

УДК 551.24 + 528.2/3

ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ИЗВЕРЖЕНИЕ ВУЛКАНА КАРЫМСКИЙ 1996 г. (КАМЧАТКА)

© 2013 М.А. Магуськин¹, Н.Н. Титков²

¹Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;
e-mail: magma@kscnet.ru

²Камчатский филиал ГС РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006

На основании инструментальных измерений показано, что значимые горизонтальные деформации растяжения земной поверхности начались за 6 лет до извержения вулкана Карымский 01.01.1996 г. и происходили со скоростью $4 \cdot 10^{-6}$ Д в год, где Д расстояние в мм. После событий в январе 1996 г. характер деформаций не менялся в течении 7 лет. По-прежнему продолжалось растяжение земной поверхности со скоростью примерно $3 \cdot 10^{-6}$ Д в год. В 2003 г. растяжение сменилось сжатием, достигшим к 2007 г. величины $7.5 \cdot 10^{-6}$ Д в год. Время начала сжатия примерно совпадает со временем прекращения излияния небольших порций лавы из кратера. После 2007 г. наблюдаются знакопеременные деформации. Растяжение сменяется сжатием и наоборот. Этому периоду соответствует извержение вулкана без излияния лавы со слабой эксплозивной деятельностью.

Ключевые слова: измерения, реперы, движения, земная поверхность, извержение.

ВВЕДЕНИЕ

Вулкан Карымский находится в 125 км на северо-восток от г. Петропавловска-Камчатского (врезка на рис. 1). Его координаты: $54^{\circ} 02.7'$ с.ш., $159^{\circ} 26.4'$ в.д. и. Очередное извержение вулкана, продолжающееся до сих пор, началось 2 января 1996 г. (Муравьев и др., 1997). Деятельность его с 2004 г. характеризуется эксплозиями без излияния лавовых потоков.

В публикации (Магуськин и др., 2008) основное внимание было уделено большим горизонтальным и вертикальным деформациям, сопровождавших сильное ($M_w=6.3$) землетрясение в Карымском вулканическом центре (Гордеев и др., 1998) и начавшиеся извержения вулкана Карымский и в Карымском кальдерном озере (Муравьев и др., 1997). Предваряющие события деформации там не рассматривались. Настоящая статья призвана закрыть допущенный пробел путем детального анализа изменений длин линий (наклонных дальностей), полученным по измерениям светодальномерами СП-2 и GPS наблюдениям.

практике стали использовать технологию определения координат по наблюдениям за изменением фазы сигналов глобальной навигационной системы GPS. При GPS измерениях прямая видимость между пунктами не нужна. Как результат, наклонные дальности определяются между всеми одновременно работающими приемниками. По сведениям о паспортной точности измерений дистанций двухчастотными GPS приемниками, казалось, что достаточно на двух точках вести непрерывные, одновременные наблюдения в течении коротких 4-5 часовых сеансов и наклонная дальность определится с погрешностью 10^{-6} Д и лучше. Однако, контроль результатов по прямым измерениям коротких линий (1-3 км) светодальномером СП-2 показали, что точность в 10^{-6} Д не достижима при коротких сеансах. Сопоставимые результаты определения одних и тех же наклонных дальностей с помощью СП-2 и GPS приемников получаются тогда, когда одновременные, непрерывные GPS наблюдения делаются на пунктах не менее суток. Эти результаты приведены в таблице.

ОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯХ ДЛИН ЛИНИЙ ПО GPS ТЕХНОЛОГИИ.

С середины 90-х годов XX века в геодезической

ИЗМЕНЕНИЯ НАКЛОННЫХ ДАЛЬНОСТЕЙ ВБЛИЗИ ВУЛКАНА КАРЫМСКИЙ В ПЕРИОД 1987-2011 гг.

Измерения наклонных дальностей свето-

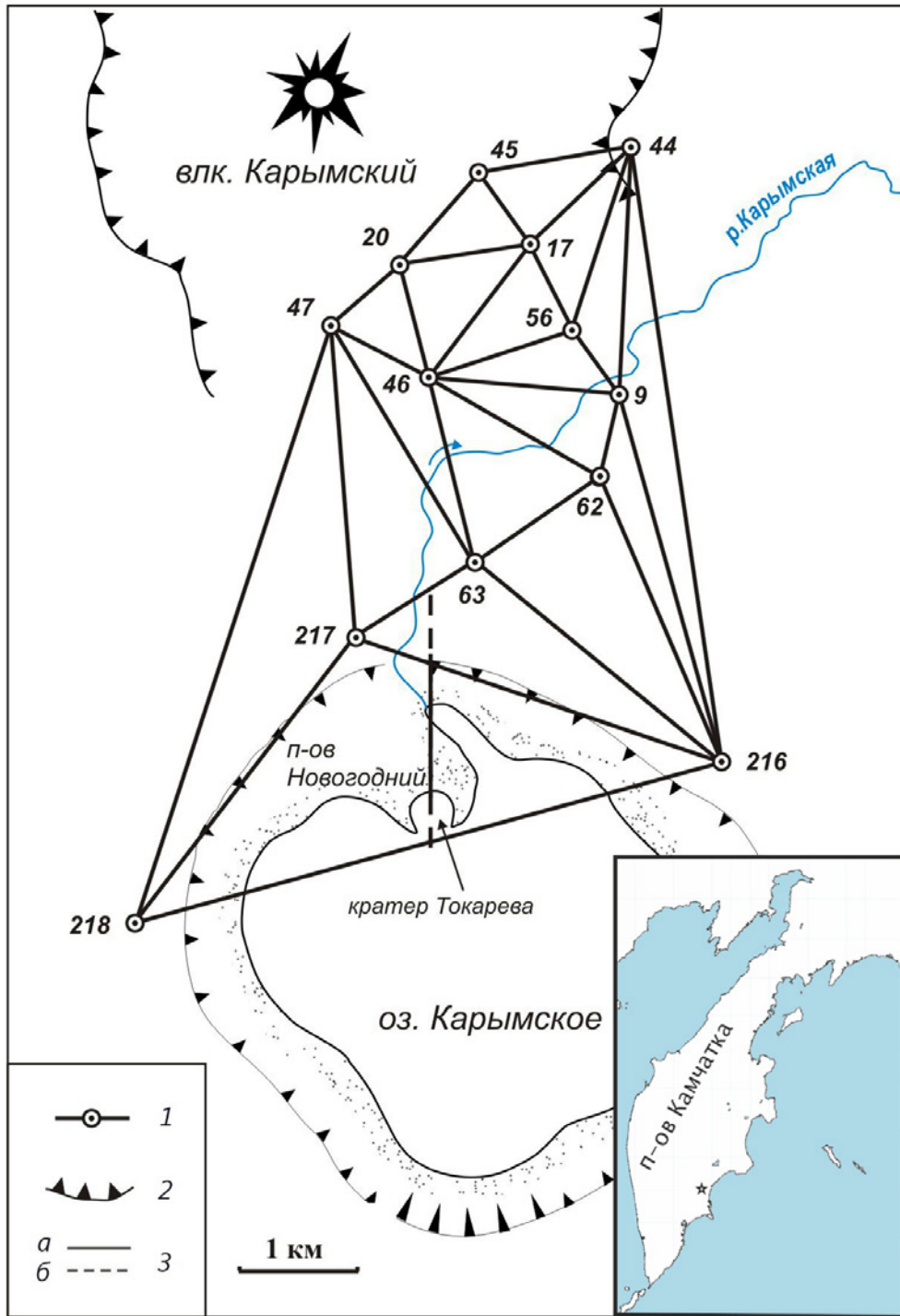


Рис. 1. Схема определения горизонтальных деформаций вблизи вулкана Карымский: 1 – линии, измеряемые светодальномерами или определяемые по GPS технологии; 2 – границы кальдер; 3 – открытая трещина на растяжения (а), трещина на ее продолжении (б). На врезке звездочкой показан район исследований.

дальномерами СП-2 и определенные по GPS технологии обоснованно можно считать однородными по точности, и их сравнение правомерно (таблица). Наклонные дальности при малых углах наклона местности практически не зависят от вертикальных подвижек величиной до дециметра, они независимы и являются исходными для получения, с привлечением других величин со своими погрешностями, горизонтальных

проложений, длин линий на поверхностях относимости. Используя их, получают взаимно увязанные координаты всех пунктов сети в любой системе координат. Однако, при последовательной передаче координат неизбежно нарастание их погрешностей по мере удаления от исходного пункта и дирекционного угла. Возникают различные для каждой эпохи развороты сети. Чаще всего из-за больших погрешностей определения

координат и разворота сети разности координат показывают ложную картину смещений пунктов. По этой причине мы их не рассматриваем. Кроме того, в областях сильных деформаций принятие какого-либо из пунктов в качестве фиксированного будет показывать фиктивное смещение всей сети в целом. Однако, изменения площадей плоских фигур (дилатации) дают объективные сведения о горизонтальных деформациях. Когда на ограниченном участке имеются данные об изменениях наклонных дальностей по многим направлениям, нет необходимости определять дилатации и направления главных осей деформаций в каждом треугольнике. Достаточно определить относительные деформации по многим направлениям и осреднить их по всему участку.

Перед извержением на юго-востоке от конуса вулкана на ограниченной территории почти ежегодно с 1987 г. измерялись наклонные дальности и определялись их изменения (рис. 2, 3) Погрешность получения каждой точки графика (рис. 2) зависит от длины линии и колеблется в пределах 3-5 мм. Данные показывают, что в

1989 г. вблизи вулкана Карымский произошла смена знака горизонтальных деформаций. Происходящее слабое сжатие сменилось на растяжение. В это же время изменился знак вертикальных деформаций, земная поверхность у подножья вулкана, подверженная слабому подъему, стала опускаться (Магуськин и др., 2008). С 1989 г. наклонные дальности явно увеличивались и за 6 лет вдоль линий 9-46 и 9-63 составили 41 и 50 мм соответственно, что на порядок превышает погрешность определения. Изменения длин других линий (рис. 3) позволяют более представительно судить о происшедших горизонтальных деформациях. Действительно, с августа 1988 г. по август 1989 г. земная поверхность, ограниченная измеренными линиями, подверглась в среднем слабому сжатию на величину - $0.6 \cdot 10^{-6}$ Д (что в пределах погрешности определения). На той же площади в период 08.1991 г. – 08.1992 г. происходит растяжение земной поверхности в среднем на $8.5 \cdot 10^{-6}$ Д (что очень значимо). В период 08.1992 г. – 08.1993 г. снова наблюдается слабое сжатие, но уже в период 08.1993 г. – 08.1995 г.

Сопоставление наклонных дальностей, измеренных в одно и то же время года светодальномером СП-2 и по GPS наблюдениям.

Год производства работ	Наклонная дальность, м		Разности, мм
	СП-2	GPS	
2000	634.357	634.359	+ 2
- // -	1669.115	1669.112	- 3
- // -	444.263	444.264	+ 1
- // -	2623.492	2623.491	- 1
2001	634.357	634.362	+ 5
- // -	1669.124	1669.124	0
- // -	444.269	444.265	- 4
- // -	1526.927	1526.925	- 2
- // -	2623.497	2623.492	- 5
- // -	1091.617	1091.622	+ 5
- // -	2233.368	2233.369	+ 1
- // -	1138.348	1138.349	+ 1
2002	634.363	634.362	- 1
- // -	1669.122	1669.124	+ 2
- // -	2233.356	2233.362	+ 6
2003	634.359	634.361	+ 2
- // -	1669.122	1669.123	+ 1
- // -	444.266	444.264	- 2
- // -	1526.928	1526.926	- 2
- // -	2623.497	2623.496	- 1
- // -	1128.388	1128.383	- 5
- // -	1138.352	1138.351	- 1
- // -	2279.754	2279.747	- 7
2004	634.361	634.362	+ 1
2005	634.361	634.360	- 1
- // -	1669.122	1669.121	- 1
- // -	444.265	444.262	- 3

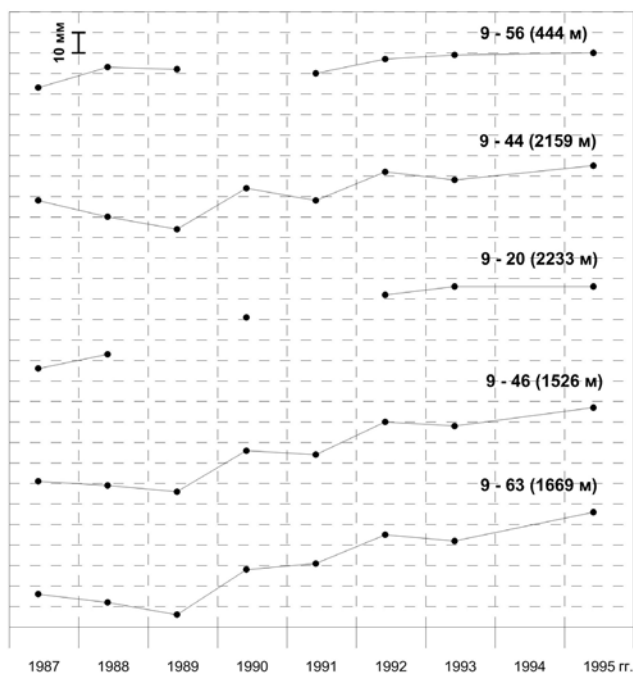


Рис. 2. Изменения длин линий (наклонных дальностей) в период 1987-1995 гг. Погрешность каждой точки равна $2 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} D$ (где D — длина линии в мм).

происходит очередное значимое растяжение на среднюю величину $6.2 \cdot 10^{-6} D$.

Данные о деформациях земной поверхности в Карымском вулканическом центре на начальном этапе извержения 02.01.1996 г. подробно обсуждались в работе (Магуськин и др., 1997). Напомним, что во время этих событий инструментально измерены самые большие деформации (горизонтальные — 2.33 м на базе 3.6 км; вертикальные — до 1 м) на вулканах Камчатки. По приведенным на врезке рис. 4 данным, вычислено среднее значение растяжения на рассматриваемом участке, которое оказалось равным $1 \cdot 10^{-4} D$. Из этого же рисунка видно, что максимальные разности горизонтальных проложений наблюдаются на линиях, расположенных в зоне появившихся на поверхности зияющих трещин, которые подробно описаны в работе (Леонов, 1997). Здесь деформации растяжения превысили прочность горных пород и достигли $3 \cdot 10^{-4} D$.

В промежутке с 1996г. по 2011г. изменения отдельных наклонных дальностей и осредненные по площади относительные горизонтальные деформации были также значимыми (рис. 3, 5). Для вычисления относительных деформаций на промежутках: 1996-1997 гг., 1997-1998 гг., 1998-1999 гг. использованы разности наклонных дальностей семи линий (рис. 6.)

Изменения во времени осредненных горизонтальных деформаций на ограниченной территории вблизи вулкана показывает отсутствия явной связи в период 1996-2011 гг. между сейсмической активностью и горизонтальными

деформациями, хотя такое сравнение не совсем правомерно, так как сведения о деформациях получены дискретно, а о сейсмичности — непрерывно (рис. 7).

Результаты изучения вертикальных деформаций по данным высокоточного нивелирования за период 1972-2005 гг. приведены в (Магуськин и др., 2008). В последующие годы нивелирование не выполнялось. Повторные эпизодические GPS измерения определяют высоты пунктов над общеземным эллипсоидом, а, следовательно, и превышения между ними, с погрешностью в первый сантиметр. Кроме того, для сравнения с данными геометрического нивелирования на вулкане Карымский, превышение должно определяться с учетом высоты Российского квазигеоида над общеземным эллипсоидом, что можно выполнить только с существенной погрешностью.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из многочисленных сравнений горизонтальных и вертикальных деформаций земной поверхности вблизи вулкана Карымский установлено, что удлинения длин линий (положительная деформация) соответствуют опусканию нивелирных реперов. Исключением являются результаты нивелирования 1979 г. и 1995 г., причем последний отличается от результата 1992 г. менее 5 мм, что говорит лишь о временной приостановке опускания (Магуськин и др., 2008).

Перед январскими событиями 1996 г. удлинение линий началось в 1989 г. (рис. 2). К октябрю 1995 г. положительные деформации достигли величины $24 \cdot 10^{-6} D$ за 6 лет. Предположим, что деформации увеличивались, а измерения длин линий велись непрерывно. Тогда по величине деформации и скорости ее нарастания можно было определить вероятное время появления разрывов на дневной поверхности. Дискретные фактические результаты подсказывают нам о необходимости организации непрерывных измерений расстояний между надежно закрепленными пунктами. Для задачи обнаружения краткосрочных деформационных предвестников извержений необходимо получать и анализировать данные измерений в режиме близкому к реальному времени.

Характер деформаций вблизи вулкана Карымский — или всестороннее растяжение (с увеличением по направлению запад-восток) с одновременным опусканием земной поверхности, или обратный процесс, когда сжатие сопровождается подъемом. Верхние слои земной коры здесь сильно раздроблены и при изменении давления в приповерхностном магматическом

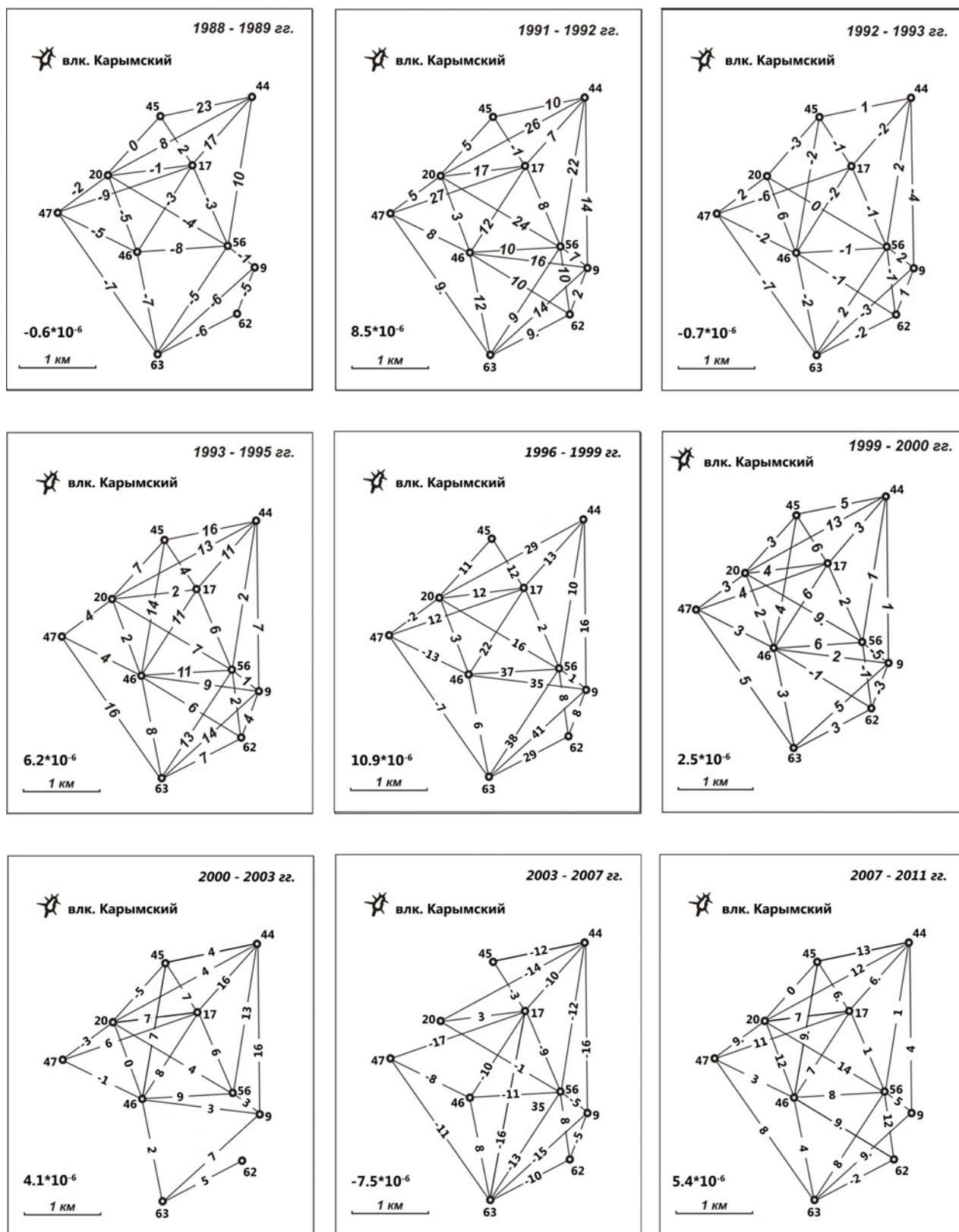


Рис. 3. Изменения (в мм) наклонных дальностей в разные периоды в геодезической сети (показаны в разрывах линий) и осредненные по участку горизонтальные относительные удлинения.

очаге деформируется по всем направлениям. При растяжении – увеличение длин линий на поверхности, падает давление в очаге и земная поверхность опускается.

После скачкообразных, наблюдаемых зрительно на поверхности деформаций, происшедших во время январских событий 1996 г., длины тех же линий продолжали удлиняться

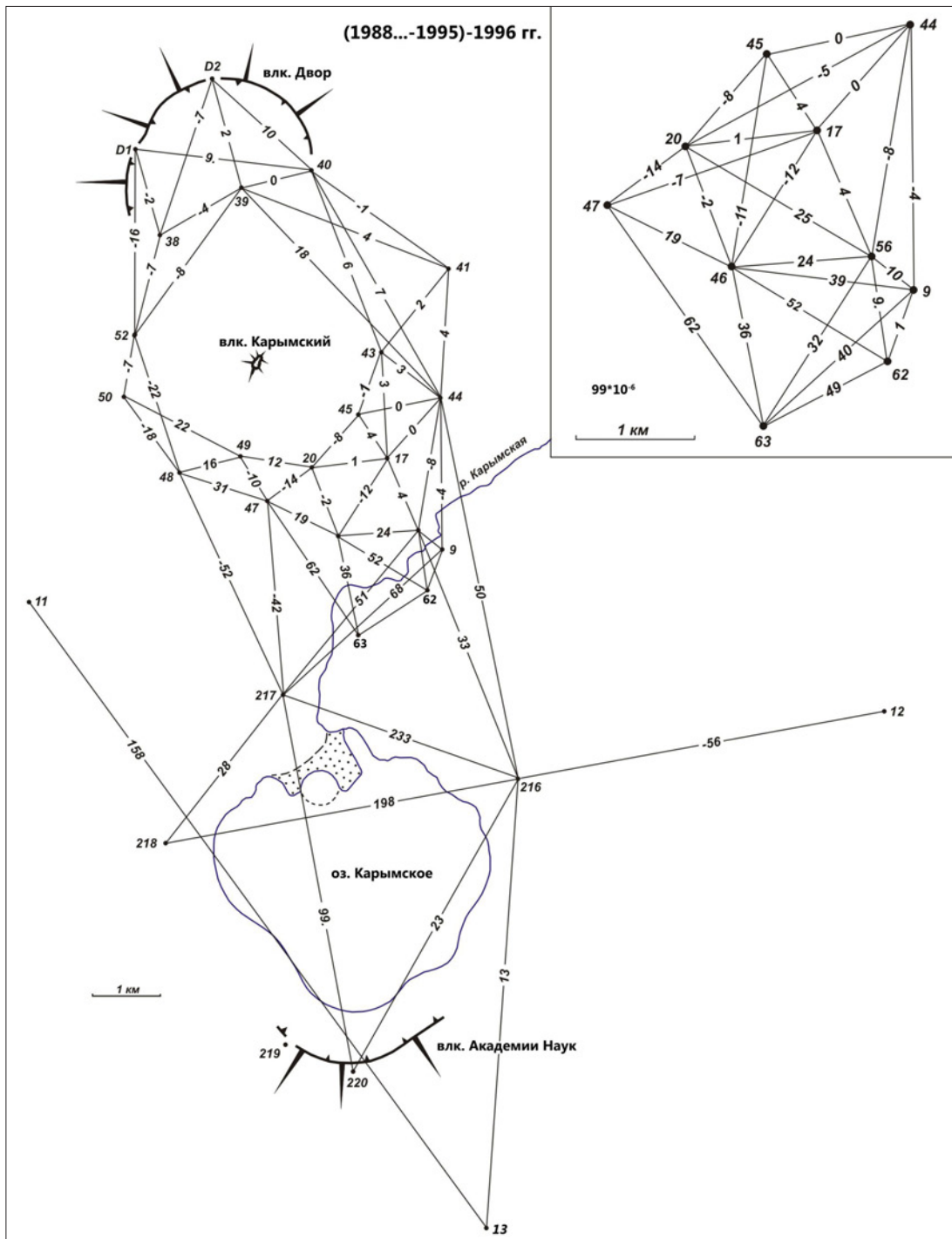


Рис. 4. Изменения горизонтальных проложений линий (см) в связи с сильным ($M_w=6.3$) землетрясением 1.01.1996 г. в Карымском вулканическом центре и началом одновременного извержения вулкана Карымский и в Карымском кальдерном. На врезке показаны более полные данные и приведено осредненное по участку горизонтальное относительное удлинение линий.

на несколько меньшие величины (рис.5,6). Относительное удлинение к концу 2003 г. достигло $17 \cdot 10^{-6}$. Это меньше, чем было до событий, но все же растяжение земной поверхности продолжалось. После 2003 г. длины линий стали сокращаться, т.е. на протяжении 2003-2007 гг. происходило сжатие на (рис. 6, 7). Казалось извержение завершится, однако оно продолжается по сей день (январь 2013 г.) без

излияния лавы с редкими пепловыми взрывами в кратере. После 2007 г. изменения длин линий скачкообразное, но и извержение прерывистое с длинными паузами полного затишья. Понять в первом приближении эти, возможно взаимосвязанные явления, можно было бы опираясь на данные непрерывных измерений деформаций.

В то же время нельзя упускать из вида следующие факты:

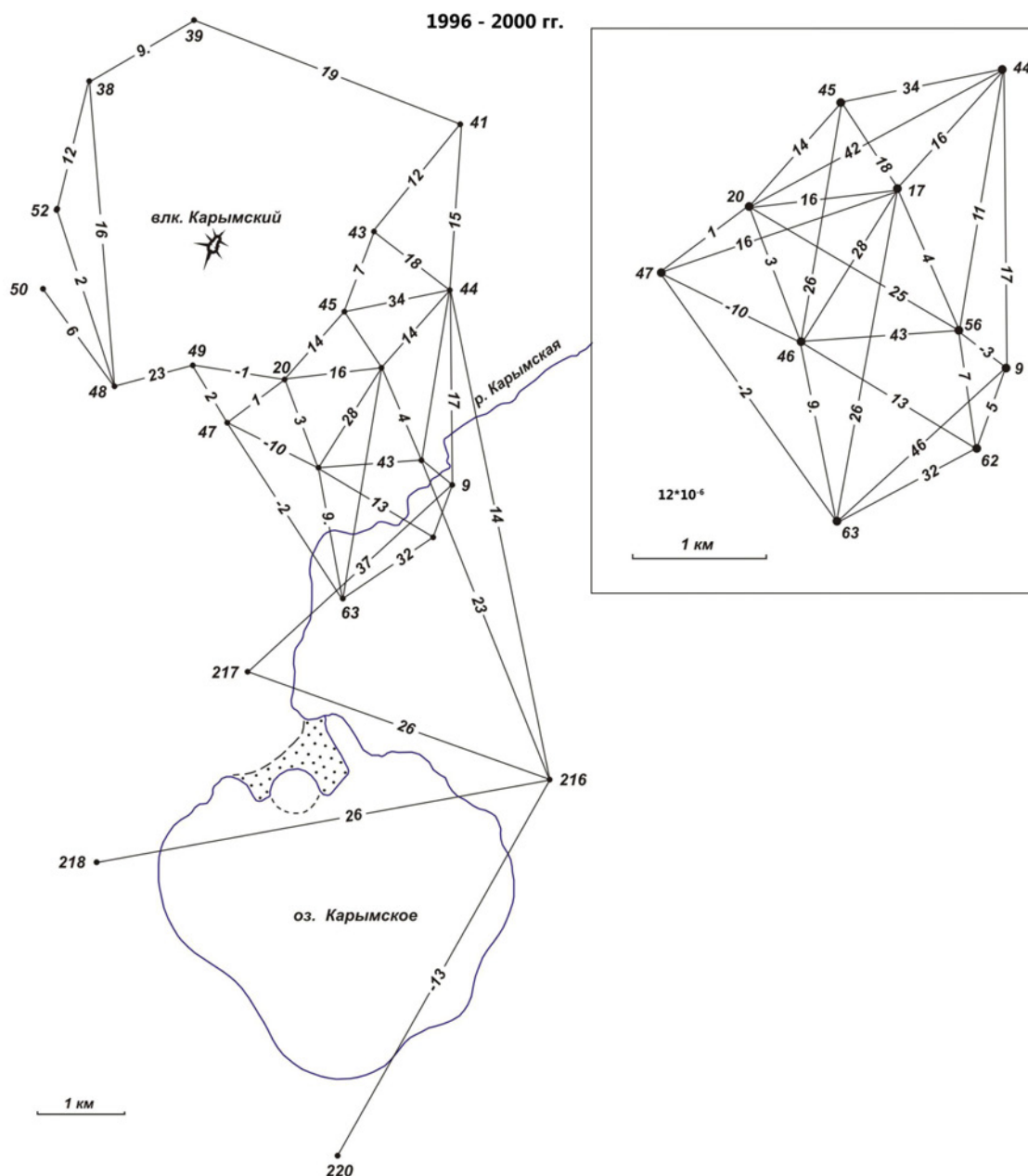


Рис. 5. Изменения наклонных дальностей (мм) в период 05.1996-2000 гг. после январских событий 1.01.1996 г. (показаны в разрывах линий). На врезке показаны более полные данные и приведено осредненное по участку горизонтальное относительное удлинение наклонных дальностей.

– после 13-летнего покоя вулкан Карымский излил всего 0.035 км³ лавы (В.Н. Двигало, устное сообщение), а в прежний активный период с 1970 г. по 1972 г. объем лавы составил 0.122 км³ (Магуськин и др., 1982);

– в чашеобразной долине в 1 км от истока реки Карымской из озера возвышается небольшая сопка «Лагерная», которая является центром древнего извержения. Здесь много горячих источников. Судя по появившимся видимым трещинам и измеренным деформациям, район является сильно ослабленным. Учитывая эти факты можно предположить возникновение в этой долине нового кратковременного центра излияния лавы.

ВЫВОДЫ

Деформации земной поверхности, которые предшествовали извержениям 2 января 1996 г. вулкана Карымский и в Карымском кальдерном озере, а также сильному ($M_w=6.3$) землетрясению в Карымском вулканическом центре на удалении 15 и 12 км соответственно от центров извержений, были невелики, начались примерно за 6 лет и происходили со скоростью $4 \cdot 10^{-6}$ Д в год.

Во время январских событий 1996 г. произошли скачкообразные деформации земной поверхности величиной до $3 \cdot 10^{-4}$ Д.

ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

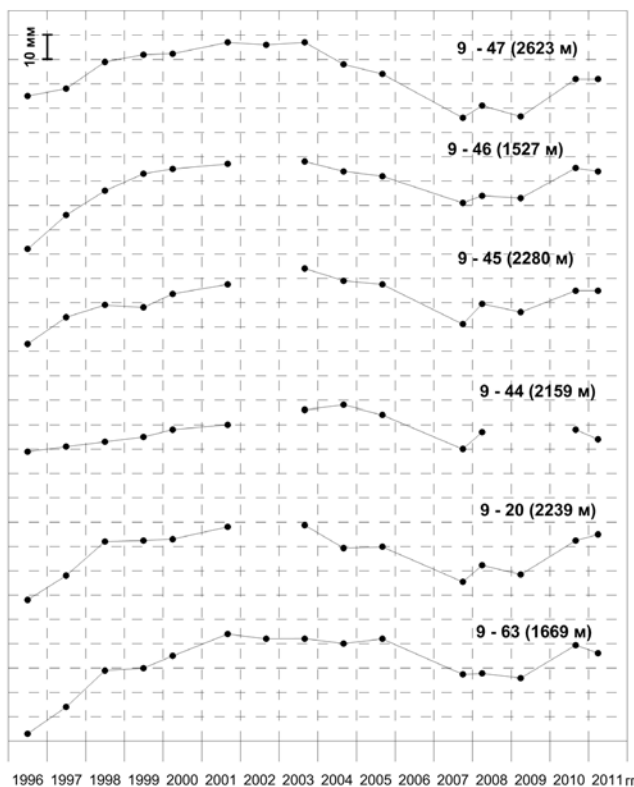


Рис. 6. Изменения наклонной дальностей (мм) в период 05.1996-2011 гг. Погрешность каждой точки равна $2 \text{ мм} + 1 \cdot 10^{-6} D$ (где D – длина линии в мм).

После событий в январе 1996 г. характер деформаций вернулся к предыдущему состоянию и не менялся в течение 7 лет. По-прежнему продолжалось растяжение земной поверхности со скоростью примерно $3 \cdot 10^{-6}$ Д в год.

В 2003 г. вблизи извергающегося вулкана Карымский растяжение земной поверхности сменилось на сжатие, достигшее к 2007 г. величины $7.5 \cdot 10^{-6}$ Д. Время начала сжатия примерно совпадает со временем прекращения излияния небольших порций лавы из кратера.

После 2007 г. ежегодные измерения показывают чередование растяжения сжатием и наоборот. Этому периоду соответствует извержение вулкана без излияния лавы со слабой эксплозивной деятельностью.

Явной связи между количеством обработанных локальных землетрясений на вулкане Карымский и изменением деформаций не наблюдается.

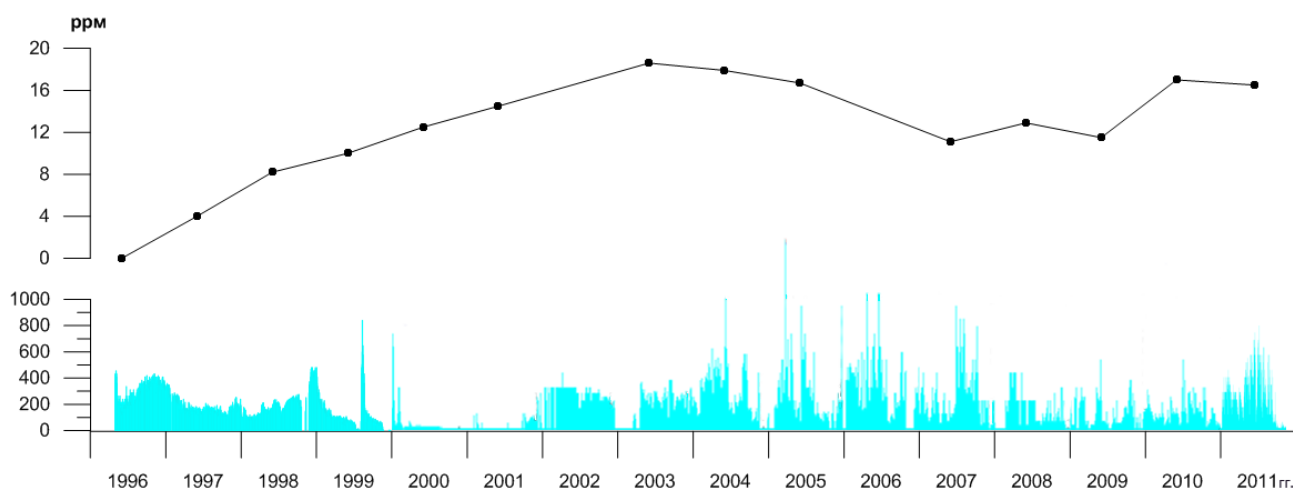


Рис. 7. Ход относительных осредненных горизонтальных деформаций на площади, ограниченной пунктами 45-44-9-62-63-47-20-45, местоположение которых приведено на рис. 1. В нижней части количество локальных землетрясений (данные КФ ГС РАН).

Список литературы

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.

Иванов Б.В. Извержение Карымского вулкана в 1962-1965 гг. и вулканы Карымской группы. М.: Наука, 1970. 133 с.

Иванов Б.В., Брайцева О.А., Зубин М.И. Вулкан Карымский // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 182-203.

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.

Магуськин М.А., Федотов С.А., Левин В.Е. и др. Деформации земной поверхности в связи с сейсмической и вулканической активностью в Карымском вулканическом центре в январе 1996 г. // Вулканология и сейсмология. 1997. № 5. С. 97-112.

Магуськин М.А., Федотов С.А., Левин В.Е. и др. Деформации, связанные с сильным ($M=6.9$) землетрясением, прорывом магм и изверже-

- ниями в Карымском вулканическом центре в 1996-2005 гг. // Вулканология и сейсмология. 2008. № 5. С. 22-40.
- 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.
- 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.

SURFACE DEFORMATIONS DURING THE 1996 KARYMSKY VOLCANO ERUPTION

M.A. Maguskin¹, N.N. Titkov²

¹*Institute of Volcanology and Seismology, Far Eastern Branch of RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*
²*Kamchatka Branch of Geophysical Service RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia*

Instrumental measurements suggest that significant horizontal tensile strains of the Earth's surface had began 6 years prior to the January 1, 1996 Karymsky eruption at a speed of $4 \cdot 10^{-6}$ D/year, where D baseline means length in mm. After the events in January 1996, the nature of deformations remained unchanged during 7 years. Stretching of the Earth's surface continued at a speed of about $3 \cdot 10^{-6}$ D/year. In 2003 stretching was replaced with compression and had reached $7.5 \cdot 10^{-6}$ D/year by 2007. The beginning of compression approximately coincides with the termination of outpouring of small portions of lava from a crater. After 2007, sign-variable deformations are observed; stretching alternates with compression and vice versa. During that period the volcano was producing weak explosions with no lava effusions.

Keywords: measurements, mark, movement, Earth's surface, eruption.