

УДК 550.34.097

ОТРАЖЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВУЛКАНИЧЕСКИХ СТРУКТУР В ДАННЫХ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПОЛЯ ЖЕСТКОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД НА ПРИМЕРЕ КАЛЬДЕРЫ ЛОНГ ВАЛЛИ В СЕВЕРНОЙ КАЛИФОРНИИ, США

© 2012 г. В.И. Лыков, А.О. Мострюков

*Геофизическая обсерватория “Борок” – филиал ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН,
пос. Борок, Ярославская обл., Россия*

Выполнена оценка возможностей метода определения интегральной жесткости массивов по соотношению долей хрупкого и вязкого механизмов разрушения в очагах фоновых землетрясений для сложных вулканических структур. Используются данные по вулканической структуре Лонг Валли (Сев. Калифорния, США), для которой в последние десятилетия на основе широкого комплекса геофизических, геодезических и гидрогеохимических методов созданы теоретические модели глубинного строения. Анализировались результаты стандартной обработки сейсмограмм, принятой Сейсмологической службой Калифорнии. То, что в роли источников информации выступают очаги землетрясений, дает возможность проследить изменения интегральной жесткости массивов горных пород по всему пространству, заполненному этими очагами. На первом этапе особое внимание было уделено построению карт районирования территории по параметру жесткости сейсмоактивной толщи земной коры и разрезам, пересекающим кальдеру. Оказалось, что выразительность деталей схем и разрезов зависит от режима деформирования поверхности кальдеры.

Обсуждаются результаты обнаружения и изучения канала пониженной жесткости, прослеживающегося до глубины 35 км в юго-западной части кальдеры, где наблюдаются прорывы глубинных газов [Hill, 2001]; рассматриваются результаты анализа временных изменений жесткости, их пространственные проявления и возможная связь с местными сильными землетрясениями.

Ключевые слова: землетрясение, сейсмичность, жесткость, мониторинг, напряженное состояние.

Введение

Кальдера Лонг Валли, находящаяся на восточном склоне горной системы Сьерра-Невада (штат Калифорния, США), образовалась в результате катастрофического извержения, произошедшего около 760 тыс. лет назад и выбросившего 600 км^3 лав [Cousens, 1996]. В течение следующих 100 тыс. лет вулканизм продолжался внутри кальдеры в меньших масштабах. Первоначально базальтовый состав лав постепенно становился все более кремнекислым; последние по времени извержения имели риолитовый состав. В позднем плейстоцене и голоцене кальдера оставалась термически активной с множеством горячих источников и фумарол. На северо-западе кальдеры около 1350 г. н.э. произошло извержение из цепочки нескольких кратеров Иньо. Последние проявления вулканической деятельности были отмечены к северу от кальдеры на острове в озере Моно около 300 лет назад.

В настоящее время на территории кальдеры отмечаются проявления гидротермальной, деформационной и сейсмической активности; так, поверхность кальдеры с 1980 г. в ее центре поднялась приблизительно на 80 см. После сильных ($5.7 < M < 6.5$) землетрясений 1980 г. в исследуемом районе началось развитие сейсмологической сети.

К настоящему времени на территории площадью 100×100 км функционирует 51 сейсмическая станция. Высокая плотность пунктов сейсмических наблюдений и высокий уровень сейсмической активности позволили применить метод контроля интегральной жесткости сейсмоактивных массивов горных пород для обнаружения аномалий, связанных со структурой вулканического очага и изменениями во времени пространственных параметров жесткости. Способ определения интегральной жесткости и техника мониторинга сейсмоактивных объемов описаны в работах [Лыков, Мострюков, 1996; Лыков, Мострюков, 2003, 2008; Лыков, Мострюков, Рубан, 2000]. Отношение числа станций, на записях которых знак вступления зафиксирован, к общему количеству станций для конкретного землетрясения служит показателем типа механизма разрушения в очаговой трещине (хрупкое или вязкое). Преобладание того или иного механизма характеризует степень интегральной жесткости сейсмоактивного объема горных пород для фиксированного интервала времени.

Задача настоящей работы – попытка обнаружения различий в интегральной жесткости магматического объекта и вмещающих пород.

Поле жесткости горных пород кальдеры Лонг Валли как отражение ее структуры

Очаги местных землетрясений, рассматриваемые нами как индикаторы параметра жесткости, на территории кальдеры и в ее окрестностях распределены очень неравномерно. В роли основных источников повышенной сейсмической активности выступают тектонические разломы, часть из которых полностью или частично пересекает кальдеру. Расположение разломов таково, что наиболее информативными в сейсмическом отношении являются южная и западная части кальдеры. Как оказалось, характеристика жесткости всего массива горных пород, интегрированная до глубины 30 км, зависит от режима деформирования кальдеры.

С использованием данных за 1987–1997 гг. – период интенсивного расширения кальдеры и куполообразного поднятия ее поверхности [Newman et al., 2001] – была построена схема районирования территории $3^\circ \times 3^\circ$ по параметру жесткости RG (рис. 1, а).

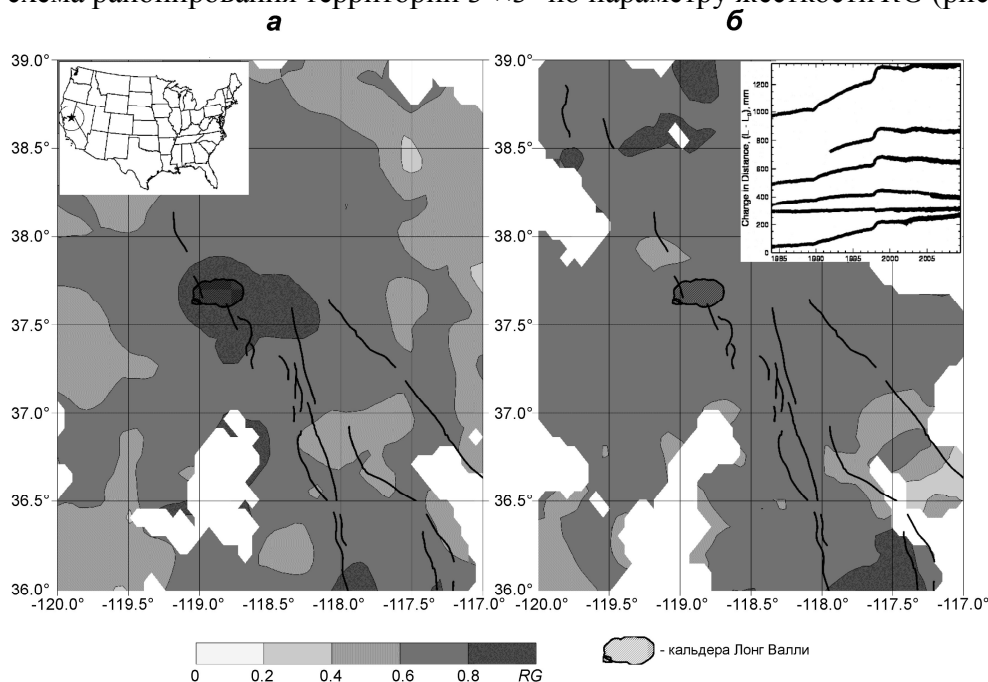


Рис. 1. Схема районирования территории кальдеры и ее окрестностей по параметру интегрированной жесткости RG за 1987–1997 (а) и 2003–2008 гг. (б). На врезках: слева – положение кальдеры Лонг Валли на карте США, справа – деформация кальдеры по [Newman et al., 2001]

Можно видеть, что территории кальдеры и ее окрестностей соответствует ярко выраженная аномалия повышенной жесткости. Все предположения, что эта аномалия вызвана сгущением сети сейсмических станций в самой кальдере, отпадают, если рассмотреть рис. 1, б, на котором представлена аналогичная схема за 2003–2008 гг., когда по данным светодальнометрии расширения практически не было. На этой схеме область повышенной жесткости как бы окаймляет кальдеру, в пределах которой жесткость уже значительно понижена по сравнению с первым временным интервалом.

В юго-западной части кальдеры (гора Маммот) в 1992–1998 и 2001–2006 гг. наблюдалось значительное по амплитуде понижение жесткости на глубинах более 10 км (рис. 2). Размеры этой аномалии по площади превышают район горы Маммот. Аномалия явно выходит за западную границу кальдеры; ее проявления по глубине иллюстрирует рис. 3, где показан суммарный эффект за период с 1987 по 2007 г. Аномалия прослеживается до глубин около 30 км, что значительно превышает предельные глубины очагов землетрясений в центре кальдеры. По мнению Д. Хилла [Hill, 2001], проводившего исследования со специальной длиннопериодной сейсмической аппаратурой, эта аномалия вызвана тем, что в районе горы Маммот резкие изменения давления газов в глубинных полостях среды вызывают специфические длиннопериодные (иногда сверхдлиннопериодные) землетрясения, которые часто сопровождаются квазигармоническим дрожанием и выбросами газов, приводящими на поверхности к гибели лесов. Основываясь на данных до 2000 г., Д. Хилл считал, что подобные землетрясения происходят в диапазоне глубин от 10 до 20 км.

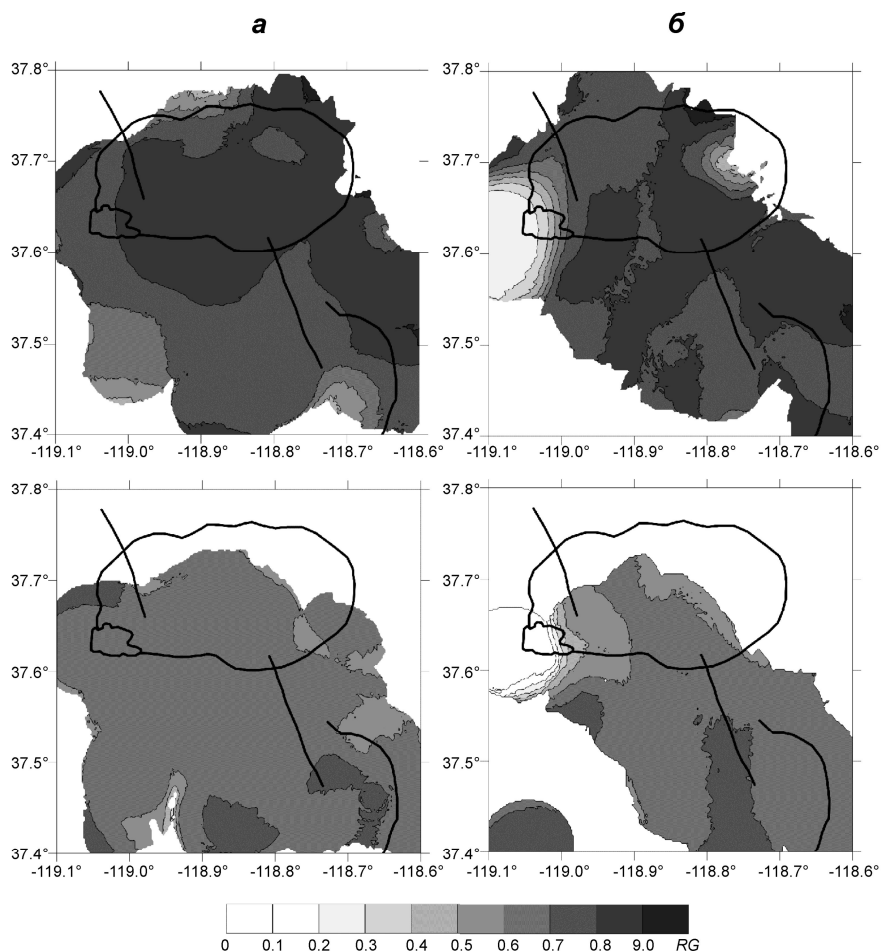


Рис. 2. Схемы детального районирования кальдеры по параметру интегральной жесткости RG для глубин до 10 км (а) и более 10 км (б). Вверху – данные за 1992–1998, внизу – 2001–2006 гг.

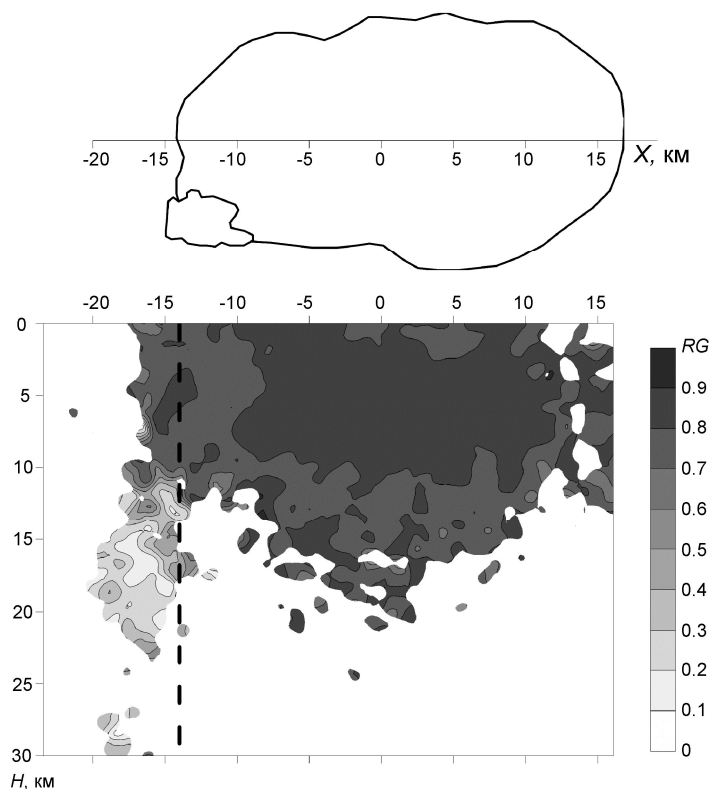


Рис. 3. Граница кальдеры в плане (а) и схема распределения жесткости в ней по глубине (б) в виде проекции на вертикальный разрез по данным за 1987–2007 гг. Здесь и далее: утолщенная штриховая вертикальная линия – проекция границы кальдеры на плоскость разреза

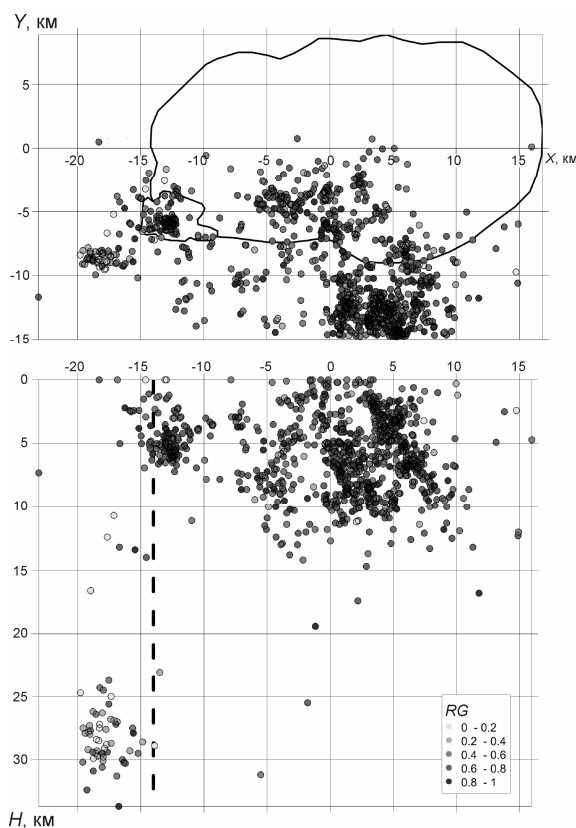


Рис. 4. Положение эпицентров землетрясений 2006 г. (а) и проекции их гипоцентров на вертикальную плоскость (б). Заливка кружков зависит от значения параметра RG (см. врезку)

Землетрясения с невыразительными первыми вступлениями продольных волн картируют канал выхода газовых компонентов с больших глубин. Показателен факт активизации подобных эффектов на глубинах 25–30 км в 2006 г. на фоне пониженной жесткости (хрупкости) горных пород в верхней 10-километровой толще (рис. 4 на с. 27).

Глубинная структура земной коры в зоне кальдеры наиболее выразительно отображается на разрезах, построенных по профилям, пересекающим вулканический объект. Рассмотрим один из них, построенный вдоль меридионального профиля с использованием данных об очагах землетрясений за 1998–1999 гг. в полосе шириной 10 км (рис. 5).

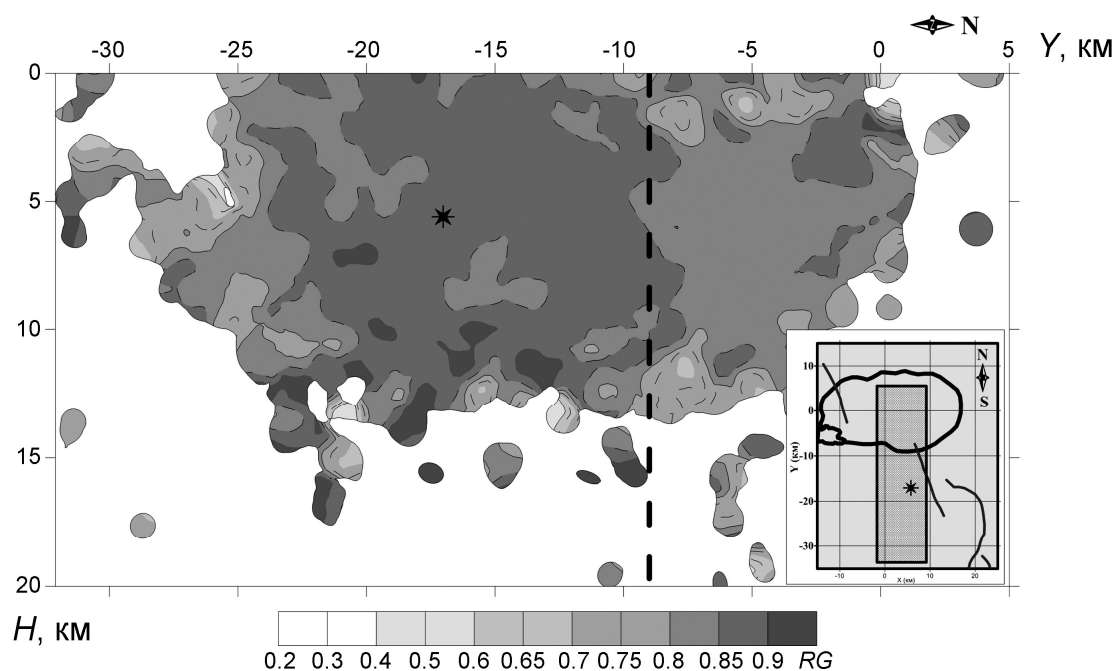


Рис. 5. Распределение параметра жесткости RG за 1998–1999 гг. в разрезе по меридиональному профилю. Разрез построен по данным об очагах землетрясений за 1998–1999 гг. в полосе шириной 10 км. На врезке – схема расположения полосы; звездочка – положение очага землетрясения 15.05.1999 г.

У южной границы кальдеры можно видеть наклоненный к ее центру контакт, вблизи которого горные породы внутри кальдеры в интервале от 10 до 15 км характеризуются пониженным уровнем интегральной жесткости.

Как оказалось, реальные данные о геометрии структуры аналогичны теоретическим моделям, которые разработаны в [Newman, Dixon Gourmelen, 2006]. Но, судя по характеру неоднородностей поля жесткости пород вне кальдеры, влияние гигантского взрыва проявилось рядом поверхностей, наклоненных на глубине к оси кальдеры. Характер гипоцентрии в районе кальдеры говорит о том, что в ее центре очаги залегают на максимальных глубинах, повышенная жесткость (см. рис. 3) свойственна верхней 10-километровой толще, ниже которой наблюдается снижение жесткости, но без видимых признаков магматического очага.

К числу особых случаев необходимо отнести вспышки локальной сейсмичности на необычно больших – до 30 км – глубинах (см. рис. 4). Такие случаи наблюдались в 1989–1990 и 1997–1998 гг., когда, как показывают данные лазерной светодальнометрии, происходило значительное усиление растяжения поверхности кальдеры.

Пространственно-временные изменения параметра интегральной жесткости

Региональный фон временных изменений параметра жесткости на территории кальдеры в 90-е годы XX века проявился следующим образом. Мощность сейсмоактивной толщи в кальдере изменилась с 17 км в 1992–1994 годах до 25 км и более в 1995–1997 гг.; интегральная жесткость верхов этой толщи (до 5 км) в то же время заметно уменьшилась. В 1997 г. в районе западного замыкания кальдеры проявился вертикальный канал с аномально пониженной жесткостью, начиная с 10 км до предельных глубин сейсмоактивной толщи (рис. 6). Учитывая характер деформаций поверхности кальдеры, все эти события можно расценить как свидетельства активности магматического очага и возможности использования метода определения жесткости для контроля состояния вулканических недр.

Как уже отмечалось выше (см. также рис. 1), на территории кальдеры и в ее окрестностях уровень интегральной жесткости с течением времени значительно изменился. Привлекает внимание тот факт, что изменения происходили в разных геометрических масштабах. На рис. 7 приведены сканограммы $RG=f(X_{1,2}, t)$ для временного интервала 1998–1999 гг. по трем профилям. Первый из них – профиль X_1 – ориентирован вдоль длинной оси кальдеры; второй – профиль X_2 – расположен южнее кальдеры и параллелен первому; третий – это меридиональный профиль $RG=f(Y, t)$, построенный аналогично приведенному на рис. 5. На всех трех разрезах в первой половине мая 1999 г. отмечено заметное понижение жесткости горных пород кальдеры и ее южного обрамления. Показательно, что через 10 суток после прохождения минимума 15.05.1999 г. к югу от кальдеры произошло землетрясение с $M=5.7^*$.

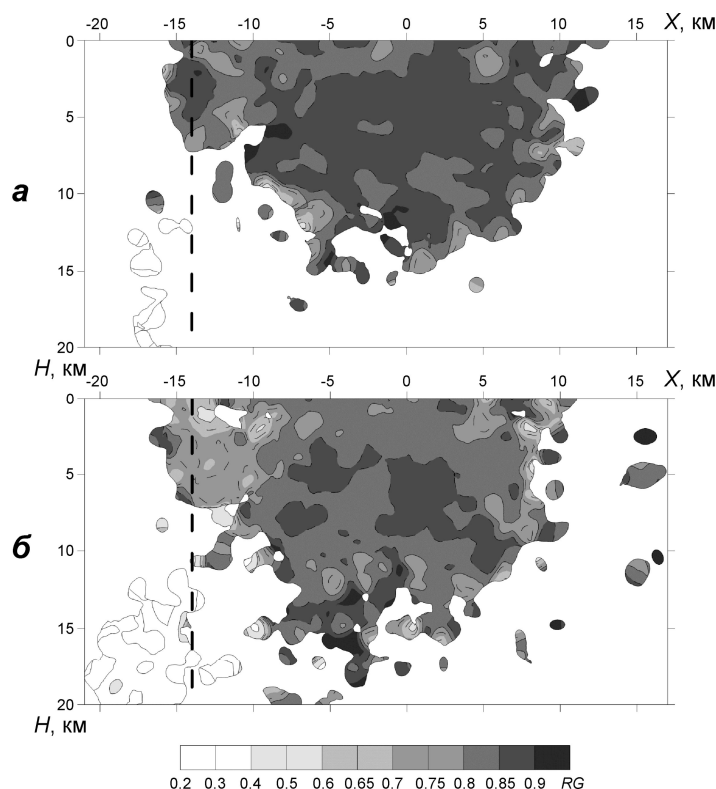


Рис. 6. Характер жесткости горных пород в 1992–1994 гг. (а) и 1995–1997 гг. (б) на разрезах, ориентированных вдоль большой оси кальдеры в направлении восток–запад

* Этот факт был использован авторами в серии статей, посвященных методике прогноза сейсмической опасности.

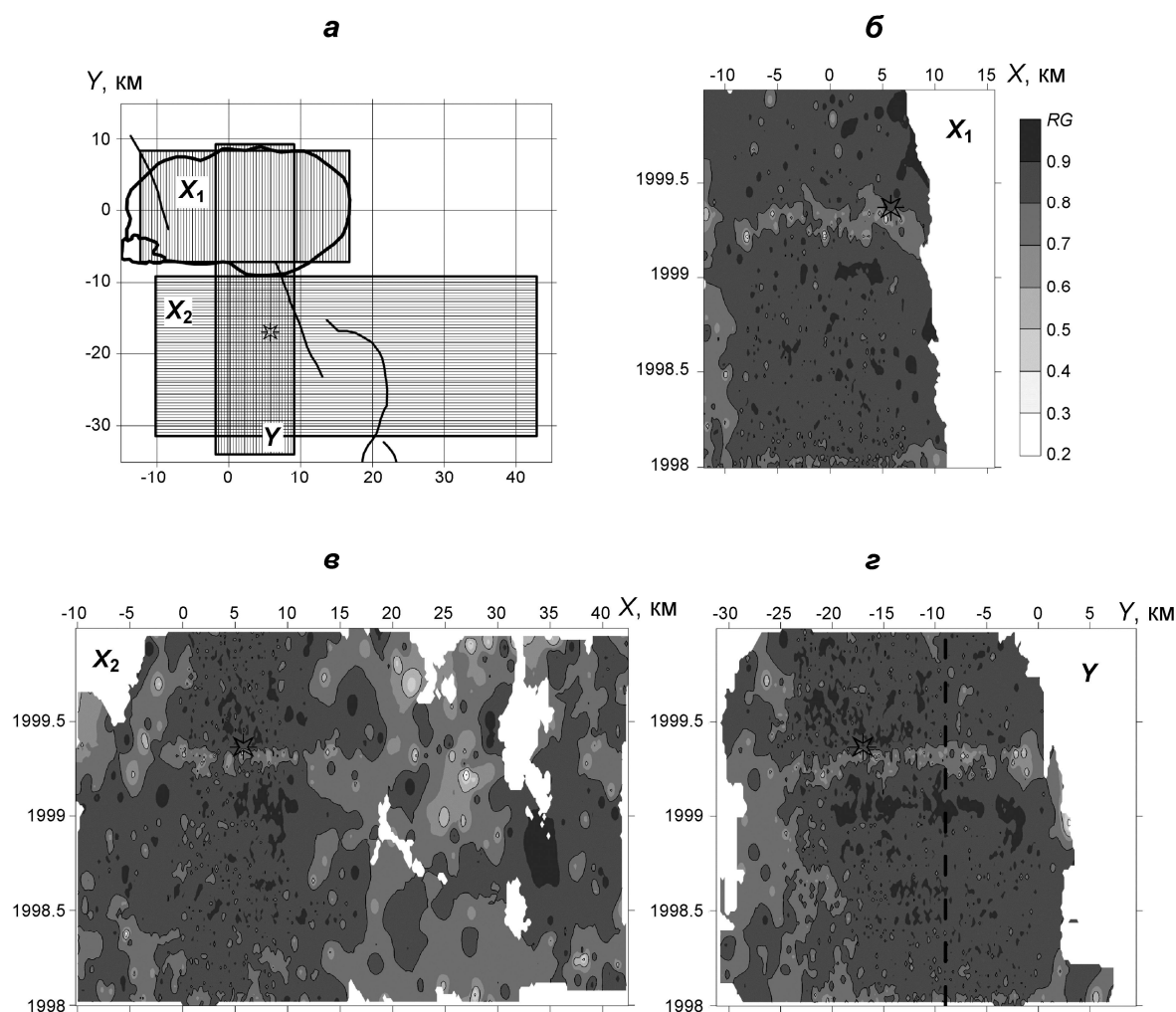


Рис. 7. Схема расположения профилей X_1 , X_2 , Y (а; см. описание в тексте) и диаграммы временных распределений параметра интегральной жесткости по ним – X_1 (б), X_2 (в), Y (г). Звездочка – положение очага землетрясения 15.05.1999 г. с $M=5.7$

Сканогаммы, построенные для длительных интервалов, демонстрируют, что во время растяжения поверхности кальдеры повышенная жесткость устойчиво проявлялась в пределах сейсмоактивного центра вулканического объекта, явно контрастируя с периферией. После 2000 г. эффект растяжения практически исчез, и контур вулканического объекта опознается менее четко по особенностям формы, размеров и ориентации неоднородностей поля жесткости. В этот период интегральная жесткость кальдеры несколько ниже жесткости окружающих массивов. После 2001 г. поле жесткости стало более однородным и в кальдере, и вне ее; в период растяжения это касалось лишь территории кальдеры.

Выводы

Первые впечатления от рассмотрения материалов, основанных на анализе особенностей поля жесткости вулканического объекта, заключаются в следующем.

1. Структура среды в районе вулканической кальдеры опознается по изменениям жесткости при условии достаточно высокой сейсмической активности.

2. Весь рассматриваемый интервал времени (1980–2007 гг.) разделяется на два этапа: первый – растяжение поверхности кальдеры (1980–1998 гг.) и второй (2000–

2009 гг.) – сжатие. На первом этапе территория кальдеры характеризуется повышенным уровнем жесткости до глубины 10 км в сейсмоактивной толще, на втором – уровень жесткости значительно понижен и в кальдере, и в ее окрестностях. Наиболее интенсивное понижение жесткости на втором этапе наблюдается ближе к центру кальдеры.

3. На фоне длиннопериодных вариаций жесткости выявляются короткопериодные, интенсивность которых значительно выше вне кальдеры, нежели внутри нее. К числу короткопериодных вариаций можно отнести и предвестник землетрясения 15.05.1999 г., очаг которого также находился вне кальдеры.

4. Признаком современной вулканической активности является наличие субвертикального канала, в котором на глубинах от 10 до 35 км проявляются длинно- и сверхдлиннопериодные землетрясения [Hill, 2001]. Этот канал прослеживается как зона пониженной жесткости для землетрясений, зарегистрированных стандартной сейсмической аппаратурой.

5. Более детальный анализ особенностей структуры вулканического объекта требует дальнейшего совершенствования методики расчета параметров поля жесткости сейсмоактивной среды.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 10-05-00908а).

Литература

- Лыков В.И., Мострюков А.О. Способ слежения за соотношением хрупкого и вязкого типов разрушения в очагах землетрясений сейсмоактивных объемов горных пород. Патент № 2200335 (приоритет от 18.05.98) // Бюллетень открытий и изобретений. № 7. Изд-во “Роспатент”, 5 марта 2003.
- Лыков В.И., Мострюков А.О. Природа пространственно-временных вариаций жесткости сейсмоактивных массивов горных пород разлома Сан-Андреас (Северная Калифорния) // Физика Земли. 2008. № 8. С.63–69.
- Лыков В.И., Мострюков А.О., Рубан В.Ф. О природе деформаций кальдеры Long Valley С. Калифорния // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С.17–18.
- Cousens, B.L. Magmatic evolution of Quaternary mafic magmas at Long Valley Caldera and the Devils Postpile, California: Effects of crustal contamination on lithospheric mantle-derived magmas // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P.27673–27689.
- Hill D.P. Long Valley // Volcanism Network. 2001. V. 26, N 7. P.12–14.
- Lykov V.I., Mostryukov A.O. Background seismicity as an indicator of crystal deformational process // J. Earthq. Pred. Res. 1996. V. 5, N 1. P.535–545.
- Newman A.V., Dixon T.H., Ofoegbu G., Dixon J. E. Geodetic and seismic constraints on recent activity at Long Valley caldera, California: Evidence for viscoelastic rheology // J. Volcan. Geoth. Res. 2001. N 105. P.183–206.
- Newman A.V., Dixon T.H., Gourmelen N. A Four-Dimensional Viscoelastic Deformation Model for Long Valley Caldera, California, between 1995 and 2000 // J. Volcan. Geoth. Res. 2006. V. 150, N 1/3. P.244–269.

Сведения об авторах

ЛЫКОВ Виктор Иванович – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ГО “Борок” ИФЗ РАН. 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, ГО “Борок” ИФЗ РАН. Тел.: (48547) 32-479. E-mail: most@borok.yar.ru

МОСТРЮКОВ Александр Олегович – и.о. заведующего лабораторией, ГО “Борок” ИФЗ РАН. 152742, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, ГО “Борок” ИФЗ РАН. Тел.: (48547) 24-761. E-mail: most@borok.yar.ru

VOLCANIC STRUCTURE OF LONG VALLEY (NORTHERN CALIFORNIA, USA) AS REVEALED BY SEISMIC MONITORING OF ROCKS RIGIDITY FIELD

V.I. Lykov, A.O. Mostryukov

*Borok Geophysical observatory of Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Science,
Borok (Yaroslavl region), Russia*

Abstract. A wide variety of geophysical, geodesic and hydrogeochemistry methods used in the course of last decades allows to develop theoretical models of composition for the Long Valley volcanic structure. The main goal of our research was to evaluate to what extent the method for determination of massif integral rigidity is applicable to such a complex structure. The method is based on a ratio of brittle to viscous destruction mechanisms in seismic focuses of background earthquakes. We used results of standardized seismogram analysis by Northern California Earthquakes Data Center. Information sources were earthquake focuses, so we were able to trace variations of massif integral rigidity throughout entire area filled with earthquake focuses. At the initial stage of our research, we focused on map construction for zoning of rigidity parameter of seismically active crust strata, as well as caldera sections. It was revealed that a significance of map and strata components depends on a deformation mode of the caldera surface. We discuss also the results of study of reduced rigidity channel detected in South-Western part of the caldera down to depth of 35 km. According to [Hill, 2001], abyssal gas breakthroughs are observed in this area. As a separate task, we studied temporal variations of rigidity, spatial manifestations of these variations, and their possible association with local strong earthquakes.

Keywords: earthquake, seismicity, rigidity, monitoring; stress change.