиль (рис. 2.1.15). Здесь слой воды с более-менее постоянной температурой (эпилимнион) прослеживается до глубины 20 м. Затем, до глубины порядка 40 м температура резко снижается (металимнион) и далее до дна кратера (глубина 56 м) снова идет слой постоянной температуры (гиполимнион).

Таблица 2.1.1. Химический состав воды оз. Карымское, мг/л (результаты режимных наблюдений)

№ п/п	Номер	Станция	Глубина, м	Дата отбора	t, °C	pH	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO ²⁻ ₄	HCO ³⁻ ₃	H ₄ SiO ₄ раств.	H ₄ SiO ₄ кол.	H ₃ BO ₃	Растворённый O ₂ , мг/л	Σ	Примечание
1	*)	-	0.0	19.06.84	1.0	7.0	10.4	1.6	1.6	0.5	8.5	3.80	35.1	48.0	0.0	0.0	н.о.	109.6	Отбор Г.Ф. Пилипенко [6]
2	22 ^а -01/96	2	0.0	22.01.96	19.0	3.2	75.0	7.3	66.0	14.4	35.5	379.0	0.0	325.0	0.0	0.9	н.о.	921.7	Акватория, центр
3	22 ^а -01/96	3	0.0	22.01.96	20	3.7	74.3	7.6	64.0	17.2	57.8	317.0	0.0	189.0	0.0	0.6	н.о.	727.5	Кратер
4	21 ^а -07/97	2	0.0	21.07.97	14	3.4	62.0	7.0	55.0	7.7	40.0	300.0	0.0	146.4	23.5	2.7	н.о.	644.3	Акватория, центр
5	21 ^а -07/97	3	0.0	21.07.97	16.3	4.2	63.5	6.8	50.1	9.7	41.2	255.0	0.0	132.1	21.0	н.о.	н.о.	579.4	Кратер
6	3 ^а -08/98	2	0.0	03.08.98	14.5	3.7	74.9	9.1	46.1	14.6	41.9	249.8	0.0	157.0	н.о.	н.о.	н.о.	593.4	Акватория, центр
7	3 ^а -08/98	3	0.0	03.08.98	15.5	3.7	65.0	8.5	42.0	9.7	46.7	249.6	0.0	139.0	н.о.	15.0	н.о.	575.5	Кратер
8	5 ^а -09/99	2	0.0	05.09.99	10.8	4.0	64.8	7.1	40.1	9.7	44.0	220.9	0.0	135.0	30.0	<0.5	н.о.	552.1	Акватория, центр
9	5 ^а -09/99	3	0.0	05.09.99	11.2	4.0	64.0	7.7	40.1	10.9	46.2	220.9	0.0	138.0	23.6	<0.5	н.о.	552.3	Кратер
10	81-00-ИВ	3	0	30.06.00	13.88	4.30	66.1	7.07	36.07	10.21	44.68	201.73	4.27	129	н.о.	6.12	11.8	517.05	Кратер
11	80-00-ИВ	3	10	30.06.00	10.44	4.28	68.5	7.80	36.07	7.78	43.97	201.73	2.44	133	н.о.	5.44	13.2	519.93	Кратер.
12	79-00-ИВ	3	20	30.06.00	4.98	4.16	68.5	7.30	40.88	7.78	48.22	211.33	2.44	143	н.о.	3.40	14.9	547.75	Кратер
13	78-00-ИВ	3	30	30.06.00	4.30	4.16	74.6	7.80	40.00	10.2	46.1	230.5	2.44	145	н.о.	6.12	12.2	574.96	Кратер
14	77-00-ИВ	3	40	30.06.00	4.24	4.2	72.0	7.80	39.27	9.73	48.22	230.54	3.66	147	н.о.	6.80	н.о.	565.02	Кратер
15	76-00-ИВ	3	55	30.06.00	4.17	4.16	71.0	7.70	40.08	10.21	48.22	211.33	2.44	130	н.о.	8.16	н.о.	529.14	Кратер
16	88-00-ИВ	7	6	30.06.00	11.8	4.79	69.0	7.40	36.47	10.70	46.8	201.7	7.32	134	н.о.	8.16	н.о.	521.55	Выходы газов
17	74-00-ИВ	7	6	30.06.00	11.6	4.4	67.6	7.15	36.07	10.21	44.68	201.73	3.66	126	н.о.	4.08	12.7	513.88	Желоб
18	67-00-ИВ	2	0	29.06.00	14.12	4.28	64.9	6.80	35.27	10.21	41.82	211.33	2.44	123	н.о.	5.44	н.о.	501.21	Акватория, центр
19	66-00-ИВ	2	5	29.06.00	11.40	4.23	62.7	6.60	35.27	9.24	41.13	192.12	3.66	145	н.о.	5.44	н.о.	501.16	Акватория, центр
20	65-00-ИВ	2	10	29.06.00	7.41	4.15	63.9	6.80	38.48	8.76	45.55	201.76	1.22	149	н.о.	2.72	н.о.	518.19	Акватория, центр
21	64-00-ИВ	2	20	29.06.00	3.42	4.02	69.0	7.40	38.48	11.19	46.81	220.94	-	159	н.о.	<1.36	н.о.	554.18	Акватория, центр
22	63-00-ИВ	2	50	29.06.00	4.30	4.08	69.3	7.30	40.08	10.70	46.10	220.94	1.22	162	н.о.	2.72	н.о.	560.36	Акватория, центр

Примечание. Пробы отобраны Г.А. Карповым, Е.Г. Лупкиной. Аналитики: И.Ф. Тимофеева, В.К. Марынова, А. Смышляева (ЦХЛ ИВ ДВО РАН). Фоновое содержание растворённого кислорода, определенное по его содержанию в воде пресного холодного ручья Новолагерного составляет 11.25 мг/л (определено 7.08.98 г.); н.о. - не определялось.

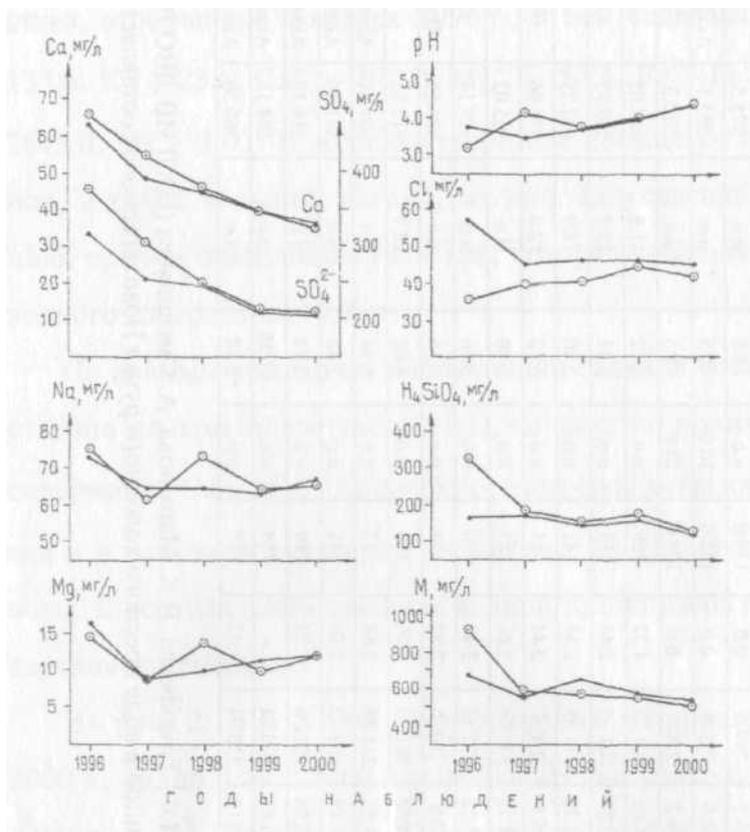
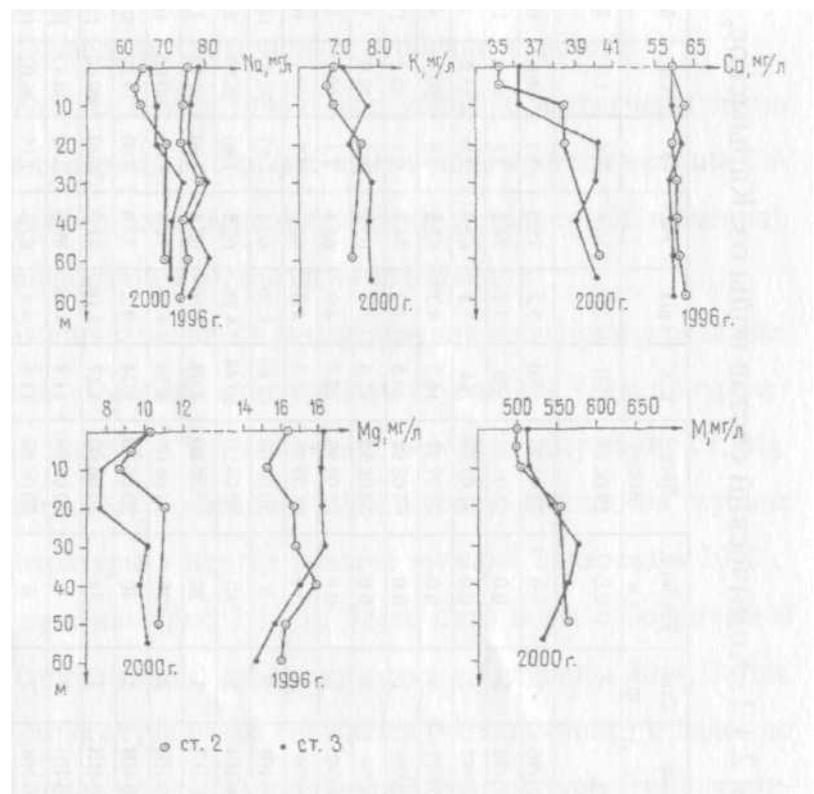


Рис. 2.1.12. Вариации содержаний Ca, Na, Mg, SO₄²⁻, H₄SiO₄, общей минерализации (M) и pH в поверхностных водах акватории (кружки) и кратера вулкана Токарева (точки) Карымского озера за период наблюдений 1996-2000 гг.

Рис. 2.1.13. а). Вариации содержания Na, K, Ca, Mg, общей минерализации (M) и в вертикальном профиле акватории (кружки) и в кратере вулкана Токарева (точки) Карымского озера в 1996 г. и 2000 г.



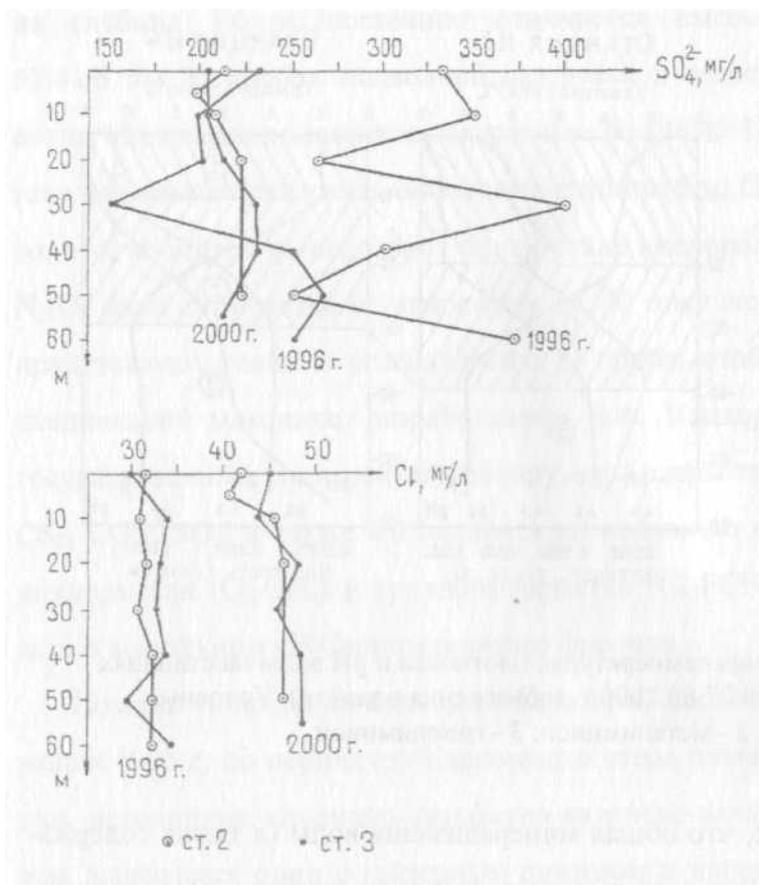


Рис. 2.1.13.
 б). Вариации содержания SO_4^{2-} и СГ в вертикальном профиле акватории (кружки) и в кратере вулкана Токарева (точки) Карымского озера в 1996 г. и 2000 г.

Эта картина характерна для нормальных пресноводных глубоких озерных водоемов. Хорошее согласование с распределением температуры по глубине имеет и плотность воды. Причем в разных секторах оз. Карымского как по акватории (станции 2, 4), так и в кратере вулкана Токарева (станция 3) наблюдается хорошее соответствие температуры и плотности воды, что естественно, хотя глубины эпилимниона и металимниона колеблется в пределах 8-10 м.

Следует обратить также внимание на то обстоятельство, что в 1996 г. в кратере вулкана Токарева эпилимнион совершенно не выражен. Более того, практически с поверхности (точнее с глубины 5 м) шло монотонное уменьшение температуры с глубиной. Это свидетельствует об отсутствии стратификации воды в кратере в 1996 г.

В открытой акватории озера в 1996 г. выделялись все три слоя воды, хотя в более ранний период наблюдения (30.08.1996 г.) эпилимнион выражен слабо. Практически согласованно с ходом температуры ведет себя и величина рН воды, но в кратере вулкана Токарева (станция 3) это выглядит более четко (рис. 2.1.15).

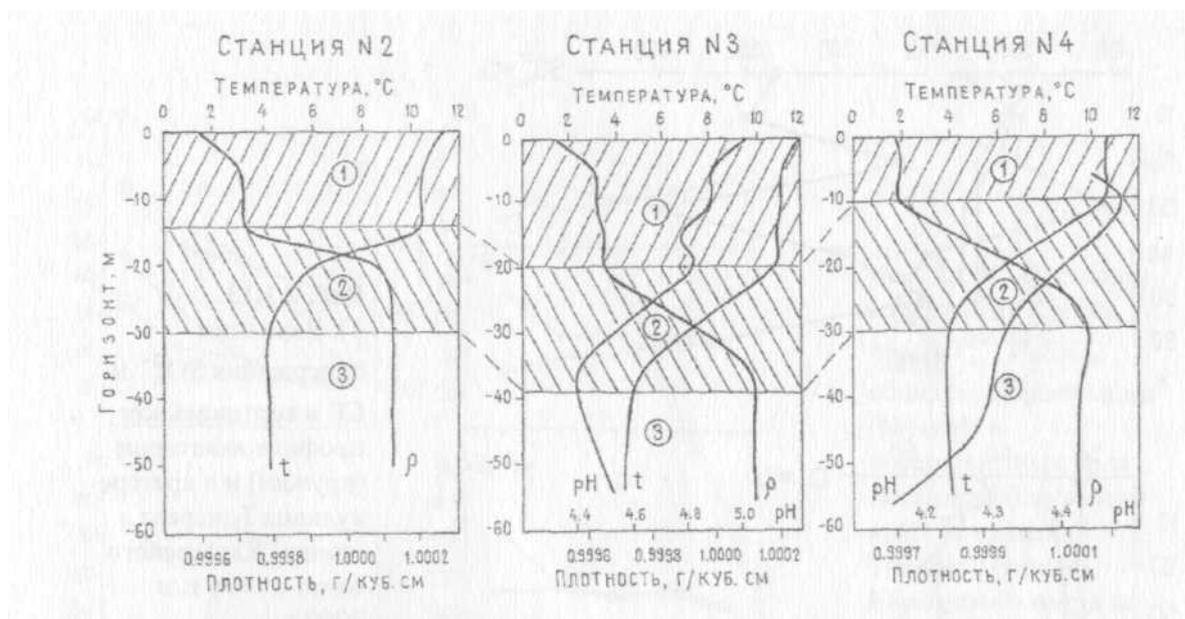


Рис. 2.1.15. Профили изменения температуры, плотности и рН воды на станциях №№ 2-4 в период наблюдений 27.09.2000 г. (объяснения в тексте). Условные обозначения: 1- эпилимнион; 2- металимнион; 3- гиполимнион.

Если принять во внимание, что общая минерализация воды (а также содержание Na, K, Ca, Mg) в кратере Токарева имеет максимум на глубине 30 м, а максимальная плотность (на фоне постоянной температуры) отмечается с глубины около 40 м, а также учесть, что рН воды резко возрастает с этой же глубины к поверхности озера, то логично будет предположить, что в интервале глубин 30-40 м имеет место приток более высокоминерализованной термальной воды.

Действительно, при водолазном обследовании дна озера была обнаружена подводная разгрузка. Многочисленные, прокольного типа, выходы термальной воды и газов с температурой 40-52 °С зафиксированы как в северном, так и в южном секторах кратера вулкана Токарева. Характерно, что эти выходы приурочены к четко выраженному на дне тектоническому желобу шириной несколько десятков метров и высотой бортов 0.3-0.5 м, имеющему субмеридиональное простираение. Области подводной разгрузки наиболее заметны на глубине 5.5-6.0 м по выходам газов и развитию мелких холмиков, образованных колониями водорослей светло-зеленого цвета. Газы скапливаются под этими своеобразными колпаками.

В составе свободных газов, отобранных нами в районе Карымского озера, основное место занимают N₂ (36.7-96.5 об. %), CO₂ (0.5-29.0 об. %), присутствуют метан и его гомологи. В источнике Бурлящем, выходящем в русле р. Карымской,

на глубине 1.6 м постоянно отмечается высокое содержание метана (до 51.4 об. %). В пробах подводной разгрузки в озере обычно высоко содержание азота. Максимально высокое содержание N_2 (96.45 %) определено как раз в пробе газа под альгологическим «матом» на глубине 6 м. Следует обратить внимание на то, что, несмотря на некоторое присутствие кислорода в составе газов, отношение N_2O_2 явно отличается от атмосферного. К тому же практически во всех пробах присутствуют гелий и углеводороды. В пробе, отобранной Д.Ю. Кузьминым по специальной методике, разработанной В.А. Исидоровым (Санкт-Петербургский государственный университет), обнаружены следы таких вулканических газов, как CS_2 , COS , SO_2 , а также считавшиеся до недавнего времени чисто техногенными дихлорметан (Cl_2CH_4) и трихлорфторметан (Cl_3FCH_4), что может свидетельствовать о возможном глубинном генезисе фреонов.

Помимо подводных выходов гидротерм, после фреатомагматического извержения 1996 г. по периметру Карымского озера появилось 7 новых групп термальных источников хлоридно-сульфатно-натриево-кальциевого состава, среди которых выделяется один с гейзерным режимом и хлоридно-натриевым составом воды. Химический состав воды, общая минерализация, рН и температура источников сильно варьируют. Природа гидротерм этих источников изучена еще недостаточно.

Продукты подводного извержения - в основном шлаки, пески, бомбы базальтового состава и андезитодацитовый пепел Карымского вулкана, слагающие донные осадки в Карымском озере - имеют в своем составе биологически активные компоненты, например К, Na, Fe, Ca, P, Си. Они находятся в природе в устойчивом связанном состоянии и вовлекаются в биогенные циклы вследствие гипергенных процессов разрушения пород. Указанные элементы относятся к числу необходимых для развития альгофлоры. Вот почему рядом специалистов высказывается мнение, что попадание вулканических пеплов в нерестовые озерные бассейны приводит к их своеобразной фертилизации и повышению биопродуктивности. В то же время в некоторых осадках наблюдаются повышенные содержания ртути, а также высокие содержания ванадия, кобальта, никеля и серы. Особенно отличаются повышенным содержанием ртути песчано-илистые осадки. Максимально высокое содержание ртути ($1750 \cdot 10^{-7}$ %) отмечено в пене охристого цвета силикатно-

железистого состава, которая обильно развивалась в воде озера в 1997 и 1998 гг. и в настоящее время осела на дне. В этой же пене зафиксировано аномально высокое содержание меди, ванадия, а также серы в сульфитной форме. Выявлена четкая закономерность - повышенные содержания ртути (на 2-2.5 порядка выше фона) приурочены к приразломным зонам.

2.1.7. Воздействие извержений и поствулканических процессов на окружающую среду

Гидрохимические последствия подводного извержения в кальдере вулкана Академии Наук оказали отрицательное воздействие на фито- и зооценозы бассейна Карымского озера [Вергасова и др., 1998; Извержения..., 1998]. Судя по результатам посезонного комплексного биогидрохимического мониторинга 1998-2000 гг., ингибирующее действие продуктов фреатоагматического взрыва 1996 г. и очагов разгрузки гидротерм на биологическую компоненту озерной экосистемы продолжается. Водная толща озерной акватории и в весенне-осенние сезоны 1998— 2000 гг. не содержала автохтонных фито- и зооценозов, характерных для «предка-тастрофического» времени. В летне-осенние сезоны 1997-1998 гг. на фоне повышенного содержания железа в воде, главным образом в литоральной зоне озера, в пределах фотического слоя (при слабо кислых значениях рН) доминировали зеленые и бесцветные жгутиковые формы *Chlorophyta*, а также присутствовали немногочисленные представители *Euglenophyta* (*Euglena cf. tripteris* (Duj) Klebs, *Euglena sp. sp.*, *Lepocinclis sp.*). Это явление в Карымском озере и в других озерах Камчатки ранее не отмечалось. Небольшая, но положительная динамика в восстановлении диатомовой составляющей фитопланктона впервые наблюдалась в июне 2000 г.: в тотальной пробе, взятой в 60 м к северу от восточной группы термальных источников Академии Наук, обнаружены немногочисленные цепочки *Aulacosira cf. distans* (Ehr.) Simon. Некоторая положительная динамика в развитии альго-и зооценозов отмечается с весеннего сезона 1999 г. в литоральной зоне северного сектора озера. По всей вероятности, она имела место и в 1998 г., о чем свидетельствует обнаружение в глубоководных осадках кратера вулкана Токарева (летние сборы 1998-2000 гг.) заметной численности (первые тысячи экземпляров в 1 г ила)

представителей пеннатных диатомовых *Pinnularia* и *Nitzschia* (с нормальным физиологическим состоянием клеток), характерных для мелководья и не свойственных глубоководным группировкам водорослей. Доминирующее положение в локально развивавшихся в эпипелоне и особенно эпилитоне в весенне-летние сезоны 1999-2000 гг. занимали нитчатые формы зеленых водорослей (*Chlorophyta*) - *Ulothrix tenuissima* и *Ulothrix sp.* с сопутствующими *Microspora tumidula Hazen* и *Enteromorpha intestinalis (L) Link.*; их суммарная биомасса при pH = 5-6 (вероятно, за счет гидротерм подводной разгрузки) в пересчете на органический углерод достигала 0.15 кг/м³. Ранее эти водоросли в озере не отмечались. В эпипелоне прибрежной зоны по большей части периметра озера совместно с пеннатными диатомовыми присутствовали немногочисленные одноклеточные представители *Chlorophyta*, систематический состав которых, так же как и образующих альгобактериальные «маты» *Cyanophyta*, продолжающих формироваться в северном, северо-восточном и южном секторах озера, требует отдельной публикации.

С сентября 1997 г. впервые отмечается развитие представителей низших беспозвоночных - коловраток в мелких водоемах пляжной зоны юго-восточного сектора озера, близ устья руч. Карымского (аналитик КамчатНИРО Т.В. Бонк [1998]). В 1999-2000 гг. литоральные зооценозы обнаружены в северном и северо-восточном секторах озера (в истоках р. Карымской, в верхней части руч. Горячий на п-ове Новогодний, в пляжной зоне у термальных источников Медвежьи и на мелководье западного обрамления подводного кратера вулкана Токарева) в локальных биотопах с субнейтральными и слабокислыми значениями pH и температурой 9-22⁰ С. Численность представителей бентофауны приводится в табл. 2.1.2.

Названные выше зооценозы в Карымском озере обнаружены впервые. В целом имеющиеся на 2000 г. данные по динамике озерных биоценозов свидетельствуют о том, что они не достигли стадии «предкатастрофического» периода: основные первичные звенья, существовавшей до 1996 г. трофической цепи, не восстановились вследствие воздействия продолжающихся неблагоприятных абиотических процессов в озере.

Подтверждением негативных воздействий физико-химических процессов, происходящих в Карымском озере, на природную среду и, в частности, некоторых представителей флоры и фауны прибрежной зоны Тихого океана является повы-

шенное содержание тяжелых металлов в воде (Zn - 0.1-1.56 мг/кг, Cd - 0.0017-0.040 мг/кг), донных осадках (Си - 0,004-0.039%, Hg - 47-1750 10^{-7} %), в таллуме бурой водоросли *Alaria fistulosa* Post, et Rupr. (порядок *Laminariales*), панцире краба камчатского (*Paralihodes camtshatica*) (Cu - 53 мг/кг), позвоночнике гольца (*Savilinus malma?*) (Zn - 91.0, Си - 6.7, Cd - 0.02 мг/кг) и колюшке трехиглой (*Gasterosteus aculeatus* Linne) (Zn - 78.0, Си - 3.5, Cd - 0.014 мг/кг); июльский сбор материала Г.А. Карпова.

Таблица 2.1.2. Представители бентофауны и их численность в северном секторе Карымского озера в 2000 г. (экз/м)

Организмы	26 сентября		27 сентября		
	Западный берег кратера вулкана Токарева, мелководье	Исток р. Карымской, правый берег, мелководье	Исток р. Карымской у уреза воды	П-ов Новогодний, исток руч. Горячего, мелкая лужа	П-ов Новогодний, исток руч. Горячего, мелкая лужа
Vermes					
Oligohaeta	242	2958	175	25	-
цисты	-	8	-	-	-
Nematoda	-	8	-	-	-
Crustacea					
Cyclops	-	125	-	-	67
Harpacticoida	-	-	8	-	-
Ostracoda	-	-	-	25	8
Insecta					
Chironomidae					
larvae	300	183	25	1000	-
pupae	8	-	-	-	-
Chaoboridae					
pupae	-	-	-	8	-
Collembola	8				
Coleoptera					
larvae	-	25	8	-	-
imago	-	8	-	-	-
Insecta larvae	-	-	-	758	-
Кладки яиц насекомых	-	-	-	-	8
Температура воды	12.2 °С	14.1 °С	9.6 °С	15.2 °С	22 °С
Грунт	ил	песок	песок	ил, песок	ил, песок, водоросли
pH	4.82	-	4.96	8.65	5.82

Примечание. « - » - не обнаружено. Определение Л.П. Введенской.

Из полученных данных следует, что содержание Си, Zn, As, Cd и Hg в алярии и названных представителях фауны значительно превышало их фоновое содержание в стоке озерной и океанической водах.

В заключение следует остановиться на некоторых особенностях изучаемого извержения.

1. В целом извержение вулкана Карымский в 1998-2000 гг. характеризовалось стромболианским типом эксплозивной и эксплозивно-эффузивной активности. Временами оно приобретало черты извержения пелейского типа. В 1998 г. и в первой половине 1999 г. оно имело непрерывный характер. Затем в июле 1999 г. появились первые паузы полной тишины, которые начали чередоваться с резкими короткими всплесками эруптивной активности. Извержение приобрело импульсный характер, который сохранялся до конца 2000 г.

2. В ходе эруптивного процесса вулкан Карымский несколько раз переходил в состояние, когда на склоны изливались пирокластические потоки. Они с большой скоростью скатывались вниз и временами достигали борта кальдеры. Резкая активизация вулкана и отсутствие надежных предвестников готовящейся смены типа извержения делают такие всплески в ходе извержения крайне опасными.

3. В течение описываемого периода извержения на склоны вулкана излилось три порции лавовых потоков. Объем эффузивного материала, поступивший на поверхность в период с июня 1998 г. по сентябрь 2000 г., по данным аэрофотограмметрических исследований, составил 0.0119 км³, а за весь пятилетний период извержения объем лавы достиг 0.0229 км³.

4. Эксплозивно-эффузивное извержение вершинного кратера вулкана Карымский характеризуется теми же особенностями, которые отмечались в эруптивной деятельности этого вулкана в XX столетии: стромболианский тип извержения, длительный период проявления эруптивной активности, довольно равномерное поступление сравнительно небольшого количества пепла и изливание вязких лавовых потоков.

5. В процессе терминального извержения на поверхность в виде пепла, бомб и лавы поступали породы достаточно постоянного состава - черные плотные известково-щелочные андезиты, характерные для современной эруптивной деятельности вулкана Карымский.

Однако следует отметить, что несколько раз в течение пяти лет в отложениях тефры были отмечены тонкие прослой белого пемзовидного пепла.

6. Первые признаки готовящегося извержения вулкана Карымский были обнаружены в сентябре 1993 г. - более чем за два года до начала извержения. Примерно за 7 мес до начала извержения в марте 1995 г. в районе кальдервулканов Карымский и Академии Наук начался рой вулканических землетрясений, на основании развития которого в апреле 1995 г.

Общим советом Института вулканологии ДВО РАН и КОМСП ГС РАН был выдан первый официальный прогноз извержения вулкана Карымский. Непрерывный контроль состояния вулкана сейсмической сетью КОМСП ГС РАН, выданные прогнозы, быстрая реакция службы МЧС по Камчатской области и директора ИВ ДВО РАН позволили вулканологам наблюдать редкое и кратковременное природное явление - подводное извержение в Карымском озере, начальную фазу извержения вулкана Карымский и способствовали успешному изучению извержения с самого его начала.

Следует отметить что, несмотря на успех, указанные прогнозы не предсказывали, что почти одновременно с извержением вулкана Карымский произойдет еще два явления: землетрясение с магнитудой $M \sim 7$, внедрение базальтовой магмы по новой дайке и подводное извержение в Карымском озере.

7. Несомненно, сильнейшее неглубокое землетрясение ($M \sim 7$) в Карымском вулканическом центре 1 января 1996 г., начало извержения вулкана Карымский и подводного извержения в кальдере вулкана Академии наук 1-2 января 1996 г. образуют цепь связанных между собой явлений.

Землетрясения, предвсказывавшие и наследующие землетрясение с $M \sim 7$ в Карымском вулканическом центре охватили большую территорию размером примерно 40×17 км на глубине до 65 км. Они продолжаются до настоящего времени. Вероятно, многие из этих событий были связаны с внедрением базальтовой магмы по дайке, с процессами релаксации напряжения после ее внедрения и с извержением вулкана Карымский. Одна из задач будущих исследований - значительное уточнение полученных определений координат землетрясений, которое необходимо для дальнейшего изучения механизма извержения и связанных с ним процессов.

8. По неполным данным измерений горизонтальных деформаций земной поверхности, в Карымском вулканическом центре под вулканом Карымский и кальдерой вулкана Академии Наук существует, по-видимому, большой коровый магматический очаг, который вытянут в северо-восточном направлении. Форма его может быть очень сложной.

9. Геодезические измерения, выполненные в 1996-2000 г., показали, что извержение вулкана Карымский в 1996-2000 гг. происходило в условиях растяжения и опускания земной поверхности в окрестностях конуса вулкан и его кальдеры. Растяжение на участке размером 3x5 км, расположенном в юго-восточной стороне от конуса вулкана и включающего выходы гидротермальных горячих источников, происходило со скоростью до 1×10^{-5} D в год. Реперы, удаленные от кратера на 1.5-2.0 км опускались со скоростью 5-10 мм в год.

10. Палеовулканологические исследования показали, что за последние 100 000 лет в районе кальдеры вулкана Академии Наук и в южном секторе вулкана Карымский в разных местах произошло не менее 15 отдельных базальтовых извержений, в среднем одно извержение каждые 7 тыс. лет.

Сопоставление масштабов извержения 2-3 января 1996 г. с близкими по времени эруптивными событиями в Карымском озере около 4 800 лет назад показало, что первое может быть отнесено к обычному проявлению такой моногенной базальтовой деятельности в исследованном районе.

По-видимому, при каждом прорыве базальтов происходит возобновление подвижек по издавна существующим здесь разломам, при этом повторяется характер этих подвижек. Обычен и сход больших лахаров по долине р. Карымской. Следы извержений, подобных произошедшему 2-3 января 1996 г., при изучении разрезов древних отложений могут быть пропущены, поэтому сделанная оценка частоты подобных извержений может быть занижена.

11. Карымский вулканический центр является одной из интереснейших геологических структур Камчатки. Проведенные исследования показали, что здесь в настоящее время с большой динамичностью протекают процессы формирования новейших структур, вулканогенных и осадочных образований, химического состава водоемов. Очень быстро меняется морфология местности, возникают новые источники, даже реки, изменяется газовый и гидрохимический режим. Влияние

этих процессов на водную флору и фауну пока еще слабо изучено. Биологическая катастрофа в Карымском озере показала масштабы процессов инверсии физико-химических параметров.

Очень крупный пресноводный водоем, имеющий народнохозяйственное значение, в течение нескольких часов стал солоноватым и безжизненным. За пять лет, прошедших после извержения, рН воды поднялся лишь на 1.0 (с 3.2 до 4.2). Изменился геотермический режим на большой площади. Высокореакционные воды Карымского озера по руслу р. Карымской докатились (вместе с большой массой взвеси) до побережья Кроноцкого залива Тихого океана. Окружающая среда приняла на себя несколько сильнейших ударов - тепловой, химический, газовый, грязевой, динамический. Последствия только одного воздействия - динамического от волн цунами на озере Карымском - порядка 5000 м³ мертвой древесины на восточном обрамлении озера, разрушенные геодезические реперы, размытые террасы и т.п.

Проведенные нами исследования показали увеличение в озерных и речных отложениях ряда тяжелых металлов. Особенное внимание следует обратить на содержание ртути, мышьяка, кадмия и лития. Необходимо дальнейшее исследование геохимии этих элементов на площади Карымского бассейна, так как эмиссия глубинного вещества продолжается. По ограниченным пока данным получается, что основное влияние на уровень содержания ртути (и, возможно, кадмия) в донных отложениях озера оказывают не продукты извержения, а разломная тектоника и степень ее активности. Еще не ясны физико-химические параметры выявленного нами потока газо-гидротерм в подводной зоне разгрузки, направление движения гидротерм. Не совсем ясен механизм подкисления воды Карымского озера. Необходимы изотопные и радиологические исследования. Для более надежного прогнозирования будущих экстремальных событий необходимо бурение дна озера со льда (в зимнее время) на глубину хотя бы 50 м. Для прогноза динамики восстановления среды бассейна озера необходимо продолжение режимных (посезонных) наблюдений за состоянием фитоценозов, зообентоса и ихтиофауны.

Необходимо также дальнейшее слежение за состоянием вулкана Карымский, изучение деформаций земной поверхности, сейсмических явлений, продуктов извержений, всего многообразия интенсивных поствулканических процессов.