

УДК 551.24+528.2/3

## ДЕФОРМАЦИИ, СВЯЗАННЫЕ С СИЛЬНЫМ ( $M = 6.9$ ) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕМ, ПРОРЫВОМ МАГМ И ИЗВЕРЖЕНИЯМИ В КАРЫМСКОМ ВУЛКАНИЧЕСКОМ ЦЕНТРЕ В 1996–2005 гг.

© 2008 г. М. А. Магуськин<sup>1</sup>, С. А. Федотов<sup>1</sup>, В. Е. Левин<sup>2</sup>, В. Ф. Бахтиаров<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

<sup>2</sup>Камчатский филиал Геофизической службы

РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

Поступила в редакцию 25.12.2007 г.

С целью изучения деформационных процессов во всем Карымском вулканическом центре и около находящегося в нем действующего вулкана Карымский (Камчатка) в 1971–1988 гг. была создана сеть взаимосвязанных геодезических пунктов. В результате многократных повторных измерений в этой сети получены количественные характеристики деформационных процессов, связанных со следующими явлениями: извержение вулкана Карымский в периоды 1976–1982 гг., 01.01.1996–2005 гг. (извержение его продолжается по настоящее время, февраль 2008 г.); прорыв 02.01.1996 г. базальтов на дне Карымского озера в кальдере вулкана Академии Наук, считавшегося угасшим, и последовавшее за ним фреатомагматическое извержение, которое длилось примерно одни сутки; сильное,  $M = 6.9$ , землетрясение 01.01.1996 г. в 21 ч 57 мин камчатского времени в Карымском вулканическом центре на глубине ~10 км. В статье рассматриваются взаимосвязь деформаций земной поверхности с вулканической деятельностью и названными одновременными уникальными явлениями, их механизм по геодезическим данным.

### ВВЕДЕНИЕ

Карымский вулканический центр, имеющий размеры  $40 \times 60$  км, расположен в средней части активной Восточной вулканической зоны Камчатки примерно в 120 км к северо-востоку от г. Петропавловск-Камчатский. В нем находятся 19 вулканических построек, два из которых являются ныне действующими вулканами I, II, (рис.1) [4, 16].

Вулкан Карымский один из самых активных вулканов Камчатки в XX в. [4]. Его извержения, как правило, были продолжительными и происходили в периоды 1911–1912, 1920-х гг., 1934–1947, 1952–1966, 1970–1982 гг. [4, 19, 21]. Объем изверженной лавы в последние три периода был соответственно  $0.020 \text{ км}^3$ ,  $0.056 \text{ км}^3$  [3],  $0.122 \text{ км}^3$  [14]. Очередное его извержение началось 02.01.1996 г. и с перерывами продолжается до настоящего времени (февраль 2008 г.). Однако на этот раз в начале извержения произошли уникальные события.

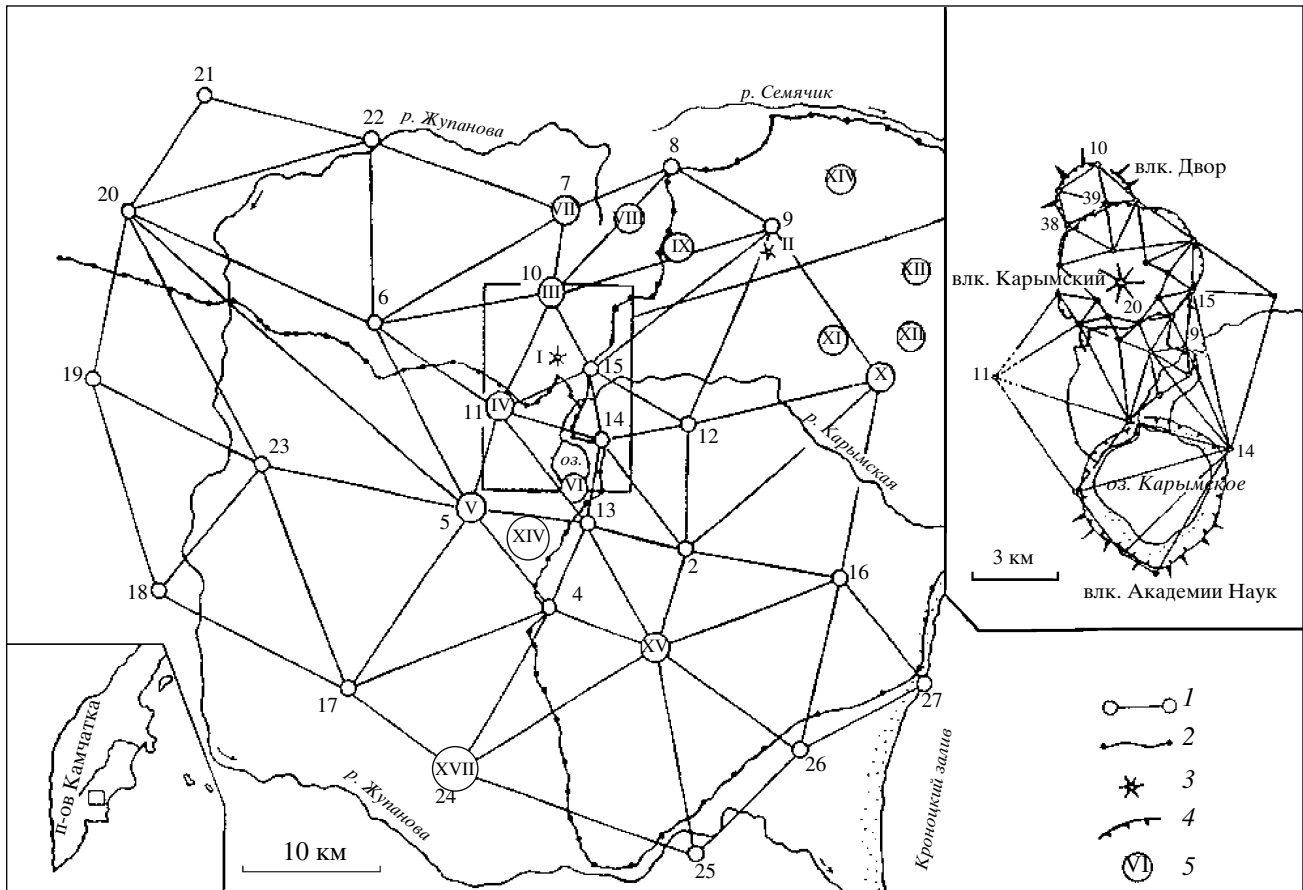
За несколько часов до начала извержения вулкана Карымский в Карымском вулканическом центре 01.01.1996 г. произошло землетрясение с  $M = 6.9$  с глубиной очага ~10 км [2, 20, 22]. Землетрясение такой силы не наблюдалось в вулканическом поясе Камчатки в течение предыдущих 50 лет с начала сейсмологических наблюдений на вулканах Камчатки. 02.01.1996 г. примерно через 12 ч после начала извержения вулкана Карымский на расстоянии 6 км от него произошло подводное фреатомагматическое извержение в Карымском озере, расположенном в кальдере считавшегося потухшим вулкана

Академии Наук, которое длилось менее суток [15, 20].

В Карымском центре на расстоянии 17 км от Карымского вулкана находится еще один действующий вулкан – Малый Семячик (рис. 1). В его кратере находится сильно минерализованное озеро, где температура рассола меняется от 0 до  $40^\circ\text{C}$ , по-видимому, в зависимости от процессов, происходящих в близповерхностном магматическом очаге [17]. В 1996–2006 гг. эруптивной активности на вулкане не наблюдалось.

В центральной части Карымского вулканического центра эпизодически происходят рои вулканотектонических землетрясений, в настоящее время этот район является одним из наиболее активных звеньев Курило-Камчатского вулканического пояса [2, 19].

Исследования деформаций земной поверхности в этом центре, направленные на изучение современных движений, строения коры, магматических и вулканических процессов в ней (внедрение магм в слои земной коры, образование магматических очагов и их глубины, механизм вулканических извержений) и прогноз извержений, были начаты в 1971 г. Институтом вулканологии (ИВ) ДВНЦ АН СССР вблизи действующего вулкана Карымский, а в 1975 г. – Дальневосточным аэрогеодезическим предприятием (ДВ АГП) Федеральной службы геодезии и картографии РФ на всей площади Карымского вулканического центра [13]. С 1972 по 2005 гг. почти ежегодные геодезические измерения деформаций земной поверхности вблизи вулкана Ка-



**Рис. 1.** Схема геодезических работ в Карымском вулканическом центре. 1 – стороны линейно-угловой триангуляции; 2 – линии высокоточного нивелирования; 3 – действующие стратовулканы: I – Карымский; II – Малый Семячик; 4 – кальдеры вулканов Карымский, Академии Наук и Двор (на врезке); 5 – потухшие вулканы Карымской группы (цифры в кружках): 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.

рымский велись ИВ ДВНЦ АН СССР – ДВО РАН, а ныне его правопреемником – Институтом вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН (измерения не выполнялись только в 1975, 1976, 1994, 2002 гг.). ДВ АГП производило наблюдения на площади Карымского вулканического центра в 1975, 1977, 1981, 1983, 1988 гг., с каждым разом наращивая территорию опроса.

Результаты геодезических измерений вертикальных и горизонтальных составляющих деформаций земной поверхности вблизи вулкана Карымский в период 1972–1974 гг. изложены в [10]. При их рассмотрении следует принимать во внимание то, что погрешность определения горизонтальных подвижек пунктов (их взаимное смещение при расстояниях между ними 1–3 км) была не лучше  $\pm(1-3) \times 10^{-5} D$ , где  $D$  – расстояние между пунктами в сантиметрах.

Измерения в период 1977–1988 гг. с учетом результатов за 1972–1974 гг. рассмотрены и обсуждены в [14].

Результаты работ ДВ АГП в Карымском вулканическом центре в период 1975–1988 гг., и измерений вблизи вулкана, выполненных лабораторией геодезии ИВ ДВО РАН в период 1972–1991 гг., и их связь с активностью вулкана Карымский и сейсмичностью района приводятся в [13].

На основании данных о горизонтальных составляющих деформаций земной поверхности в Карымском вулканическом центре в период 1975–1988 гг. на площади примерно  $30 \times 50$  км [13] С.А. Федотовым были определены положение и средняя глубина центра давления в магматическом очаге, равная  $18.3 \pm 0.8$  км [20]. Центры дилатаций земной поверхности в области радиуса 15 км, которые наблюдались в 1975–1977, 1977–1981, 1981–1983 и 1983–1988 гг., располагались вдоль линии длиной 3 км между вулканами Академии Наук и Карымский в том месте, где позднее, 01–02.01.1996 г. произошли прорыв базальтов по новой питающей трещине и последующее подводное извержение в Карымском озере.

В 1992, 1993, 1995 гг. наблюдения за подвижками земной поверхности были продолжены лабораторией геодезии ИВ, но на значительно меньшей территории вблизи вулкана. Заметим, что начиная с 1986 г., в связи с появлением высокоточной геодезической аппаратуры, погрешность определения горизонтальных деформаций резко уменьшилась и стала не хуже  $\pm 2 \times 10^{-6}$  D.

Деформации вблизи вулкана Карымский и нового эруптивного центра в Карымском озере, измеренные сразу после событий 01–02.01.1996 г. в кальдере вулкана Академии Наук, приведены в [12].

Позже удалось получить данные о горизонтальных подвижках на значительно большей территории –  $40 \times 45$  км. Эти сведения в очень сжатом виде приведены в [11]. Они могут быть использованы для уточнения моделей источников давления [7].

Исследования уникальных природных явлений – одновременных извержений вулканов Карымский и в кальдере вулкана Академии Наук, связанных с ними поствулканических процессов, проводились ИВ ДВО РАН с самого их начала [15, 20]. Для выполнения этих исследований была организована комплексная Карымская экспедиция ИВ ДВО РАН в составе 4-х полевых отрядов: вулканологического, геодезического, биогидрохимического, структурно-геологического. Научным руководителем экспедиции был академик С.А. Федотов, начальником экспедиции – М.А. Магуськин.

В 1996–2005 гг. комплексные исследования уникальных извержений вулканов Академии Наук и Карымский, связанных с ними процессов и их влияния на окружающую среду, стали возможными благодаря весомой поддержке по ряду программ и проектов от Миннауки РФ, РАН, РФФИ и других.

Миннауки – Минпромнауки РФ поддерживало следующие работы и проекты: в 1996–2002 гг. – работы по теме “Исследование извержений вулкана Академии Наук и Карымского вулкана, связанных с ними геологических, геофизических и геохимических процессов и их влияния на окружающую среду” (распоряжения № 0261ф, 477ф, 1457ф, 175ф, 723ф, 1447ф, 2037ф, 10.900/43–419, 06.900/43–182); в 1997–1998 гг. – по проекту “Вклад действующих вулканов в процессы изменения природной среды, прогноз извержений вулканов”, подпроект 1.2.1., ГНТП № 16 “Глобальные изменения природной среды и климата”; в 1999–2004 гг. – по проекту “Слежение за вулканами, прогноз и исследование извержений и их воздействие на окружающую среду”, проект 1.2.1., подпрограмма “Глобальные изменения природной среды и климата” Минпромнауки РФ. Поддержка Миннауки РФ в 1996–2004 гг. была оказана по поручению министра академика М.П. Кирпичникова.

В 2003–2005 гг. в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 13 “Изменение окружающей среды и климата: при-

родные катастрофы” выполнялся большой проект “Извержения вулканов Камчатки: магматическое питание, механизм, развитие, продукты, связанные процессы, опасность и воздействие на окружающую среду” (проект ДВО РАН № 03-1-0-08-006).

Выполнялись также проекты РФФИ 95-05-79003, 96-05-66243 и др.

Руководителем названных проектов 1996–2005 гг. был академик С.А. Федотов. Большим разделом названных проектов были геодезические исследования.

Извержение вулкана Карымский продолжалось в период подготовки предлагаемой публикации (ноябрь 2007 г.). В 2007 г. велись повторные геодезические измерения с целью получения количественных характеристик о деформациях земной поверхности вблизи него.

В работе обобщаются выводы прежних геодезических исследований 1972–1995 гг., раздел 1. Подробно излагаются результаты измерений деформаций в период 1997–2005 гг. вокруг Карымского вулкана и в районе прорыва базальтов 01–02.01.1996 г. в кальдере Академии Наук, а также на большей части,  $40 \times 45$  км, площади Карымского вулканического центра вокруг них, разделы 2 и 3. На основании геодезических, а также сейсмологических и вулканологических данных рассматривается механизм одновременных извержений 01–02.01.1996 г., особенности вулканической деятельности и связанных с ней явлений в Карымском вулканическом центре, раздел 4.

## 1. ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В КАРЫМСКОМ ВУЛКАНИЧЕСКОМ ЦЕНТРЕ В 1972–1995 ГГ. ПО ДАННЫМ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

К началу геодезических исследований в 1972 г. вулкан Карымский находился в очередной стадии эруптивной активности, которая началась в мае 1970 г. и закончилась в декабре 1982 г. [4, 19, 21].

Основные выводы о деформациях земной поверхности в Карымском вулканическом центре на площади  $30 \times 50$  км по данным дискретных геодезических измерений, выполненных в 1972–1995 гг., заключались в следующем.

1. В Карымском вулканическом центре (рис. 1) преобладали деформации растяжения преимущественно по направлению перпендикулярному к оси Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны и вулканического пояса. Особо значимые растяжения происходили во время роев вулканотектонических землетрясений [13].

2. Максимальные (до  $5 \times 10^{-6}$  в год) деформации растяжения в период 1975–1988 гг. происходили в центре вулканической структуры в 7–15 км южнее вулкана Карымский [13].

3. Геометрический центр максимальных горизонтальных деформаций в период 1975–1988 гг. практически совпал с будущим центром прорыва базальтовой магмы на дне Карымского озера 02.01.1996 г. [20].

Ежегодные геодезические измерения 1972–1995 гг., выполненные вблизи действующего вулкана Карымский на площади примерно  $5 \times 10$  км, более детально характеризовали относительные деформации земной поверхности, связанные с извержением вулкана [11, 13]. Они имели следующие особенности.

1. В период с 1972 по 1995 гг. произошло общее относительное погружение площади ( $\sim 40$  км<sup>2</sup>), включающей вулкан Карымский. Оно, по-видимому, происходило симметрично относительно кратера вулкана в пределах его кальдеры. При таком допущении объем проседания за 23 года составляет около  $0.057$  км<sup>3</sup> [11].

2. Эруптивная деятельность Карымского вулкана 1970–1982 гг. сопровождалась продолжительными колебаниями от 5 до 20 мм уровня земной поверхности у подножия его конуса на фоне относительного общего проседания земной поверхности в пределах кальдеры [11].

3. Поле вертикальных подвижек вблизи вулкана Карымский, наблюдаемое на расстоянии от его кратера в пределах 1.7–3.5 км в период 1972–1995 гг., удовлетворительно объяснялось любым изометричным или осесимметричным источником давления под вулканом, верхняя граница которого не ближе 1.5 км от поверхности земли [14].

4. В происхождении горизонтальных деформаций растяжения вблизи вулкана Карымский, на расстоянии от 3 до 4 км от его вершины, трудно выделить главную причину. По-видимому, они связаны, в первую очередь, с более общим процессом – тектоническими движениями, охватывающими Восточный вулканический пояс Камчатки, и, во вторую очередь, – с изменениями напряжений в магматической питающей системе вулкана и роями местных коровых землетрясений. Извержения с излияниями лавы в 1976, 1979, 1980 гг. происходили в период, когда наблюдалось растяжение земной поверхности примерно со скоростью  $1.5 \times 10^{-6}$ . В то же время в период 1989–1995 гг., когда вулкан находился в покое, перед новым извержением 1996–2007 гг., на его юго-восточном подножье, включая район выхода горячих источников вблизи истока р. Карымская из Карымского озера (рис. 1, вставка), происходило практически всестороннее растяжение земной поверхности с вдвое большей скоростью  $3 \times 10^{-6}$  в год. Это могло быть признаком поступления магмы с глубин в периферический очаг вулкана [11, 13].

## 2. ДЕФОРМАЦИИ ПОСЛЕ СОБЫТИЙ 01–02.01.1996 Г. В КАРЫМСКОМ ВУЛКАНИЧЕСКОМ ЦЕНТРЕ И В ХОДЕ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА КАРЫМСКИЙ В 1996 Г.

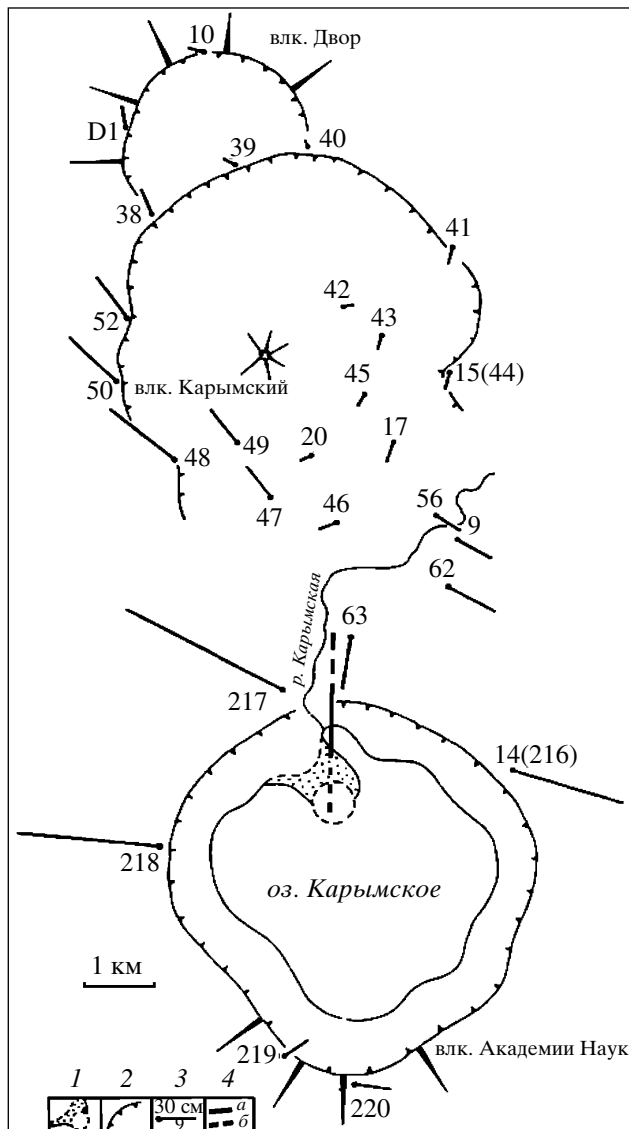
Данные о деформациях земной поверхности, произошедших после начала извержения вулкана Карымский и после прекращения извержения в кальдере Академии Наук 01–02.01.1996 г., приведены в [12] по данным измерений в период февраль–сентябрь 1996 г. вблизи этих эруптивных центров на удалении не более 2–8 км. Произшедшие горизонтальные деформации на сравнительно большой территории, примерно на площади  $12 \times 28$  км, приведены в [1]. Следует отметить ряд предшествующих обстоятельств. Во-первых, очередное извержение вулкана Карымский ожидалось по сейсмическим данным. Сотрудниками ИВ ДВО РАН В.В. Ивановым и А.В. Сторчеусом был дан его среднесрочный прогноз [5]. Данные измерений вертикальных подвижек у подножия конуса, выполненных осенью 1995 г., не противоречили этому прогнозу, так как они сменили свой знак, т. е. опускание подножия сменилось на его воздымание. Во-вторых, сильное землетрясение с  $M = 6.9$  в Карымском вулканическом центре не ожидалось, так как такие землетрясения в вулканических районах Камчатки не наблюдались в течение 50 лет. В-третьих, не было даже предположений о том, что в кальдерном озере вулкана Академии Наук, который считался угасшим, в близком будущем может возобновиться вулканическая деятельность, подъем базальтов к поверхности и произойти кратковременное вулканическое извержение.

Повторные геодезические измерения, выполненные в период февраль–сентябрь 1996 г. после этих событий, показали следующие главные особенности деформаций, возникших после начала обоих извержений.

1. На местности обозначилась локальная область измеренных максимальных деформаций. Она находится между кальдерами вулканов Карымский и Академии Наук, вытянута по направлению север–юг на  $\approx 3.5$  км (рис. 1, вставка), [12].

2. В области максимальных деформаций произошли разнонаправленные горизонтальные подвижки по широтному направлению, наибольшая измеренная величина растяжения равна 2.3 м на базе 3.6 км. Измеренная повторным нивелированием величина относительного проседания репера 4, расположенного на 1.5 км к северу от центра подводного извержения, равна 0.80 м. Борты зоны проседания испытали неодинаковый по амплитуде подъем: западный борт на 60–70 см, восточный – на 20–30 см [12].

3. Кроме сравнительно небольшой площади  $\approx 1.5 \times 2.5$  км, где деформации растяжения превыси-



**Рис. 2.** Горизонтальные деформации земной поверхности вблизи вулкана Карымский и вокруг Карымского озера после извержений 01–02.01.1996 г. за период от 1989, 1990–1995 гг. до 05.1996 г., вычисленные относительно пункта 7 и направления 7–8 (рис. 1). 1 – кратер в озере и новый полуостров, образовавшийся при извержении; 2 – границы кальдер вулканов Двор, Карымский и Академии Наук; 3 – направление и величина горизонтальных подвижек пунктов, их масштаб и номер пункта; 4 – открытая трещина растяжения (а), предполагаемое продолжение трещины (б).

ли предел прочности горных пород и сопровождались видимыми разрывами [8], выявилась обширная область размером  $\approx 15 \times 16$  км вокруг нового эруптивного центра в оз. Карымское, где горизонтальные деформации растяжения превышают  $1 \times 10^{-5}$ . Границы распространения таких деформаций и закономерности их затухания по мере удаления от эпицентра сильного землетрясения 01.01.1996 г. и центров извержений предстояло выяснить путем про-

должения и расширения повторных геодезических измерений на всю площадь Карымского вулканического центра [12].

В данном разделе надо дать пояснения к статье 1997 г. [12]. В ней были показаны горизонтальные подвижки, определенные относительно пунктов 38, 39, 40 (рис. 1, вставка и рис. 2), расположенных в кальдере потухшего вулкана Двор и считавшихся неподвижными (по данным измерений взаимное положение их в течение многих лет оставалось практически неизменным). Так было сделано, поскольку в то время не было измерений на удаленных пунктах, связанных с сетью, расположенных вблизи вулкана Карымский. В последующие годы измерения были произведены на многих пунктах, в том числе и на удаленных, и появилась возможность рассматривать подвижки близлежащих к извержениям пунктов относительно удаленных. В частности и достаточно обоснованно, в качестве неподвижного был принят пункт 7 (рис. 1), и относительно него определены горизонтальные смещения всех остальных, в том числе пунктов, расположенных вблизи вулкана Карымский (рис. 2). Результаты, представленные на рис. 2, являются более объективными, и именно их следует рассматривать при последующих интерпретациях данных о горизонтальных смещениях за период от 1989, 1990–1995 гг. до 05.1996 г.

В 1996–2006 гг. с целью определения происходящих деформаций земной поверхности в связи с продолжающимся с 02.01.1996 г. извержением вулкана Карымский и происходящими здесь сейсмическими процессами, а также для определения остаточных горизонтальных деформаций на всей площади Карымского вулканического центра от упомянутых выше сильного землетрясения 01.01.1996 г. и почти одновременного начала извержений двух вулканов были выполнены следующие измерения.

1. Повторные измерения 33 линий вблизи извергающегося вулкана Карымский светодальномерами с погрешностью не более  $\pm(2 \text{ мм} + 1 \times 10^{-6}D)$ , где  $D$  – длина измеряемой линии в миллиметрах (рис. 1, вставка).

2. Повторные нивелирования I класса вдоль замкнутой 20-километровой трассы с заложеными еще в 1971 г. и сохранившимися 34 реперами (рис. 1, вставка).

3. Совместно с Камчатским филиалом Геофизической службы РАН спутниковые GPS-наблюдения на 21 пунктах в ранее созданной ДВ АГП специализированной сети из 27 пунктов линейно-угловой триангуляции на площади Карымского вулканического центра с выходом на соседние геологические структуры (рис. 1).

В разделе 3 обсуждаются результаты геодезических работ 1997–2005 гг.

### 3.1. ДЕФОРМАЦИИ В КАРЫМСКОМ ВУЛКАНИЧЕСКОМ ЦЕНТРЕ И ВБЛИЗИ ВУЛКАНА КАРЫМСКИЙ ВО ВРЕМЯ ЕГО ИЗВЕРЖЕНИЯ В 1997–2005 ГГ.

Результаты выполненных геодезических измерений деформаций земной поверхности с применением различных технологий (повторные измерения длин линий от 0.5 до 5 км светодальномерами и GPS-технологией, от 5 до 20 км – GPS-технологией, нивелированием I, II классов) рассматриваются ниже раздельно.

#### 3.1. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ДЕФОРМАЦИЙ

Работы со спутниковыми приемниками Ashtech и Trimble системы NAVSTAR GPS по определению расстояний и превышений между имеющимися геодезическими пунктами выполнялись совместно лабораторией геодинимических исследований КФ ГС РАН и лабораторией геодезии ИВ ДВО РАН, ныне лабораторией геодезии и дистанционных методов исследований ИВиС ДВО РАН, в течение четырех лет (1996–2000 гг.) с постепенным наращиванием площади опроса. В данном случае технология наблюдений и обработки обеспечивала определение расстояний с погрешностью  $\pm 1$ –2 см и превышений (разность высот пунктов) с погрешностью  $\pm 10$  см.

Измерениями по GPS-технологии определена область значимых горизонтальных деформаций ( $5 \times 10^{-6}$  и более) земной поверхности в Карымском вулканическом центре на площади  $\approx 30 \times 40$  км, произошедших в связи с землетрясением в Карымском вулканическом центре 01.01.1996 г. и начавшимися извержениями вулканов Карымский и Академии Наук. Максимальные растяжения до  $2.34 \times 10^{-4}$  зафиксированы на участке, расположенном между кратером подводного извержения и южной границей кальдеры вулкана Карымский (рис. 3). Погрешности определения плоских деформаций по главным осям лежат в пределах  $\pm(1.2\text{--}2.4) \times 10^{-6}$ .

Рис. 4 иллюстрирует изменения площадей (дилатации) плоских фигур-треугольников. Эти данные очерчивают область положительных деформаций. Максимальное значение находится в районе подводного кратера в кальдере вулкана Академии Наук и составляет  $2.8 \times 10^{-4} \pm 2.2 \times 10^{-6}$ . Примечательно, что здесь же находились центры дилатации земной поверхности в 1975–1977, 1977–1981, 1981–1983 и 1983–1988 гг., определенные в [13]. Средняя погрешность определения дилатаций в треугольниках составляет  $\pm 2 \times 10^{-6}$ .

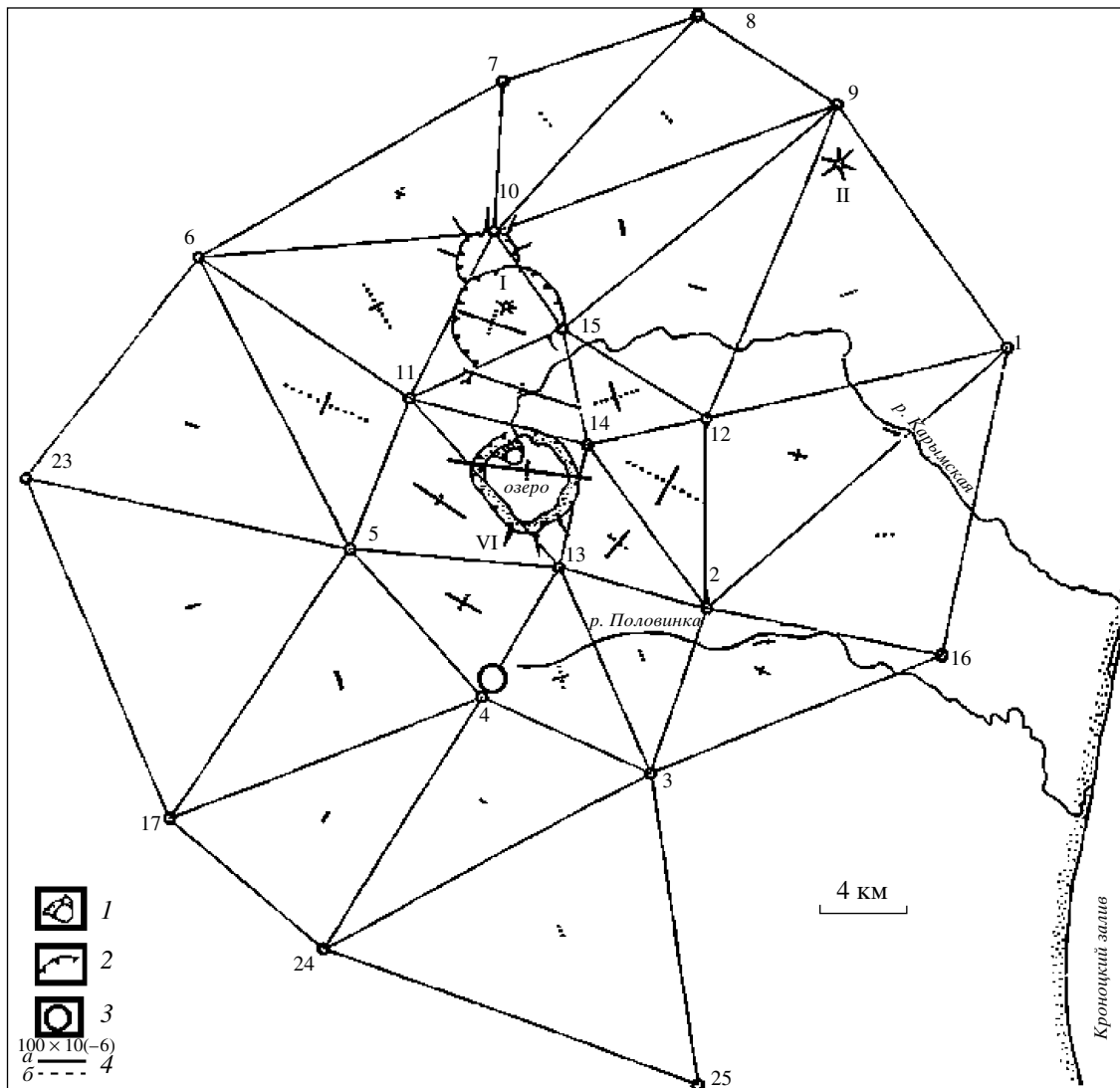
Граница нулевых деформаций (в данном случае граница между областями растяжения и сжатия) имеет неправильную форму и вытянута на юго-запад и северо-восток от центра подводного извержения. Минимальное удаление ее от центра извержения в кальдере Академии Наук в 1996–2000 гг.

составляет 5.3 км, максимальное – 17.6 км. В 1975–1988 гг. изолиния нулевых горизонтальных деформаций была более изометричной, и ее расстояние от центра деформаций равнялось  $13 \pm 3.5$  км [20]. Это показывает, что центр или центры давления в 1996–2000 гг. находились на меньшей глубине (выше  $18.3 \pm 0.8$  км), чем в 1975–1988 гг.

Вокруг области растяжения и положительных дилатаций простирается зона сжатия и отрицательных дилатаций (рис. 4). Они значимы, так как большая часть их значительно превышает погрешности определения, которые колеблются в пределах  $\pm(1.2\text{--}2.4) \times 10^{-6}$ . В восточном и северо-восточном направлениях область сжатия величиной  $-20 \times 10^{-6}$  выходит за пределы Карымского геодинимического полигона, и границы ее могут быть определены (в пределах чувствительности метода) при увеличении площади повторных измерений.

На рис. 5 показаны направления и величины горизонтальных движений пунктов триангуляции относительно пункта 7 и дирекционного угла линии 7–8, принятые условно соответственно неподвижным неизменным за период 1988–2000 гг. На этом же рисунке показаны пункты 18–22, 26, 27, на которых еще не были выполнены наблюдения по GPS-технологии. Для этих пунктов пока нет возможности определять их подвижки с 1988 г., т. е. с того момента, когда на них были выполнены последние классические геодезические измерения. Принятие пункта 7 в качестве исходного вполне оправдано, так как по имеющимся данным в этом районе горизонтальные смещения были всегда минимальны [13]. Следует заметить, что на рис. 5, в отличие от рис. 2, показаны горизонтальные подвижки пунктов, удаленных в основном от центров извержений. Пункты 10, 14, 15 являются общими для обоих рисунков. Горизонтальные деформации оказались несимметричными относительно центра подводного извержения в кальдере вулкана Академии Наук.

Наблюдения за горизонтальными подвижками земной поверхности непосредственно вблизи извергающегося вулкана Карымский велись в 1986–2005 гг. с использованием высокоточного светодальномера СП–2 (погрешность измерения расстояний  $\pm(2 \text{ мм} + 2 \times 10^{-6} D)$ , где  $D$  – длина линии в мм) и в 2003–2006 гг. дополнительно с применением спутниковых двухчастотных геодезических приемников. Частота измерений – 1–2 раза в год. Схема расположения пунктов, на которых устанавливались приборы, показана на рис. 6. Все пункты, за исключением 44, 216, 218, представляют собой бетонные тумбы. В верхней части этих тумб закреплена металлическая плита, на которой устанавливается прибор в плановом отношении всегда одинаково. Там, где не было скальных выходов, тумба закладывалась на глубину от 2 до 3 м, причем нижняя ее часть представляет собой массивный бетонный якорь. На пунктах 44 и 216, над центром, установлен

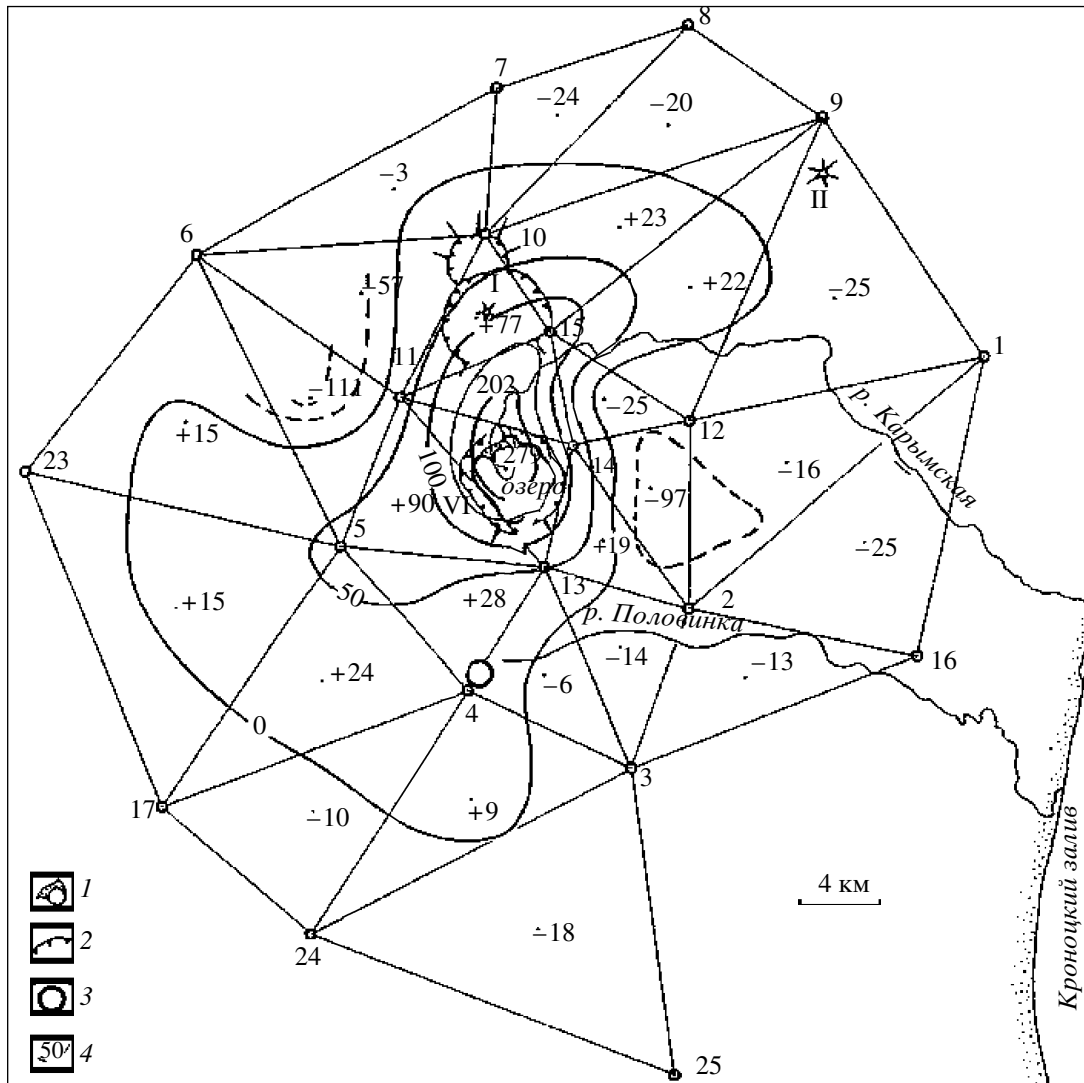


**Рис. 3.** Направления главных осей плоской деформации растяжения–сжатия и их величины в Карымском вулканическом центре после извержений 01–02.01.1996 г. в период от 1988 до 1996–2000 гг. (в 1996, 1997, 1999 и 2000 гг. были получены данные на всей площади, которые объединены в одну эпоху). 1 – кратер подводного извержения в кальдере Академии Наук и новый полуостров, образовавшийся при извержении; 2 – границы кальдер; 3 – эпицентр главного землетрясения 01.01.1996 г.,  $M = 6.9$ ; 4 – масштаб плоской деформации: *a* – растяжение, *b* – сжатие. Вулканы: I – Карымский, II – Малый Семячик, VI – Академии Наук.

металлический штатив и эти пункты совмещены с пунктами государственной сети триангуляции № 14 и 15 (рис. 1). Пункт 218 – металлическая труба с чугунной маркой в верхней части и бетонным якорем на глубине 1.5 м. Здесь прибор устанавливался на деревянном штативе и центрировался с помощью оптического отвеса с точностью  $\pm 2$  мм. Принятая методика закрепления центров и установки приборов способствовала высокоточному определению расстояний между пунктами. Выбор участка для сравнительно частых измерений определялся произошедшими здесь во время событий в Карымском вулканическом центре 01–02.1996 г. большими подвижками земной поверхности [12].

Знание полных фактических данных важно для будущих исследований, поэтому в табл. 1 приведены все измеренные расстояния за период 04.1996–04. 2005 гг. (наклонные дальности, т.е. расстояния между центрами геодезических пунктов). Горизонтальные подвижки земной поверхности выражаются в основном в изменениях наклонных дальностей между пунктами (если нет значительных вертикальных подвижек, особенно в местностях с большим уклоном).

Из данных табл. 1 следует, что извержение вулкана Карымский в период 04.1996–10.1998 гг. происходило в условиях растяжения земной поверхности со средней скоростью  $+4.1 \times 10^{-6}$  в год на обозначен-



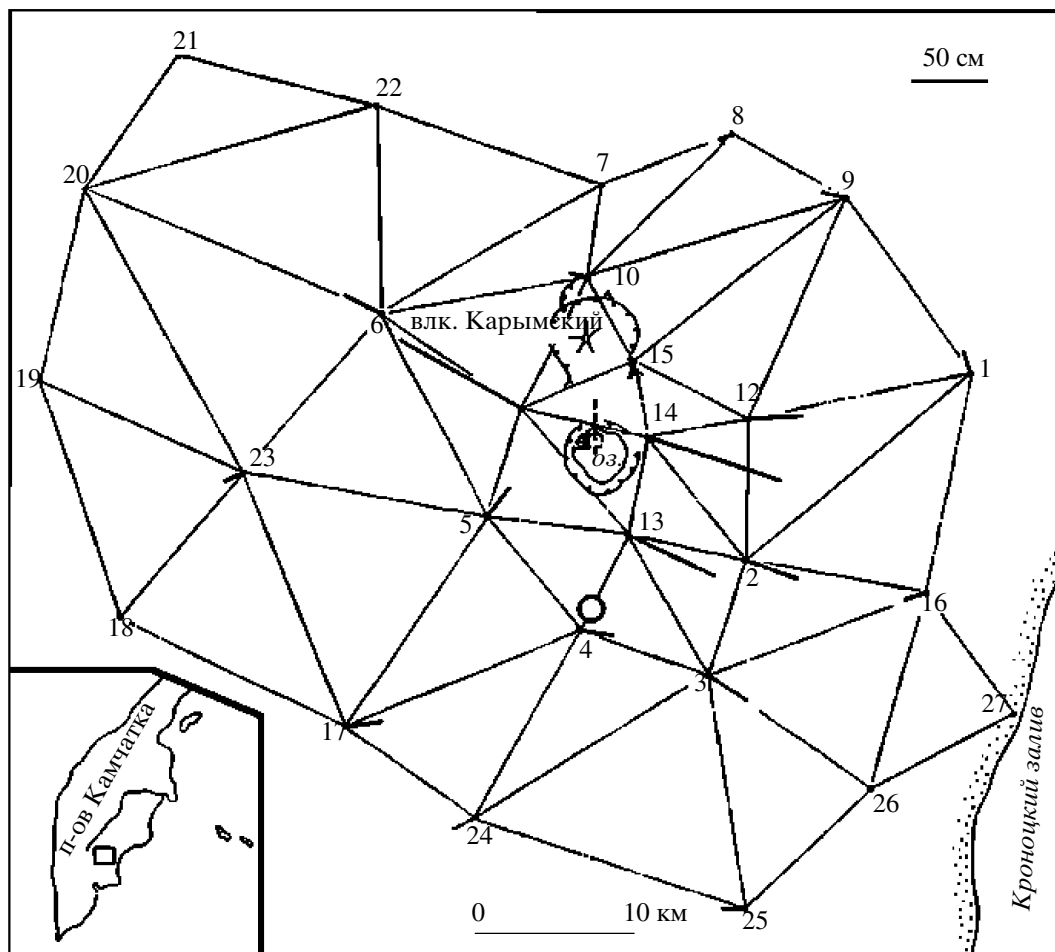
**Рис. 4.** Относительные изменения площадей плоских фигур (треугольников) – дилатации в Карымском вулканическом центре после извержений 01–02.01.1996 г. в период от 1988 до 1996–2000 гг. (1996, 1997, 1999 и 2000 гг.) в ед.  $10^{-6}$  (указаны в центре треугольников и изолиниями по площади). Услов. обозн. 1–3 те же, что на рис. 3; 4 – изолинии равных дилатаций в ед.  $10^{-6}$ .

ной сетью геодезических пунктов местности (рис. 6). С 1999 по 2003 гг. деформации растяжения уменьшились, и средняя скорость их была  $+1.8 \times 10^{-6}$ . В период с 10.2003 по 04.2005 гг. значимых, превышающих ошибку определения, горизонтальных подвижек не обнаружено. Границы области распространения деформаций растяжения в период 04.1996–04.2005 гг. по имеющимся данным определить невозможно. Эта задача выполнима при увеличении территории опроса. Следует заметить, что изменение длин линий (растяжений), ориентированных примерно по направлению запад – восток, существенно больше, чем остальных (табл. 1, рис. 6).

### 3.2. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ДЕФОРМАЦИЙ

Вертикальные подвижки земной поверхности в этом же районе изучались методом повторных высокоточных нивелирований вдоль трассы, представляющей собой замкнутый полигон (рис. 6). Нивелирование в полном объеме, т.е. по всей замкнутой трассе, проводилось в летне-осенний период в 1996, 1997, 2000, 2001 гг., а в остальные годы – только на отдельных участках или же вообще не выполнялись. В табл. 2 приведены сводные данные, т.е. отметки реперов из определений в соответствующие годы.



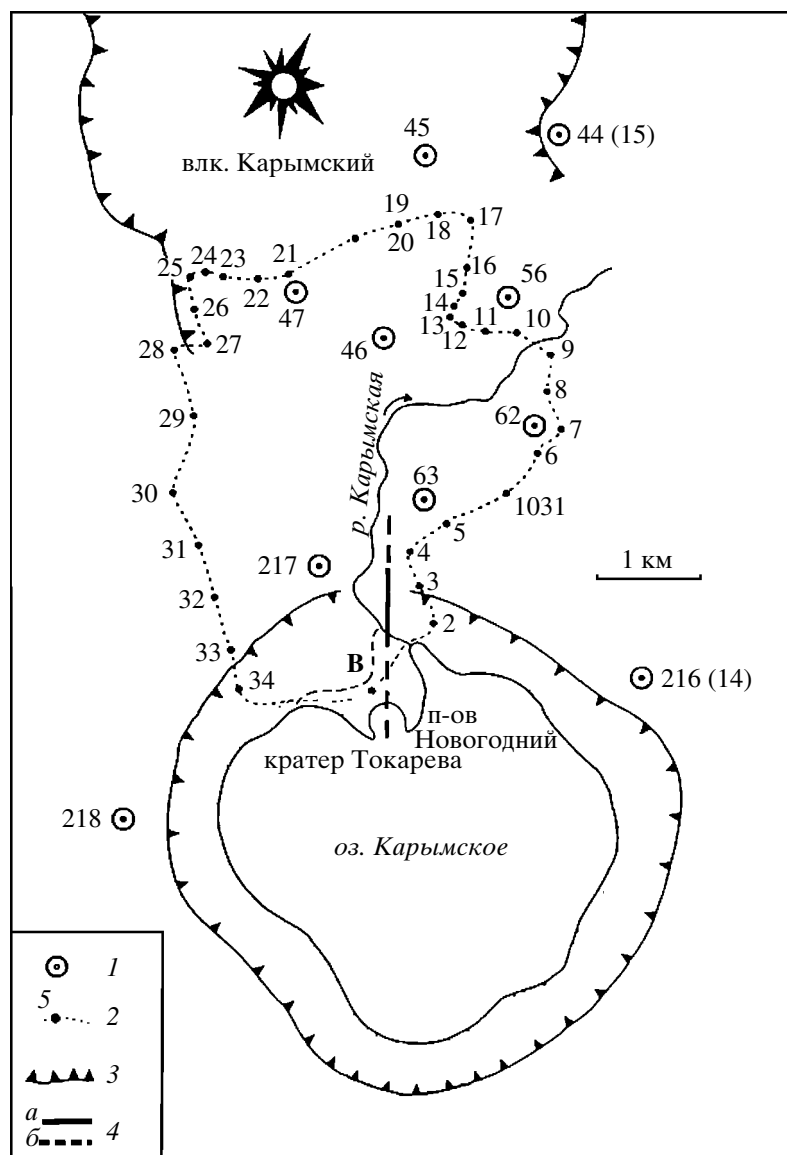


**Рис. 5.** Горизонтальные подвижки пунктов линейно-угловой триангуляции в Карымском вулканическом центре после извержений 01–02.01.1996 г. в период от 1988 до 1996–2000 гг. (1996, 1997, 1999 и 2000 гг.). Масштаб и направление подвижки показаны в верхнем правом углу. Услов. обозн. см. на рис. 2 и 3.

В данных, опубликованных нами ранее [12], вертикальные смещения реперов вдоль этой трассы в связи с событиями 01–02.01.1996 г. в Карымском вулканическом центре определялись относительно пункта 40, расположенного в кальдере древнего вулкана Двор (рис. 1, вставка). Следует пояснить, что сначала, в мае 1996 г., определялось относительное вертикальное смещение репера 9 (рис. 6) многоходовыми линиями тригонометрического нивелирования (измерениями углов наклона и длин линий) с погрешностью  $\pm 2\text{--}3$  см. Репер 9, в связи с событиями 1–2 января, сместился по вертикали вверх, т.е. поднялся относительно репера 40 в кальдере вулкана Двор на  $93 \text{ мм} \pm 20\text{--}30$  мм. Затем, в сентябре 1996 г. вертикальные смещения реперов по самой нивелирной трассе определялись, как и раньше, из однородных по точности измерений, но в данном случае относительно репера 9 (рис. 7), так как отсутствовала геодезическая “связь” его с пунктами, расположенными в кальдере вулкана Двор. Если к отметке репера 9 прибавить или отнять ту или иную ве-

личину, то картина относительных вертикальных подвижек вдоль нивелирной трассы не изменится. Погрешность определения разности отметок одноименных реперов из определений в разные годы (и, следовательно, вертикальных подвижек) составляет  $\pm 0.7 \text{ мм} \times \sqrt{L} \times \sqrt{2}$ , где  $L$  – удаление в километрах данного репера от репера, принятого за неподвижный.

Рис. 8 иллюстрирует изменения, относительно репера 9, уровня земной поверхности вдоль замкнутой нивелирной трассы в разные периоды. В частности, на нем видно, что периоду интенсивной эффузивно-эксплозивной деятельности Карымского вулкана в 1996–2000 гг. соответствуют сравнительно большие, до 12 мм в год, вертикальные движения (преимущественно опускания) реперов. В период ослабления извержения вулкана в 2000–2001 гг. (по данным сообщений начальников полевых отрядов) опускания отдельных реперов не превышают 5 мм в год.



**Рис. 6.** Схема расположения геодезических пунктов около вулкана Карымский и вблизи нового эруптивного центра (кратер Токарева). 1 – пункты определения горизонтальных смещений; 2 – линия нивелирования и номера реперов. Остальные обозн. см. на рис. 2.

Особо следует сказать о движении (опускании) репера **В**. Этот репер является временным. Он был установлен в 1997 г. на полуострове, образовавшемся во время подводного извержения в Карымском озере. Полуостров сложен в основном крупным вулканическим шлаком и кусками пород, выброшенных при взрывах в подводном кратере и отложенных волнами цунами [15, 20]. Измерения 2000 г. показали опускание его на 43 мм в период 1997–2000 гг., а в период 2000–2001 гг. он практически сохранил свое положение (рис. 8). Суммарное опускание репера **В** в 1996–2001 гг., судя по опусканию реперов 21 и 22 в 1996–1997 гг., могло быть около 70 мм.

Анализ полученных результатов наблюдений 1996–2005 гг. (табл. 2, рис. 7 и 8) показывает, что происходившие деформации имели следующие свойства.

1. Ближайшие к кратеру вулкана Карымский реперы, с 18 по 26 (рис. 6, 8), в период 1996–2001 гг. опускались со средней скоростью 5–9 мм/г., однако не наблюдается прямой зависимости величин опусканий реперов от удаленности их от кратера.

2. На участке от репера 23 до репера 28 в окрестности пересечения нивелирной трассы с западной границей кальдеры вулкана Карымский (рис. 6) наблюдаются из года в год наибольшие разнонаправленные вертикальные движения (рис. 7, 8). Менее

**Таблица 1.** Наклонные дальности (м) между геодезическими центрами, измеренные в разные годы около вулкана Карымский и между кальдерами вулканов Карымский и Академии Наук

| Название<br>линий | Годы     |          |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------|----------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                   | 1996     | 1997     | 1998  | 1999  | 2000  | 2001  | 2003  | 2004  | 2005  |
| 9–62              | 634.354  | 4.356    | 4.358 | 4.360 | 4.357 | 4.357 | 4.359 | 4.361 | 4.359 |
| 9–63              | 1669.083 | 9.094    | 9.109 | 9.110 | 9.115 | 9.124 | 9.127 | 9.127 | 9.122 |
| 9–46              | 1526.896 | 6.906    | 6.916 | 6.923 | 6.925 | 6.927 | 6.928 | 6.930 | 6.930 |
| 9–47              | 2623.474 | 3.481    | 3.489 | 3.492 | 3.492 | 3.497 | 3.497 | 3.494 | 3.486 |
| 9–20              | 2233.340 | 3.350    | 3.362 | 3.364 | 3.363 | 3.368 | 3.369 | 3.364 | 3.366 |
| 9–45              | 2279.726 | 9.736    | 9.739 | 9.738 | 9.744 | 9.747 | 9.754 | 9.746 | 9.748 |
| 9–15              | 2159.299 | 9.300    | 9.303 | 9.305 | 9.308 | 9.310 | 9.322 | 9.318 | 9.315 |
| 9–56              | 444.264  | 4.265    | 4.263 | 4.268 | 4.263 | 4.269 | 4.266 | 4.264 | 4.265 |
| 62–63             | 1138.315 | –        | –     | 8.344 | 8.347 | 8.348 | 8.347 | 8.348 | 8.347 |
| 62–46             | 1500.042 | –        | –     | 0.056 | 0.055 | 0.059 | 0.056 | 0.058 | 0.058 |
| 62–56             | 869.095  | –        | –     | 9.103 | 9.102 | 9.099 | 9.107 | 9.108 | 9.108 |
| 63–47             | 2200.610 |          |       | 0.603 | 0.608 | 0.612 | 0.592 | 0.606 | 0.593 |
| 63–46             | 1330.215 | 0.222    | –     | 0.221 | 0.224 | 0.223 | 0.220 | 0.221 | 0.218 |
| 46–47             | 1128.399 | –        | –     | 8.386 | 8.389 | 8.397 | 8.388 | 8.381 | 8.379 |
| 46–20             | 1050.891 |          | 0.894 | 0.892 | 0.894 | 0.897 | 0.892 | 0.893 | 0.896 |
| 46–45             | 1752.539 | –        | –     | 2.561 | 2.565 | 2.571 | 2.572 | 2.566 | 2.564 |
| 46–17             | 1301.632 | –        | –     | 1.654 | 1.660 | 1.664 | 1.668 | 1.659 | 1.657 |
| 46–56             | 1166.846 | –        | –     | 6.883 | 6.889 | 6.903 | 6.898 | 6.893 | 6.898 |
| 20–47             | 804.016  | –        | 4.012 | 4.014 | 4.017 | 4.030 | 4.014 | 4.012 | 4.008 |
| 20–45             | 1011.237 | –        | 1.242 | 1.248 | 1.251 | 1.263 | 1.246 | 1.247 | 1.252 |
| 20–15             | 2087.188 | –        | 7.210 | 7.217 | 7.230 | 7.236 | 7.234 | 7.224 | 7.225 |
| 20–17             | 1091.601 | –        | –     | 1.613 | 1.617 | 1.617 | 1.624 | 1.614 | 1.622 |
| 20–56             | 1792.511 | –        | –     | 2.527 | 2.536 | 2.536 | 2.540 | 2.526 | 2.522 |
| 17–45             | 751.536  | –        | –     | 1.546 | 1.554 | 1.544 | 1.561 | 1.560 | 1.562 |
| 17–15             | 1148.806 | –        | –     | 8.819 | 8.822 | –     | 8.838 | 8.834 | 8.827 |
| 17–56             | 1123.472 | –        | –     | 3.474 | 3.476 | 3.471 | 3.482 | 3.468 | 3.467 |
| 56–15             | 1907.291 | –        | –     | 7.301 | 7.302 | 7.312 | 7.315 | 7.309 | 7.304 |
| 45–15             | 1186.128 | –        | –     | 6.147 | 6.162 | –     | 6.166 | 6.162 | 6.160 |
| 217–15            | 4803.211 | 3.233    | –     | –     | 3.232 | –     | 3.257 | 3.256 | 3.255 |
| 217–9             | 3114.016 | 4.036    | 4.048 | 4.051 | 4.063 | 4.063 | 4.061 | 4.048 | 4.051 |
| 217–14            | 3573.322 | 3.365    | 3.362 | –     | 3.376 | –     | 3.367 | 3.366 | 3.364 |
| 14–15             | 5542.372 | 2.380    | 2.386 | –     | 2.375 | 2.393 | 2.366 | 2.377 | 2.379 |
| 14–220            | 4986.851 |          | 6.838 |       |       |       |       |       |       |
| 14–218            | 4914.097 | 4.085    | 4.114 | –     | 4.123 | 4.129 |       |       |       |
| 217–46            | 2418.960 | –        | –     | –     | 8.952 | 8.960 | 8.966 | 8.961 | 8.964 |
| 217–47            | 2775.201 | 5.207    | –     | –     | 5.202 | 5.220 | 5.214 | 5.220 | 5.224 |
| 14–56             | 3822.381 | –        | 2.402 | –     | 2.404 | 2.407 | 2.381 | 2.387 | 2.386 |
| 217–218           |          | 2687.842 | –     | 4.360 | –     | –     | 7.845 | 7.828 | 7.836 |

Примечание. Расположение геодезических центров показано на рис. 6.

ярко выраженные контрастные движения присутствуют и на участке нивелирной трассы в районе реперов 3, 4, 5, 1031, 6 у северной границы кальдеры вулкана Академии Наук (рис. 6–8).

3. Характер вертикальных подвижек вдоль нивелирного профиля в периоды 1996–1997 гг. и 1997–2000 гг. был сходным: проседание в кальдере Карымского вулкана, реперы 17–24; сохранение уровня на перемычке между кальдерами, реперы 28–31 и 7–10; проседание у северного края кальдеры вулкана Академии Наук, реперы 33–3 (рис. 6, 8).

4. Результаты нивелирований за период 1996–2001 гг. (рис. 7) показывают, что вертикальные подвижки вблизи подводного кратера в Карымском озере убывают по мере удаления от него и почти исчезают на расстоянии около 2.2 км от подводного кратера. То же самое происходит вблизи конуса вулкана Карымский, однако здесь граница “нулевых” подвижек находится дальше, на расстоянии ~3.2 км от кратера (рис. 6–8).

5. Опускание репера **В**, возможно, было связано отчасти с уплотнением отложений пород на новом полуострове.

На рис. 9 сделана попытка установления взаимосвязи деформаций земной поверхности в пределах кальдеры вулкана Карымский с активностью вулкана и взрывными землетрясениями. Часть этих данных (по 1991 г.) были приведены и обсуждались в [13]. Здесь нанесены новые данные по 2005 г., которые вызывают особый интерес в связи с событиями 01–02.01.1996 г. в Карымском вулканическом центре. Верхняя ломаная кривая  $a_1$  отражает ход средних значений относительных (в единицах  $10^{-6}$ ) изменений длин линий в линейно-угловой сети вокруг конуса вулкана в 1973–1982 гг. на расстоянии 2–4 км от его вершины (рис. 1, вставка). Погрешность каждой точки по 1982 г. равна  $\pm 3 \times 10^{-5}$ . Начиная с 1986 г., аналогичные данные (ломаная кривая  $a_2$ ) показаны для участка местности, находящегося на ЮЮВ от кратера (район, ограниченный пунктами 20, 45, 44, 9, 62, 63, 217, 47), (рис. 6, 9, врезка). Погрешность каждой точки здесь  $\pm 3 \times 10^{-6}$ , т.е. на порядок меньше, что объясняется появлением для измерения длин линий высокоточной аппаратуры.

На ломаной кривой вертикальных подвижек **б** данные однородны по точности, т.е. являются равноточными. Погрешность каждого определения (каждой точки)  $\pm 2.4$  мм. Кривая отражает вертикальные подвижки репера 20, наиболее близкого к действующему кратеру, относительно репера 9 (рис. 9, врезка). Поскольку в 1996 г. произошли большие вертикальные подвижки по всей местности, южнее древнего вулкана Двор [12], в том числе и репера 9, то подвижки репера 20 рассматривались относительно пункта 40, расположенного в кальдере древнего вулкана Двор. Эта величина (13 см) и указана как относительное

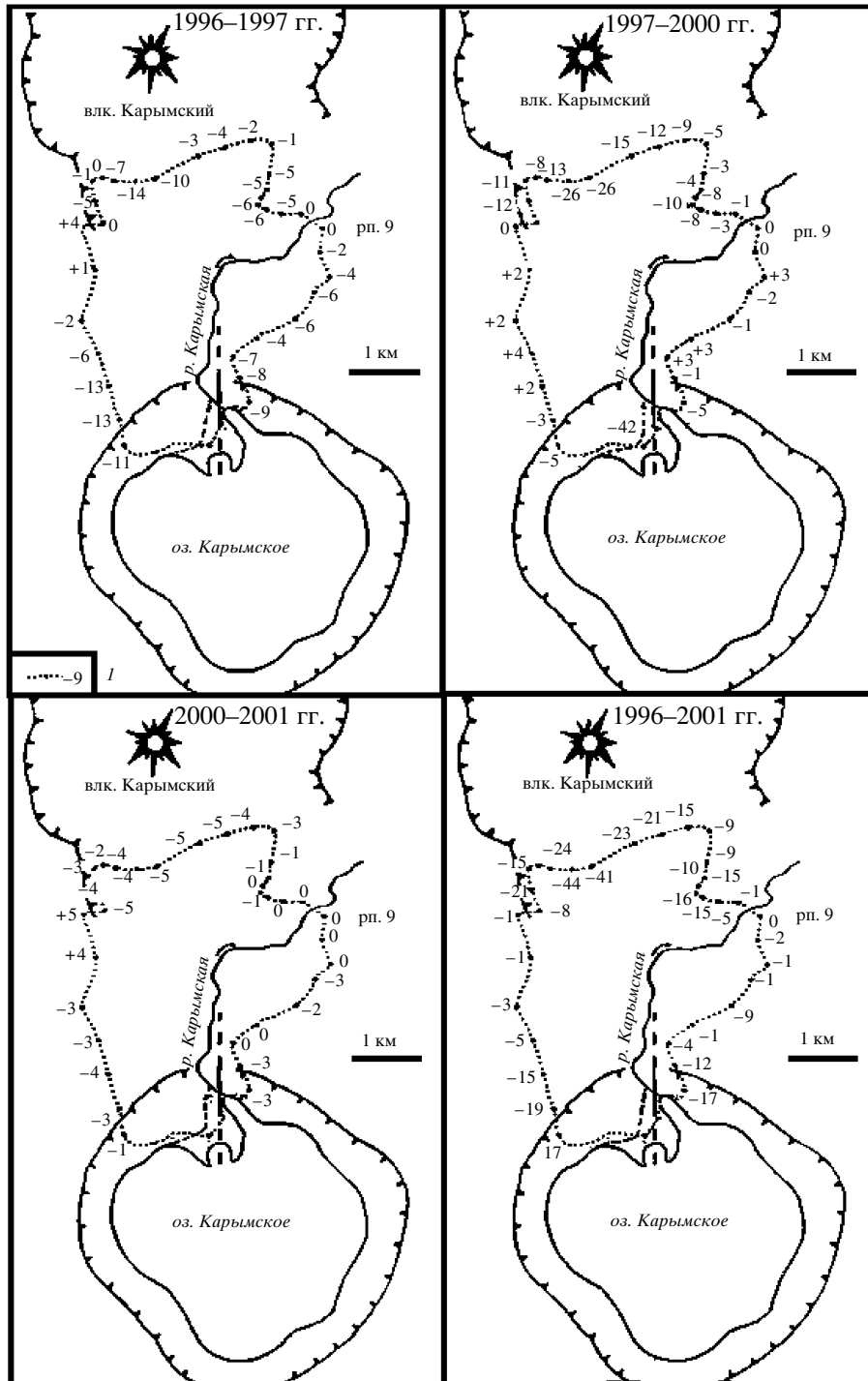
**Таблица 2.** Высоты реперов (м) из определений нивелированием в разные годы около вулкана Карымский и между кальдерами вулканов Карымский и Академии Наук

| № реперов  | Высоты над уровнем Балтийского моря |            |            |            |
|------------|-------------------------------------|------------|------------|------------|
|            | 08.1996 г.                          | 08.1997 г. | 08.2000 г. | 08.2001 г. |
| Гр. рп. 9  | 599.382                             | 599.382    | 599.382    | 599.382    |
| Гр. рп. 10 | 592.947                             | 592.947    | 592.946    | 592.946    |
| Гр. рп. 11 | 599.205                             | 599.203    | 599.200    | 599.200    |
| Ск. рп. 12 | 622.030                             | 622.024    | 622.016    | 622.015    |
| Ск. рп. 13 | 629.602                             | 629.596    | 629.586    | 629.586    |
| Ск. рп. 14 | 640.684                             | 640.678    | 640.670    | 640.669    |
| Ск. рп. 15 | 656.758                             | 656.753    | 656.749    | 656.748    |
| Гр. рп. 16 | 687.550                             | 687.545    | 687.542    | 687.541    |
| Гр. рп. 17 | 715.733                             | 715.732    | 715.727    | 715.724    |
| Гр. рп. 18 | 759.760                             | 759.758    | 759.749    | 759.745    |
| Ск. рп. 19 | 808.250                             | 808.246    | 808.234    | 808.229    |
| Гр. рп. 20 | 840.265                             | 840.262    | 840.247    | 840.242    |
| Ск. рп. 21 | 831.504                             | 831.494    | 831.468    | 831.463    |
| Ск. рп. 22 | 829.117                             | 829.103    | 829.077    | 829.073    |
| Ск. рп. 23 | 818.483                             | 818.476    | 818.463    | 818.459    |
| Ск. рп. 24 | 813.664                             | 813.664    | 813.656    | 813.654    |
| Ск. рп. 25 | 824.294                             | 824.293    | 824.282    | 824.279    |
| Ск. рп. 26 | 812.001                             | 811.996    | 811.984    | 811.980    |
| Ск. рп. 27 | 785.809                             | 785.809    | 785.806    | 785.801    |
| Гр. рп. 28 | 784.328                             | 784.332    | 784.332    | 784.327    |
| Гр. рп. 29 | 775.196                             | 775.197    | 775.199    | 775.195    |
| Гр. рп. 30 | 784.338                             | 784.336    | 784.338    | 784.335    |
| Гр. рп. 31 | 790.227                             | 790.221    | 790.225    | 790.222    |
| Гр. рп. 32 | 765.797                             | 765.784    | 765.786    | 765.782    |
| Гр. рп. 33 | 711.384                             | 711.371    | 711.368    | 711.365    |
| Гр. рп. 34 | 651.358                             | 651.347    | 651.342    | 651.341    |

Примечание. Места расположения реперов показаны на рис. 6.

опускание репера 20 в период 1995–1996 гг. Погрешность составляет  $\pm 2$  см. Последующие определения (точки на графике) – это снова вертикальные подвижки репера 20 относительно репера 9, определяемые нивелированием I–II классов с погрешностью менее  $\pm 2.4$  мм. Вышеописанные действия правомочны потому, что до 1996 г. график вертикальных подвижек репера 20, построенный относительно пункта 40, оставался, в пределах точности определения, схожим построенному относительно репера 9.

На рис. 9 показано, что обобщенные за 33 года (1972–2005 гг.) наклоны ломаных кривых горизонтальных и вертикальных составляющих деформаций земной поверхности в окрестностях конуса вулкана Карымский и его кальдеры не из-

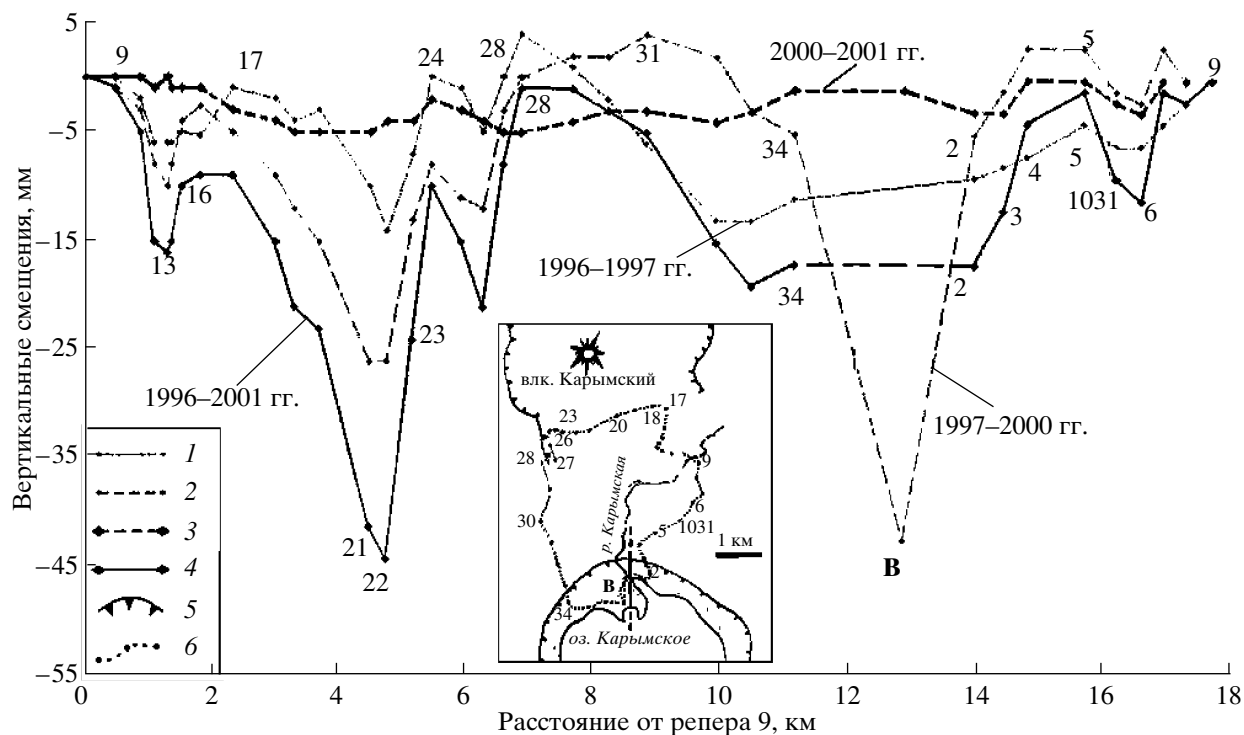


**Рис. 7.** Вертикальные движения реперов в мм в разные периоды. *l* – линия нивелирования и вертикальное движение репера. Услов. обозн. см. на рис. 2.

менились после скачкообразных подвижек во время событий 01–02.01.1996 г. в Карымском вулканическом центре.

Напомним, что на Карымском геодинимическом полигоне находятся более 160 закрепленных долговременно геодезических пунктов и ре-

перов, около 100 из них имели относительную высотную отметку с точностью первых миллиметров и более 60 пунктов – относительное плановое положение с точностью первых сантиметров до упомянутых выше событий. На некоторых из этих пунктов были выполнены высокоточные



**Рис. 8.** Вертикальные движения вдоль нивелирного профиля в периоды: 1 – 1996–1997 гг.; 2 – 1997–2000 гг.; 3 – 2000–2001 гг.; 4 – 1996–2001 гг. Буквой **В** обозначен репер, заложенный на новом полуострове. Услов. обозн. см. на рис. 2 и 6.

гравиметрические наблюдения. В “инструментальной” вулканологии это редкая удача, когда район предстоящих вулканических и сейсмических событий заранее покрыт сетью повторных высокоточных геодезических измерений. Повторение уникальных измерений на всех этих пунктах после сильного ( $M = 6.9$ ) землетрясения 01.01.1996 г. и одновременного извержения двух вулканов в Карымском вулканическом центре – важная научная задача. Они необходимы для определения изменений, произошедших в магматических очагах под Карымским вулканическим центром.

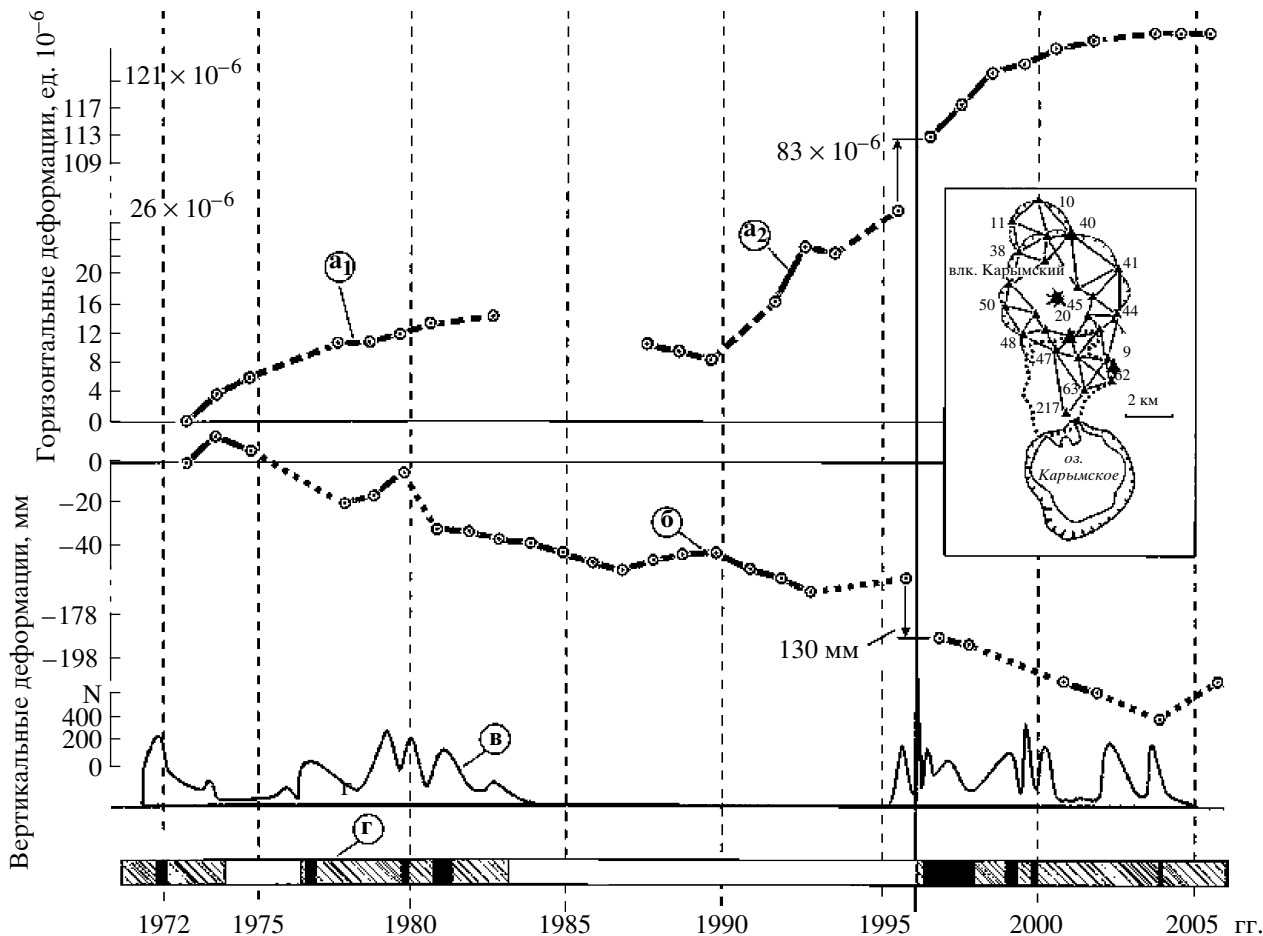
Для более достоверного суждения о вертикальных деформациях на всей площади Карымского вулканического центра необходимо выполнить повторное высокоточное нивелирование и гравиметрические определения вдоль существующих трасс, пересекающих активный вулканический центр в широтном и долготном направлениях.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прежде всего отметим, что геодезические измерения около вулкана Карымский на площади  $5 \times 10$  км и в Карымском вулканическом центре на площади  $30 \times 50$  км были выполнены во время извержения вулкана Карымский в 1970–1982 гг., во время его покоя в 1983–1995 гг. [13, 14] и в период его очередного извержения, длящегося с 01.01.1996 г. по

настоящее время (апрель 2008 г.) [11, 12]. На этот раз начало извержения вулкана Карымский сопровождалось неожиданными уникальными явлениями. За несколько часов до него произошло сильное ( $M = 6.9$ ) землетрясение, эпицентр которого находился примерно в 10 км к югу от Карымского озера. Землетрясений такой силы в Карымском вулканическом центре не наблюдалось в течение 50 лет (с момента начала регистрации землетрясений на вулканах Камчатки, 1946 г.). Приблизительно через 12 ч после пробуждения Карымского вулкана началось одновременное фреатомагматическое извержение в Карымском озере, расположенном в кальдере вулкана Академии Наук. Вулкан считался потухшим. Это извержение было вызвано внедрением базальтов по трещине и длилось около суток [15, 20].

Представились самые благоприятные возможности наблюдать и исследовать сочетание уникальных природных явлений, происходивших в хорошо изученном до этого Карымском вулканическом центре [20]. Исследовались извержения и их развитие, продукты, связанные с ними землетрясения, деформации земной поверхности, гидрогеохимические явления, воздействие на окружающую среду и многое другое. Разностороннее рассмотрение этих вопросов дано во многих публикациях 1996–2007 гг. Одной из главных задач было исследование магматических очагов и кана-



**Рис. 9.** Сопоставление подвижек земной поверхности с активностью вулкана в 1972–2005 гг. **а<sub>1</sub>** – среднее значение изменений длин линий в ед.  $10^{-6}$  в линейно-угловой сети вокруг конуса вулкана, ограниченной пунктами 48-50-38-11-10-40-41-44-9-47; **а<sub>2</sub>** – то же на участке, ограниченной пунктами 20-45-44-9-62-63-217-47; **б** – вертикальные смещения репера 20 относительно пункта 40 с 1972 по 1996 гг. и далее относительно репера 9 с 1996 по 2005 гг.; **в** – ежесуточное число взрывных землетрясений (тип  $N_4$  по [18]); **г** – активность вулкана: I – фазы покоя; II – фазы эксплозивного извержения; III – фазы эффузивно-эксплозивного извержения [18]. На вставке показана схема линейно-угловой сети геодезических пунктов и линия нивелирования.

лов, магматической питающей системы, механизма вулканической деятельности в Карымском вулканическом центре. При решении этих задач важную роль играли сейсмологические и геодезические данные. Назовем некоторые из этих работ.

В [20] рассмотрены начало извержений, оценены положение, глубины, размеры неглубоких магматических очагов под кальдерами вулканов Карымский и Академии Наук, крупного промежуточного корового магматического очага Карымского вулканического центра, рассматривались условия внедрения новой базальтовой дайки и возможный механизм извержений 1996 г., особенности фреатомагматических извержений.

Интенсивная сейсмическая деятельность, сопровождавшая извержение 1996 г., механизм очага главного землетрясения 01.01.1996 г.  $M = 6.9$ , развитие сильных роев его форшоков и афтершоков рассмотрены в [2, 22].

Возможное сочетание магматических источников давления, вызвавших геодезические деформации в 1996–2000 гг., приведены в [6, 7].

Система разрывов земной поверхности, появившихся на продолжении питающей трещины подводного извержения в кальдере вулкана Академии Наук, и связь этих деформаций с разломной зоной, проходящей через Карымский вулканический центр, рассматривались в [8, 9].

Сложное и сильно менявшееся поле деформаций, которое наблюдалось в 1972–1995, 1996 и 1997–2005 гг. в Карымском вулканическом центре, вокруг Карымского вулкана и места подводного извержения в кальдере вулкана Академии Наук 02.01.1996 г., возникло под действием различных источников давления. В данном разделе статьи рассматривается взаимосвязь деформаций с вулканической деятельностью, их механизм по геодезическим данным, в основном, 1996–2005 гг.

На рис. 2–5 показано, что вершинное извержение Карымского вулкана 01.01.1996 г. и прорыв базальтовой магмы на дне кальдерного озера вулкана Академии Наук 02.01.1996 г. сопровождались большим растяжением земной поверхности по направлению запад-восток в обе стороны от трещины прорыва.

Выявленные повторными геодезическими измерениями горизонтальные и вертикальные составляющие деформаций земной поверхности в Карымском вулканическом центре на площади  $30 \times 50$  км<sup>2</sup>, вокруг вулкана Карымский на площади 40 км<sup>2</sup>, вблизи от места прорыва базальтов и на перемычке между кальдерами вулканов Карымский и Академии Наук, о которых говорилось выше, оказались разнонаправленными, т.е. были области растяжения и сжатия, опускания и подъема. Прямые геодезические измерения, выполненные в начале февраля 1996 г., примерно через месяц после событий 01–02.01.1996 г. обнаружили большие горизонтальные (от 1 до 2.5 м) и вертикальные (от –0.7 до +0.6 м) подвижки пунктов, расположенных в районе перемычки между кальдерами вулканов Карымский и Академии Наук. Визуальными наблюдениями после схода снега были обнаружены многочисленные поверхностные разрывы в районе истока р. Карымская из озера и далее на восточных бортовых склонах этой реки. Самая большая из трещин имела непрерывную видимую протяженность в 700 м, ширина ее колебалась в пределах от 50 см до 2–2.5 м, восточный борт ее был опущен примерно на 1 м [8]. Сравнительно мелкие трещины, отдешифрированные по данным аэрофотосъемки и визуальным обследованиям, располагались на площади размером по широтному направлению в 1.6 км и по долготному в 2.2 км (устное сообщение В.Н. Двигало). После подробного обследования местности выяснилось, что все разрывы (трещины) имеют почти меридиональное направление и распространены по обе стороны от р. Карымская в восточную и западную стороны соответственно на 1.7 и 2.2 км [9]. Выяснение природы этих поверхностных разрывов затрудняет то обстоятельство, что в момент их образования в данном месте не было наблюдателей, и неизвестно, возникли они здесь в момент сильного землетрясения в 10 км от его инструментального эпицентра или после него.

Вероятный механизм и связь извержений Карымского вулкана, в кальдере вулкана Академии Наук и землетрясений с  $M \leq 6.9$ , которые происходили 01–02.01.1996 г. в Карымском вулканическом центре, рассматривались в ряде работ [2, 20, 22 и др.] Отметим далее некоторые особенности связанные с деформациями земной поверхности.

По геодезическим измерениям в Карымском вулканическом центре в период 1983–1988 гг. происходило растяжение земной поверхности, которое было максимальным в районе между вулканами Карымский и Академии Наук [13]. Это могло

быть вызвано нарастанием давления в коровом магматическом очаге Карымского вулканического центра и, как следствие, растяжением земной поверхности над центром давления (предположительно в это же время могло происходить воздымание земной поверхности над центром давления). Растяжение в главной разломной зоне северо-восточного направления могло создать благоприятные условия для внедрения базальтовой магмы из корового очага.

Одновременно шла подготовка к вершинному извержению Карымского вулкана 01.01.1996 г. Под его юго-восточным склоном начались микроземлетрясения. Судя по расположению гипоцентров землетрясений во времени [2], шел процесс образования трещин в зоне перемычки между кальдерами вулканов Карымский и Академии Наук и далее по направлению с севера на юг. Это могло приблизить время возникновения сильного вулканотектонического землетрясения в южной части Карымского вулканического центра, подготовленного независимыми тектоническими процессами. Здесь, через 4 ч после начала роя землетрясений, 01.01.1996 г. в 21 ч 57 мин камчатского времени произошло землетрясение с  $M = 6.9$  (рис. 3–5). Его глубина по приближенным оценкам около 10 км. Через несколько часов началось извержение Карымского вулкана. Заметим, что в этой части Карымского вулканического центра периодически происходят землетрясения средней силы (1977 г.  $M = 4.6$ ; 1978 г.  $M = 5.5$ ) без видимой связи с извержениями Карымского вулкана [2].

Произошедшее сильное землетрясение 01.01.1996 г.,  $M = 6.9$ , вероятно, облегчило внедрение базальтовой магмы из корового очага в разломную зону по одной из трещин, которая стала главной питающей дайкой извержения.

Базальты вышли на поверхность в самой низкой точке трещины на дне Карымского озера. При внедрении дайки произошло растяжение поверхности на 2.5 м и локальное опускание в узкой разломной зоне (рис. 2, 7). В то же время борта этой зоны остались поднятыми. Такое могло произойти, если раздробленная трещинами узкая зона, прилегающая к главной трещине растяжения, просела в нее под собственным весом. По геодезическим данным, примерный объем опусканий площади размером  $1 \times 4$  км в среднем на 0.5 м составляет  $0.002$  км<sup>3</sup>. Объем пустой верхней полости питающей трещины мог быть приблизительно таким же и равняться  $1 \times 2000 \times 1000$  м =  $2 \times 10^6$  м<sup>3</sup>.

Измеренные относительные вертикальные подвижки реперов, расположенных у подножья конуса вулкана Карымский (рис. 6, 7), могли быть вызваны источником давления сферической и цилиндрической формы, периферическим магматическим очагом, находящимся под конусом и кальдерой вулкана Карымский.

Большие опускания реперов вблизи центра извержения в Карымском озере (рис. 7, 8) наблюда-



лись в том месте, где при внедрении базальтов по трещине извержения произошло максимальное растяжение земной поверхности на величину около 3 м (рис. 2).

В целом, по данным прямых измерений горизонтальных и вертикальных составляющих деформаций земной поверхности, слежения за их изменениями, а также вулканологических и сейсмологических данных [20 и др.], последовательность событий и наиболее вероятные причины, вызвавшие деформации, могли быть следующие.

1. Длительно существующее избыточное давление в коровом магматическом очаге на глубине около 18 км под Карымским вулканическим центром, который связан с глубинным мантийным источником магм, в период 1983–1995 гг. вызвало растяжение земной поверхности между вулканами Карымский и Академии Наук.

2. Началось увеличение давления в периферическом магматическом очаге под Карымским вулканом. Это вызвало микроземлетрясения под вулканом, которые распространились на юг вдоль ослабленной разломной зоны в сторону вулкана Академии Наук.

3. 01.01.1996 г. произошло вулканотектоническое сильное землетрясение,  $M = 6.9$ , в 10 км южнее Карымского озера на глубине около 10 км, которое последовало через 4 ч за сейсмической активизацией области, находящейся между вулканами Карымский и Академии Наук.

4. Сильное землетрясение ускорило начало эксплозивного извержения Карымского вулкана, первые признаки которого были замечены через несколько часов после землетрясения.

5. Произошедшее сильное землетрясение и его разломы облегчили внедрение магмы по трещинам из корового магматического очага в ослабленную разломную зону, которая протягивается вдоль Восточно-Камчатского вулканического пояса через вулканы Карымский и Академии Наук. Прорыв базальтов к поверхности произошел в том участке этой зоны, который располагается между вулканами Карымский, Академии Наук, их кальдерами и периферическими очагами. Ширина разломной зоны на этом участке около 1 км.

Примерно через 14 ч после сильного землетрясения базальтовая магма, внедрявшаяся по одной из трещин, достигла поверхности в самой низкой ее части на дне Карымского озера, где началось фреатомагматическое извержение, которое длилось около суток.

## ВЫВОДЫ

1. Деформации земной поверхности в Карымском вулканическом центре произошли в результате увеличения давления в его магматическом очаге в 1972–1995 гг., центр которого находился на глу-

бине примерно 18 км, и действия трех почти одновременных событий: сильного поверхностного землетрясения,  $M = 6.9$ , начала очередного, после 13-летнего покоя, периода извержения андезитодацитового вулкана Карымский, прорыва базальтов и кратковременного извержения в кальдере вулкана Академии Наук с образованием поверхностных разрывов (трещин).

2. Геодезическими измерениями в 1988 г. были обнаружены деформации, величиной до  $8 \times 10^{-6}$  в год, растягивавшие земную поверхность преимущественно по широтному направлению на местности между кальдерами вулканов Карымский и Академии Наук и южнее. Они продолжались в 1992–1995 гг. и были предваряющими признаками извержения 1996 г. в этом районе.

3. Очередной период активности вулкана Карымский, длившийся с 1996 г. по настоящее время (февраль 2008 г.), предварялся растяжением земной поверхности в окрестностях его конуса преимущественно по северо-восточному направлению со скоростью  $3.5 \times 10^{-6}$  в год. Предположительно растяжение началось в 1991 г. При этом подножье конуса вулкана опускалось в 1991–1993 гг. со скоростью 5 мм в год, но в 1995 г. оно поднялось по сравнению с уровнем 1992 г. на 5 мм. Такой подъем являлся одним из предвестников начала извержения вулкана Карымский.

4. Извержение вулкана Карымский в 1996–2003 гг. происходило в условиях растяжения и опускания земной поверхности в окрестностях конуса вулкана и его кальдеры. В период с 04.1996 г. по 10.1998 г. на участке размером  $3 \times 5$  км, расположенном в юго-восточной стороне от конуса вулкана и включающем выходы горячих источников в чашеобразной долине в 1–2 км от истока р. Карымская, происходило растяжение со скоростью  $4.1 \times 10^{-6}$  в год. С 1999 по 2003 гг. деформации растяжения ослабевали, и средняя скорость их была  $+1.8 \times 10^{-6}$ . В период с 10.2003 г. по 10.2005 г. значимых, превышающих ошибку определения горизонтальных подвижек не обнаружено. В то же время, по данным нивелирования, юго-восточное подножье конуса вулкана начало воздыматься. Величина вертикального смещения репера за два года составила +15 мм (рис. 9).

5. Эпицентр землетрясения 01.01.1996 г.  $M = 6.9$  в Карымском вулканическом центре находился, по геодезическим данным, вблизи области сжатия верхних слоев земной коры.

6. Самыми большими деформациями земной поверхности, которые наблюдались геодезическими методами в Карымском вулканическом центре в 1972–2005 гг., были горизонтальные растяжения поверхности величиной до 3 м, произошедшие в месте прорыва базальтов и их извержения 02.01.1996 г. между вулканами Карымский и Академии Наук. Расстояние между кратером вул-

кана Карымский и кратером фреатомагматического извержения в Карымском озере, одновременно извергавшихся 02.01.1996 г., равно 6.5 км. Длина главной трещины, протянувшейся от кратера подводного извержения к вулкану Карымский, около 2.5 км. Эта трещина прорыва базальтов образовалась над центром давления, находящимся в коровом магматическом очаге на глубине 18 км.

7. В заключение отметим, что деформационные процессы в Карымском вулканическом центре могут быть всесторонне изучены в процессе непрерывных геодезических измерений на всей площади. В первом приближении они могут быть определены путем дискретных геодезических измерений. Непрерывные измерения практически невозможны без их автоматизации. Измерения на всей площади требуют значительных финансовых затрат. Знания деформаций и их дальнейшего развития на всей площади Карымского вулканического центра важны и необходимы для понимания процессов внедрения магмы в верхние слои земной коры, глубины, размеров, механизма деятельности магматических очагов, механизма и опасности вулканических извержений.

Авторы выражают благодарность В.В. Юдину, А.В. Бабенко, К.М. Магуськину, Н.Н. Титкову, В.М. Мирошникову, В.В. Пилипенко и всем сотрудникам геодезического отряда Карымской экспедиции Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН за участие в проведении полевых геодезических измерений в Карымском вулканическом центре в 1996–2005 гг. и помощь в обработке материалов.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ № 05-05-64730а, 06-08-08169 и Программы № 16 фундаментальных исследований Президиума РАН, проект 2.7.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вулкан Карымский. Сейсмические, геодинамические и поствулканические процессы. Проблемы краткосрочного прогнозирования начала извержения // Новейший и современный вулканизм на территории России. М.: Наука, 2005. С. 510–542.
2. Гордеев Е.И., Дроздин Д.В., Касахара М. и др. Сейсмические явления, связанные с извержениями вулканов Карымский и в кальдере Академии Наук // Вулканология и сейсмология. 1998. № 2. С. 28–48.
3. Иванов Б.В. Извержение Карымского вулкана в 1962–1965 гг. и вулканы Карымской группы. М.: Наука, 1970. 133 с.
4. Иванов Б.В., Брайцева О.А., Зубин М.И. Вулкан Карымский // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 182–203.
5. Иванов В.В. Прогнозы крупных извержений вулканов на Камчатке и их оправдываемость // Вестник ДВО РАН. 2003. № 5. С. 97–107.
6. Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтияров В.Ф. и др. Современные движения земной коры на Камчатке и их связь с сейсмической и вулканической активностью // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки / К 25-летию Камчатской опытно-методической сейсмологической партии. Петропавловск-Камчатский. Камчатский печатный двор, 2004. С. 113–135.
7. Левин В.Е., Магуськин М.А., Бахтияров В.Ф. и др. Мультисистемный геодезический мониторинг современных движений земной коры на Камчатке и Командорских островах // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 54–67.
8. Леонов В.Л. Поверхностные разрывы, связанные с землетрясением и извержениями, произошедшими в Карымском вулканическом центре 1–2 января 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 113–129.
9. Леонов В.Л. Теоретические схемы и реальность: условия разрывообразования в Восточно-Камчатском вулканическом поясе // Геофизический мониторинг Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Оттиск, 2006. С. 194–201.
10. Магуськин М.А. Смещения земной поверхности в районе Карымского вулкана по измерениям 1972–1974 гг. // Современные движения земной коры. Исследования на геодинамических полигонах. Новосибирск: Наука, 1978. С. 45–50.
11. Магуськин М.А., Левин В.Е. Геодезический мониторинг деформаций земной коры в Карымском вулканическом центре // Проблемы эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный): Матер. первого международного симпозиума 25–30 марта 2006 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006. С. 157–165.
12. Магуськин М.А., Федотов С.А., Левин В.Е., Бахтияров В.Ф. Деформации земной поверхности в связи с сейсмической и вулканической активностью Карымского вулканического центра в январе 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 97–112.
13. Магуськин М.А., Шароглазова Г.А. Деформации земной поверхности Карымского вулканического центра // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С. 90–110.
14. Магуськин М.А., Энман В.Б., Селезнев Б.В., Шкред В.И. Особенности смещений земной поверхности на вулкане Карымский по геодезическим и фотограмметрическим данным за период 1970–1981 гг. // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 49–64.
15. 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. 38–71.
16. Селянгин О.Б. Петрогенезис базальт-дацитовый серии в связи с эволюцией вулканоструктур. М.: Наука, 1987. 148 с.

17. *Селянгин О.Б., Брайцева О.А.* Вулкан Малый Семячик // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 162–176.
18. *Токарев П.И.* Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164 с.
19. *Токарев П.И.* Извержения и сейсмический режим Карымского вулкана в 1965–1986 гг. // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 3–13.
20. *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. 3–36.
21. *Хренов А.П., Дубик Ю.М., Иванов Б.В. и др.* Эруптивная деятельность вулкана Карымский за 10 лет (1970–1980) // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 29–40.
22. *Zobin V.M., Levina V.I.* Rupture history of the January 1, 1996, Ms 6.6 volcanic earthquake preceding the simultaneous eruption of Karymsky and Akademia Nauk volcanoes in Kamchatka, Russia // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. № B8. P. 18315–18324.

## **Deformations Related to a Large ( $M = 6.9$ ) Earthquake, the Magma Discharge, and Eruptions in the Karymskii Volcanic Center in 1996–2005**

**M.A. Maguskin<sup>1</sup>, S.A. Fedotov<sup>1</sup>, V.E. Levin<sup>2</sup>, V.F. Bakhtiarov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

<sup>2</sup>*Kamchatka Branch, Geophysical Service, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

A network of interconnected observation sites was established in the entire Kamchatskii Volcanic Center and near the active Kamchatskii Volcano, Kamchatka in 1971–1988 with a view to studying ground deformation. Multiple observations by this network yielded quantitative characteristics of the ground deformation related to the following phenomena: the eruption of Karymskii Volcano during the periods 1976–1982 and January 1, 1996, to 2005 (still going on, written in February 2008); the discharge of basalt on January 2, 1996, in the bottom of Lake Karymskii situated in the caldera of Akademii Nauk Volcano (that volcano had previously been thought to be extinct) and the subsequent phreatomagmatic eruption lasting about one day; the large ( $M = 6.9$ ) earthquake of January 1, 1996, at 21 h 57 min local time in the Karymskii Volcanic Center at a depth of  $\sim 10$  km. This paper discusses the relationship of ground deformation to volcanic activity and the abovementioned unique natural occurrences, and their mechanism as deduced from geodetic data.