

## ГЕОДЕЗИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ В КАРЫМСКОМ ВУЛКАНИЧЕСКОМ ЦЕНТРЕ

М. А. Магуськин<sup>1</sup>, В. Е. Левин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия, magma@kscnet.ru

<sup>2</sup>Камчатский филиал ГС РАН Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия, lev@emsd.iks.ru

Карымский вулканический центр в настоящее время является активной геологической структурой в восточном вулканическом поясе Камчатки. Расположенный в этом центре одноименный вулкан Карымский является одним из самых активных вулканов Камчатки в XX веке. Очередное извержение вулкана Карымский началось 1 января 1996 г. и с небольшими перерывами продолжается до настоящего времени.

С целью получения количественных характеристик движений земной поверхности, в том числе горизонтальных и вертикальных составляющих деформаций земной коры вблизи извергающегося вулкана Карымский, здесь в 1971 г. Институтом вулканологии ДВО РАН были начаты работы, первоначально, с закладки густой сети реперов для нивелирований и центров для триангуляционных наблюдений. За первый же год было заложено 54 геодезических знака. За положением этих реперов и центров велись ежегодные наблюдения с 1972 г. Первые же повторные измерения показали, что все геодезические знаки находятся в зоне значимых, по-видимому, локальных деформаций земной коры. Возникла настоятельная необходимость увеличить площадь «опрашиваемой» территории в пределах всего вулканического центра. Эту задачу по заданию ДВО РАН выполнило Дальневосточное аэрогеодезическое предприятие (ДВ АГП) в 1975, 1977, 1983, 1988 гг., причем каждый раз площадь опроса увеличивалась, так как по измерениям 1975, 1977, 1983 гг. не удалось обнаружить примерную границу распространения значимых подвижек пунктов, пока в 1983 и 1988 гг. «опрашиваемые» пункты не были «вынесены» за границу вулканического центра в северо-западном направлении (рис. 1).

### Методы исследования

1. Вертикальные подвижки земной поверхности в южном секторе подножия вулкана Карымский изучались нивелированием I класса с погрешностью  $7 \cdot 10^{-7}$ , т. е. с уверенной возможностью обнаружения вертикальных смещений, превышающих 2 мм на базе 1 км. Аналогичные подвижки на конусе вулкана и преимущественно вокруг него определялись методом тригонометрического нивелирования с погрешностью  $\pm 4-5$  см.

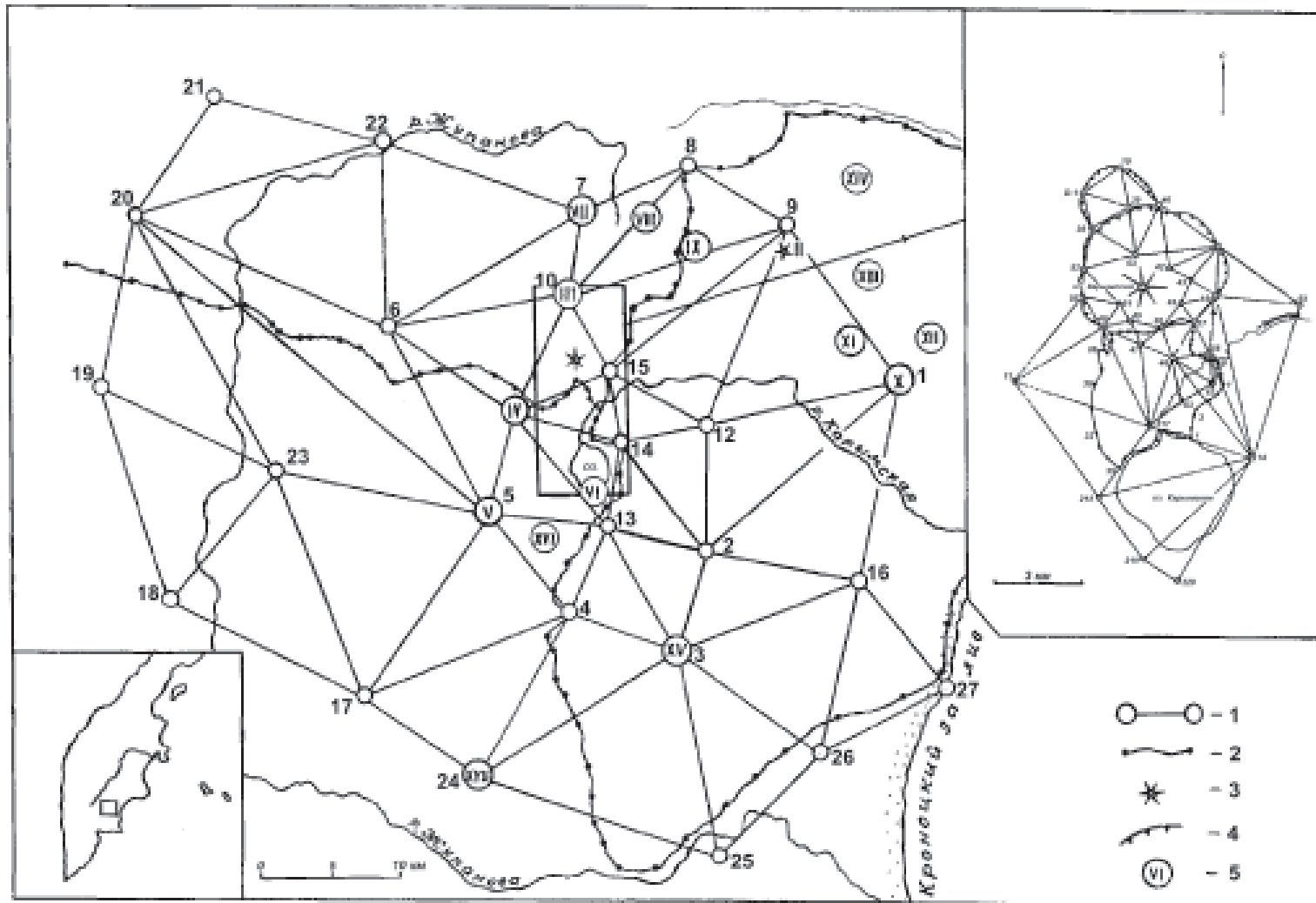
2. Горизонтальные деформации земной поверхности, выражающиеся в плановых смещениях геодезических центров, определялись в 1972-1982 гг. методом повторных измерений в линейно-угловой триангуляции (рис. 1, вставка), где углы измерялись с погрешностью  $\pm 2.0''$ , а линии, если не все, то с применением светодальномера СГ-3 с погрешностью  $\pm (4 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} \text{ Д})$ , где Д измеряемое расстояние в мм), если все, то светодальномером ЕОК-2000 с погрешностью  $\pm 2-3$  см. Начиная с 1986 г. линии измерялись высокочастотным светодальномером СП-2 с погрешностью  $\pm (2 \text{ мм} + 110^{-6} \times \text{Д})$ .

3. ДВ АГП измерения в геодезической сети с сравнительно большими сторонами (рис. 1) выполнены в соответствии с рекомендациями [4] и их качество характеризуется такими данными:

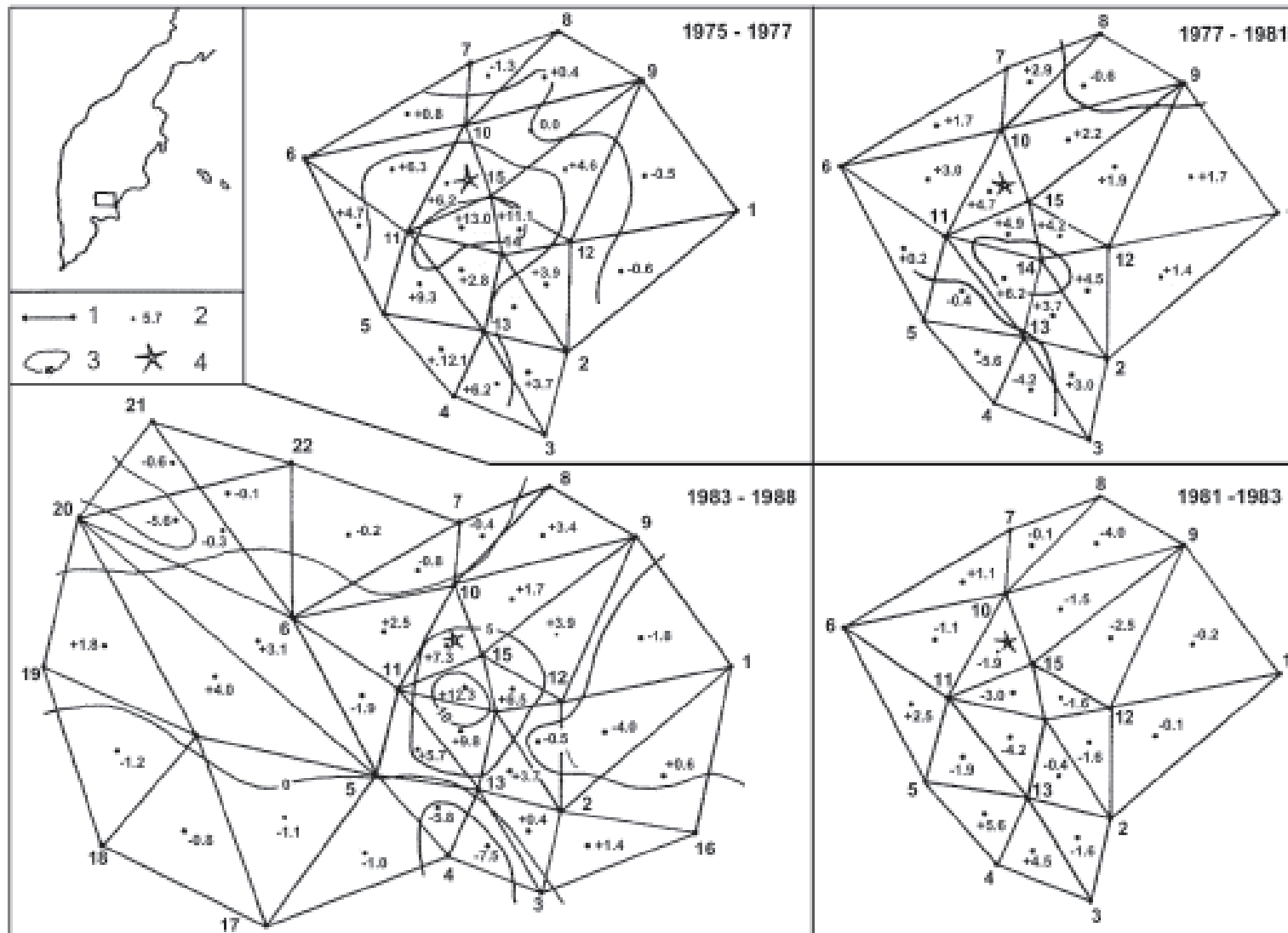
а) средняя квадратическая ошибка измерения угла, вычисленная по невязкам в треугольниках, колебалась в пределах от 0.46 до 0.84";

б) погрешность измерения линий была  $\pm (0.9-1.5) \times 10^{-6} \times \text{Д}$ .

Как особенность математической обработки результатов измерений отметим, что в сети со множеством избыточных измерений уравнивались разности измеренных



**Рис. 1.** Схема геодезических работ в Карымском вулканическом центре. 1-сторона линейно-угловой триангуляции; 2-линии высоточного нивелирования; 3-действующие вулканы; 4-кальдера вулкана Карымский; 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).



**Рис. 2.** Относительные изменения площадей плоских фигур (треугольников) - дилатации в периоды 1975-1988 гг. 1 - сторона линейно-угловой триангуляции; 2 - дилатации в ед.  $10^{-6}$ , 3 - изолинии равных дилатаций, 4 - вулкан Карымский.

направлений и сторон без привлечения гипотезы о неизменности координат каких-либо пунктов и азимутов сторон.

4. С 1996 г. при определении горизонтальных деформаций земной поверхности в Карымском вулканическом центре измерение углов теодолитами не выполняется. Осуществлен переход на спутниковые методы определения. Преимущества их общеизвестны, однако, по-прежнему используются светодальномеры, так как при этом надежные результаты получаются почти мгновенно, что важно при изучении быстропротекающих процессов, какими являются вулканические извержения.

### **Результаты и их обсуждение**

Кратковременные (по сравнению с длительностью геологических процессов) дискретные геодезические измерения, выполненные в 1972-1995 гг. в Карымском вулканическом центре, дали следующие сведения о деформациях земной поверхности в нем:

1. В Карымском вулканическом центре преобладают деформации растяжения преимущественно по направлению, перпендикулярному оси Курило-Камчатской сейсмофокальной зоны. Особо значимые растяжения происходят во время роев вулканотектонических землетрясений [2].

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 (рис. 2).

3. Геометрический центр максимальных деформаций в период 1975–1988 гг. практически совпал с эпицентром сильнейшего ( $M=7.0$ ) землетрясения, произошедшего здесь 1 января 1996 г.

Ежегодные геодезические измерения вблизи действующего вулкана Карымский на площади примерно  $5 \times 10$  км более детально характеризуют относительные деформации земной поверхности. Они таковы:

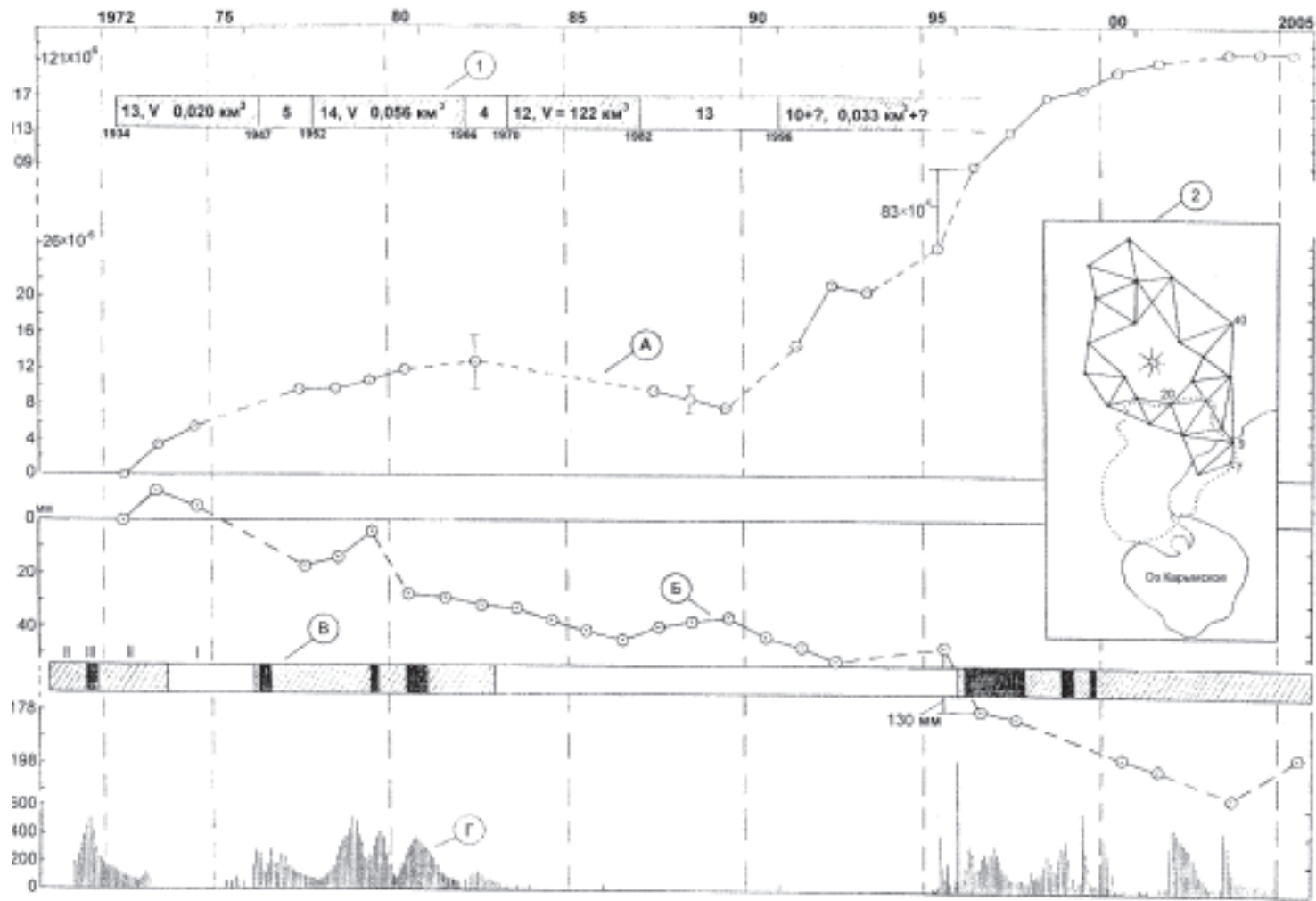
1. В период с 1972 по 1995 гг. произошло общее относительное погружение площади, включающей вулкан Карымский (рис. 3). Оно происходило симметрично относительно кратера вулкана в пределах кальдеры. Объем проседания за 23 года составляет около  $0.057 \text{ км}^3$  [2, 3].

2. Эксплозивная деятельность вулкана сопровождалась продолжительными пульсациями уровня земной поверхности у подножия конуса на фоне относительного общего проседания.

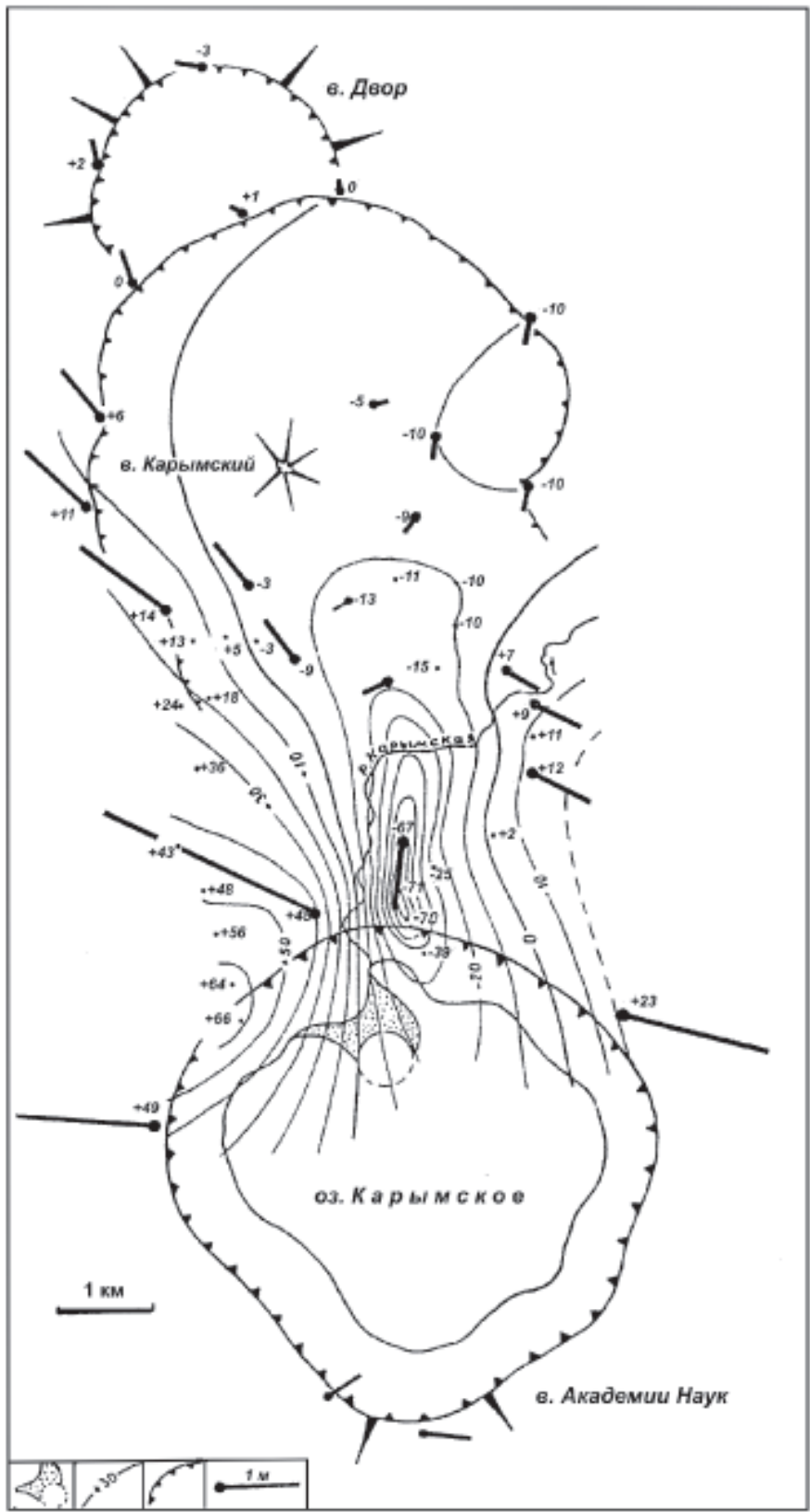
3. Наблюдаемое поле вертикальных подвижек вблизи вулкана Карымский в период 1972 – 1995 гг. удовлетворительно моделировалось сферическим источником давления под вулканом, верхняя граница которого не ближе 1,5 км от поверхности земли [1].

4. В происхождении горизонтальных деформаций вблизи вулкана Карымский трудно выделить главную причину. По-видимому, они связаны, в первую очередь, с глобальным геодинамическим процессом, происходящим в Камчатской зоне субдукции и охватывающим весь Восточный вулканический пояс Камчатки, и во вторую очередь, – с изменениями напряжений в магмаподводящей системе и роями местных коровых землетрясений. Извержения с излияниями лавы, как правило, происходят в период, когда наблюдается растяжение земной поверхности. В то же время в период 1986 – 1995 гг., когда вулкан находился в покое, на его юго-восточном подножье, включая район выхода гидротермальных источников, происходило практически всестороннее растяжение земной поверхности со скоростью  $3 \times 10^{-6}$  в год.

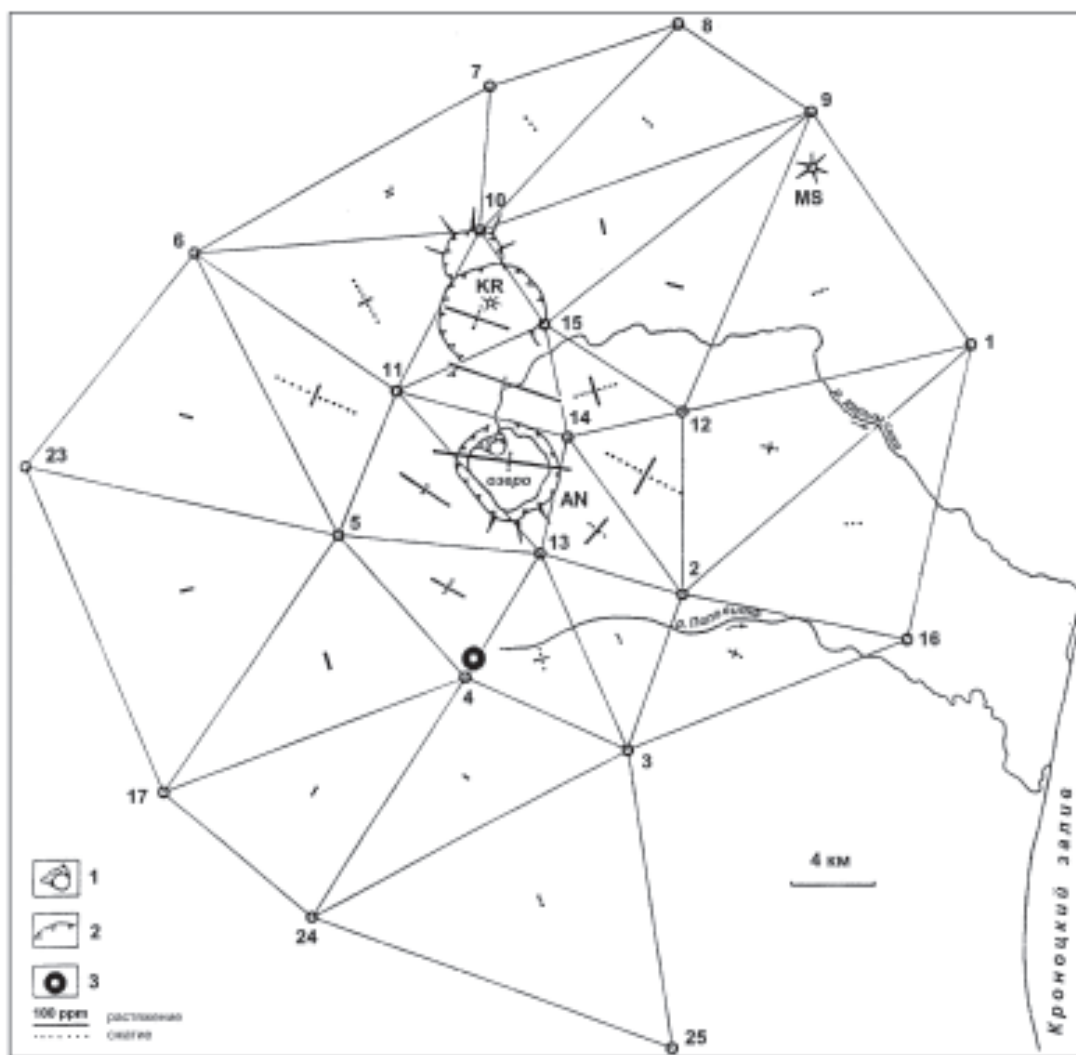
О деформациях земной поверхности, произошедших после событий 1 января 1996 г. в Карымском вулканическом центре, следует сказать особо. Во-первых, очередное извержение вулкана Карымский ожидалось по сейсмическим данным, о чём сотрудниками В.В.Ивановым (ИВ ДВО РАН) и А.В. Сторчеусом (ИВГиГ ДВО РАН) был дан среднесрочный прогноз. Данные измерений вертикальных подвижек у подножия конуса не противоречили этому прогнозу, так как они сменили свой знак, т.е. опускание подножия конуса сменилось воздыманием (рис. 3). Во-вторых, сильное землетрясение с  $M=7,0$  в Карымском вулканическом центре не ожидалось, так как такие землетрясения в вулканических районах Камчатки не наблюдались в историческое время. Не было даже предположения о том, что в кальдерном озере вулкана им. Академии Наук в близком будущем



**Рис. 3.** Сопоставление движений земной поверхности с активностью вулкана. а – ход средних значений относительных (в ед.  $10^{-6}$ ) изменений длин линий в линейно-угловой сети; б – ход вертикальных смещений репера 20 относительно пункта 40 (по 1996 г.) и далее относительно репера 9; в – активность вулкана: I – фаза покоя; II – фаза взрывного извержения; III – фаза эффузивно-взрывного извержения (по классификации П.И. Токарева); г – еже-суточное число взрывных землетрясений (тип  $N_4$  по П.И.Токарева). Вставкой показаны: 1 - периоды активности и покоя вулкана за время его систематического изучения (указано количество излившейся лавы). 2 - схема линейно-угловой сети геодезических пунктов и линия нивелирования.



**Рис. 4.** Горизонтальные и вертикальные смещения земной поверхности в Карымском вулканическом центре в связи с землетрясением 01.01.1996 г. с  $M=7.0$  и началом одновременных извержений вулкана Карымский и в кальдере Академии Наук. 1 - кратер подводного извержения в кальдере Академии Наук и новый полуостров, образовавшийся при извержении; 2 - линии равных вертикальных движений в см; 3 - границы кальдер; 4 - направление горизонтальных подвижек пунктов и их масштаб (они определены относительно пункта 7 и направления 7-8, см. рис. 1).



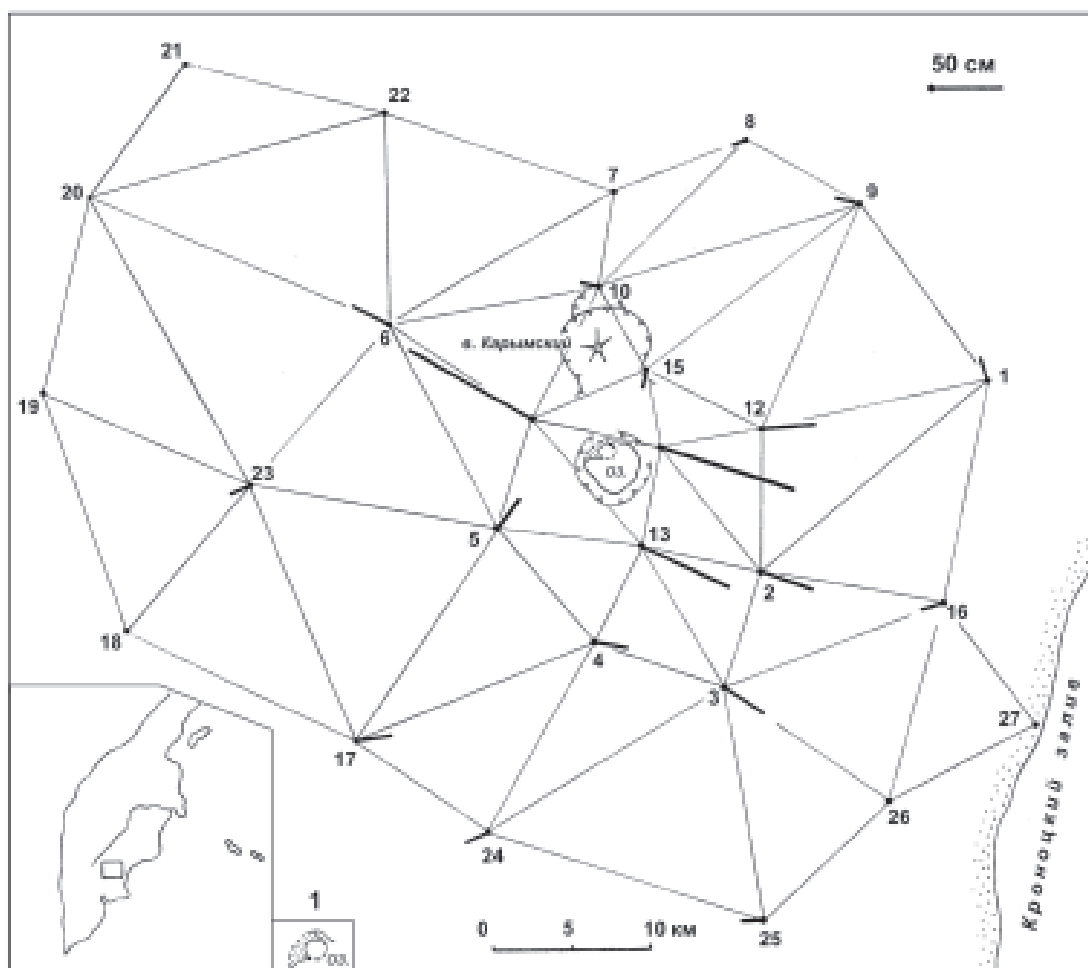
**Рис. 5.** Направления главных осей плоской деформации и их величины в Крымском вулканическом центре в 1988-1996, 1997, 1999, 2000 гг. 1- кратер подводного извержения в кальдере Академии Наук и новый полуостров, образовавшийся при извержении; 2 - кальдера; 3 - эпицентр главного землетрясения 1 января 1996 г. с  $M=7.0$ ; 4 - масштаб плоской деформации. Вулканы: KR -Крымский, AN - Академии Наук, MS - Малый Семячик.

может произойти кратковременное вулканическое извержение. Повторные геодезические измерения 1996-1997 гг., выполненные сразу после этих событий, показали следующее:

1. На местности обозначилась локальная область максимальных деформаций. Она находится между кальдерами вулканов Крымский и Академии Наук, вытянута по направлению север-юг и имеет ширину в несколько километров. Южная граница этой вытянутой области максимальных деформаций пока не определена, так как она скрыта водами Крымского озера.

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, расположенного в 1.5 км к северу от центра подводного извержения равна 0.71 м. Борты зоны проседания испытали неодинаковый по амплитуде подъем: западный борт на 60 – 70 см, восточный – на 20–30 см (рис. 4).

3. Кроме сравнительно небольшой площади, где деформации растяжения превысили предел упругости горных пород и сопровождалась разрывами, измерениями по GPS-технологии определены области (площади), где горизонтальные деформации превысили величину  $5 \times 10^{-6}$ . При этом подвижки пунктов триангуляции определялись относительно



**Рис. 6.** Горизонтальные подвижки пунктов линейно-угловой триангуляции в Карымском вулканическом центре в 1988, 1997, 1999, 2000 гг.

пункта 7 (рис. 6), т. е. при вычислении координат остальных пунктов по данным измерений, как 1988 г. так и 1996–2000 гг., координаты п.7 и дирекционный угол стороны 7–8 принимались неизменными. Направления главных осей плоской деформации в треугольниках (рис. 5) и дилатации (изменения площади) в них (рис. 7) вычислялись по уравненным разностям измеренных длин сторон.

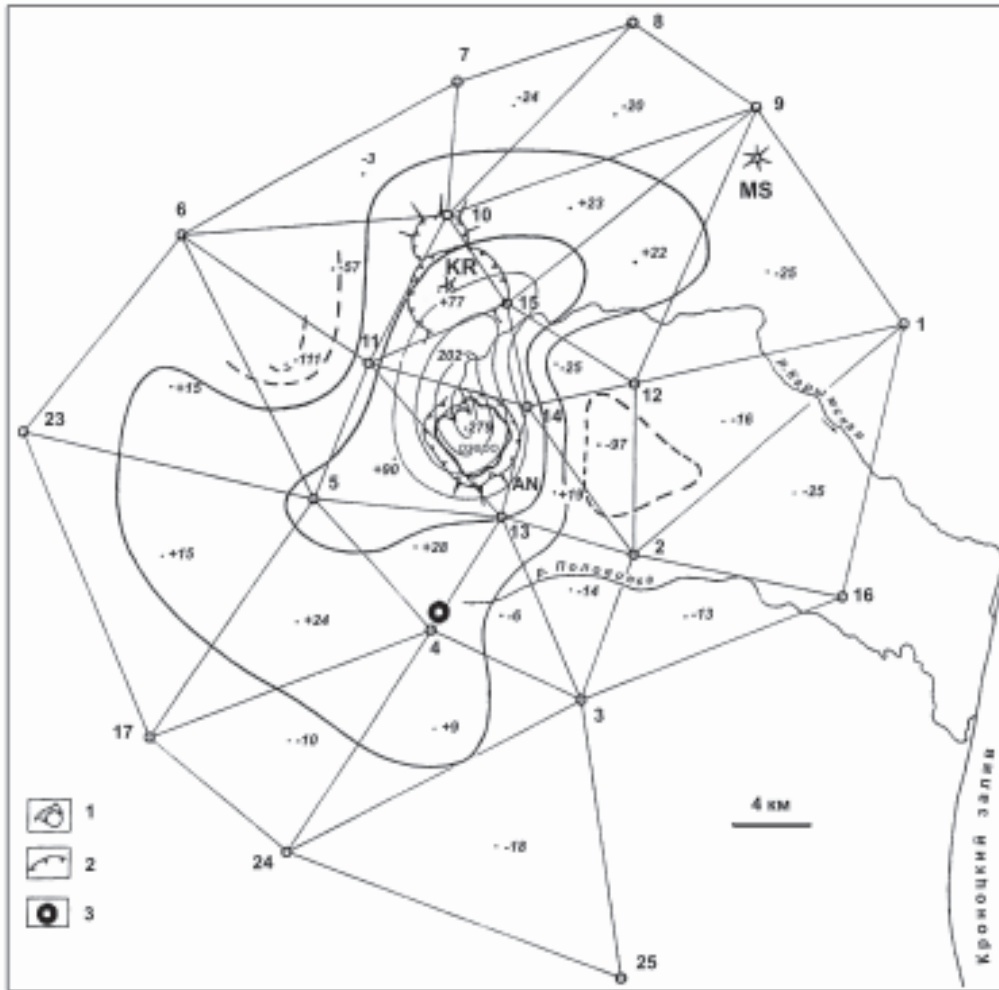
### **Заключение**

Карымский вулканический центр включает 17 вулканов, два которых действующие - Карымский и Малый Семейчик. На сегодняшний день Карымский вулканический центр является самым изученным в России с точки зрения полученных геодезическими методами количественных данных о движениях земной поверхности в нем. Здесь произошел плавный переход от классических приемов геодезических измерений к спутниковым методам наблюдений за движениями и деформациями блоков земной коры без потери точности определений этих данных. Кроме полученных ценных результатов этих исследований, опыт и постановка геодезических работ в Карымском вулканическом центре, с нашей точки зрения, могут быть весьма полезны при организации подобных исследований на других вулканах.

### **Список литературы**

1. Магуськин М.А., Энман В.Б., Шкред В.И. Особенности смещения земной поверхности на вулкане Карымский по геодезическим и фотограмметрическим данным за период 1970–1981 гг. // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 49–64.





**Рис. 7.** Относительные изменения площадей плоских фигур (треугольников) - дилатации в Карымском вулканическом центре в 1988, 1997, 1999, 2000 гг. в ед.  $10^{-6}$  (указаны в центре треугольников и изолиниями по площади). Обозначения те же, что на рис. 4.

2. Магуськин М.А., Шароглазова Г.А. Деформации земной поверхности Карымского вулканического центра. // Вулканология и сейсмология. 1992. № 4. С. 90-110.
3. 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.
4. Методическое руководство по геодезическим работам на прогностических полигонах. М.: ЦНИИГАиК, ГУГК СССР, 1983.

## GEODESIC MONITORING OF GROUND DEFORMATION AT THE KARYMSKY VOLCANIC CENTER

M. A. Maguskin<sup>1</sup>, V. E. Levin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Volcanology and Seismology FED RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006, e-mail: magma@kscnet.ru

<sup>2</sup>Kamchatkan Branch of the Geophysical Survey of the RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006

The paper presents some results on geodetic monitoring of ground deformation in the Karymsky volcanic center, and, in particular the area of active Karymsky volcano.