

МЕХАНИЗМ ОЧАГОВ ВУЛКАНОТЕКТОНИЧЕСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И  
ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СЕЙСМОАКТИВНОЙ ОБЛАСТИ  
КЛЮЧЕВСКОГО ВУЛКАНА В 1999-2004 гг.

**Н.П. Козырева<sup>1</sup>, Джон Дж. Санчес<sup>2</sup> (John J. Sanchez)**

<sup>1</sup>Камчатский Филиал Геофизической Службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006, e-mail: [knj@emsd.iks.ru](mailto:knj@emsd.iks.ru)

<sup>2</sup> Геофизический Институт, Университет штата Аляска, Фэрбенкс, США, (Geophysical Institute, University of Alaska, Fairbanks, AK, USA), e-mail: [jjalaska@giseis.alaska.edu](mailto:jjalaska@giseis.alaska.edu)

### **Введение**

О напряженном состоянии земной коры в окрестностях активных вулканов можно судить по параметрам механизма очагов вулканотектонических землетрясений. Но было бы неправильно интерпретировать ориентацию осей сжатия и растяжения в очагах землетрясений как направление осей главных напряжений. Задача состоит в нахождении параметров такого поля напряжений, которое одновременно объясняло бы возникновение разных групп механизмов очагов. Предполагая, что сдвиг в плоскости разрыва происходит в направлении действия максимальных касательных напряжений и что напряжение может быть однородным в некотором рассматриваемом объеме, Дж. Гефарт и Д. Форсит [3] разработали инверсионный метод, который позволяет найти ориентацию осей главных напряжений для группы механизмов очагов. Той же цели служит и метод А. Майкла [6].

Мы определили механизмы очагов вулканотектонических землетрясений, а затем применили оба этих метода для определения ориентации осей главных напряжений в Центральной сейсмоактивной области (ЦСО) Ключевского вулкана (координаты 56.00° - 56.2° с.ш. и 160.4°-161.0° в.д). Применяв метод кумулятивных невязок (авторы - М. Висс и З. Лю [11]), мы попытались изучить возможные изменения локального поля напряжений в окрестности Ключевского вулкана как функцию пространства и времени в 1999-2004 годах.

Эти методы исследования применялись для изучения напряженного состояния земной коры на разломе Сан-Андреас (Калифорния, США) [10], на вулканах Каоики, Гавайи [9,10], вулкане Этна, Италия [2], на вулканах Аляски - Спурр [4], Редут [7] и др.

Для землетрясений Камчатки эти методы применяются впервые.

### **Методы**

В результате инверсии механизмов очагов методом Дж. Гефарта и Д. Форсита [3] мы получаем направления осей главных напряжений -  $\sigma_1$  (максимального),  $\sigma_2$  (промежуточного) и  $\sigma_3$  (минимального),  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , и оценку относительной величины  $R$ , где  $R = (\sigma_2 - \sigma_1) / (\sigma_3 - \sigma_1)$ . Расхождение между тензором напряжений и параметрами механизма очагов оценивается величиной  $F^\circ$ .

В результате инверсии по методу А. Майкла [6] мы получаем ориентацию осей главных напряжений и значение параметра  $\Phi$ , определяемого как  $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ . Для оценки расхождения между тензором напряжений и параметрами механизма очагов в методе Майкла используется параметр  $\bar{F}$ .

Тестированием с использованием синтетических сейсмограмм [9,10] было установлено, что параметр  $F \leq 6^\circ$  может быть принят в качестве критерия однородности.

Метод кумулятивных невязок [12] предполагает, что в целом поле напряжений неоднородно, но может быть однородным в некотором интервале времени или же в каких-то ограниченных объемах. Мы можем посчитать индивидуальные невязки для каждого события по отношению к базовой модели тензора напряжений. Рисуя кумулятивный график невязок как функцию количества землетрясений, сортированных по какому-либо параметру, мы можем с помощью z-теста определить точки на графике, в которых изменяется его наклон.

Тем самым мы можем выделить периоды времени или объемы в земной коре, которые отличаются между собой по напряженному состоянию.

Для определения механизма очагов вулканотектонических землетрясений использовался комплекс программ Fa2002\* и HASH [5]. Для инверсий механизмов очагов с целью получения параметров поля напряжений, а также для расчетов кумулятивных невязок мы использовали пакет программ ZMAP [8].

#### ***Исходные данные***

Землетрясения ЦСО регистрируются сетью 12 сейсмических станций КОМСП ГС РАН, расположенных вокруг кратера Ключевского вулкана на расстоянии от 5 до 100 км. Координаты землетрясений определяются здесь с минимальной ошибкой (не более 3 км по горизонтали и глубине). В этой области уверенно регистрируются землетрясения  $K_s \geq 5.0$ . Мы проверили полярность вертикальных каналов сейсмографов по калибровкам этих каналов и по записям глубоких тектонических землетрясений. Были просмотрены волновые формы всех 154 землетрясений  $K_s \geq 6.0$  из Каталога землетрясений Северной группы вулканов за 1999-2004 гг. в интервале глубин 0-26 км. Из них были выбраны 88 событий, для которых можно было уверенно определить знаки импульсных вступлений Р-волн не менее чем на 6 станциях для каждого события.

#### ***Сейсмичность Ключевского вулкана в 1999-2004 годах***

В течение 1999-2004 гг., землетрясения ЦСО были сконцентрированы главным образом вокруг вершины Ключевского вулкана, к северо-западу и северо-востоку от нее. Распределение гипоцентров по глубине такое же, как и в предыдущие годы исследований сейсмичности в этом районе [1] - это четыре слоя глубин, различающихся по уровню сейсмической активности и характеру связи с вулканической деятельностью. Отличительным является землетрясение  $K_s = 11.9$  (12.04.01), произошедшее на глубине 11 км в 5-7 км к северо-западу от кратера Ключевского вулкана и вызвавшее сотрясение в поселке Ключи силой до 5 баллов.

На рис. 1 показаны карта эпицентров землетрясений  $K_s \geq 6.0$  глубиной 0-26 км, для которых были определены механизмы очагов, распределение очагов по глубине во времени и проекции гипоцентров на вертикальную плоскость по линиям АВ и CD.

#### ***Механизм очага вулканотектонических землетрясений***

Механизм очага определен для 88 землетрясений  $K_s \geq 6.0$ . Для контроля качества результатов мы определяли механизмы по двум программам - FA2002\* и HASH [5]. Для большинства землетрясений механизмы совпадают. Для отличающихся решений общим является тип подвижки в очаге. На рис. 2 показаны стереограммы механизма очага землетрясения  $K_s=11.9$  (проекция нижней полусферы), рассчитанные по разным программам. Решения практически идентичны. Механизм очага представлен сбросо-сдвигом. Ось растяжения (Т) ориентирована субгоризонтально в направлении СЗ-ЮВ. Ось сжатия (Р) ориентирована близвертикально в направлении СВ-ЮЗ.

В результате расчетов были получены механизмы очагов 88 вулканотектонических землетрясений ЦСО области Ключевского вулкана с  $K_s > 6.0$ . Типы деформаций в очагах следующие: сбросо-сдвиги - 74%, взбросо-сдвиги - 22% и сдвиги - 4%. После этого мы попытались найти параметры такого поля (или полей) напряжений, которые могли вызвать эти разнообразные деформации в очагах землетрясений.

#### ***Инверсии механизмов очагов***

Вначале мы инвертировали все 88 механизмов очагов, чтобы проверить гипотезу о том, что все землетрясения ЦСО происходят в однородном поле напряжений. Мы получили параметры тензора напряжений с  $F = 9.7^\circ$ , что говорит о неоднородности. Это ожидаемый результат, поскольку массив данных состоит из землетрясений разных энергетических уровней, происходивших в разных условиях на протяжении достаточно большого отрезка времени.

\* Ландер А.В. Комплекс программ по определению механизмов очагов землетрясений Камчатки, Командорских островов и Северных Курил // Отчет КОМСП ГС РАН, Петропавловск-Камчатский. 2004. 250 с.

Предполагая, что деление всего массива данных на более мелкие группы даст нам решения с меньшими невязками, мы применили следующую стратегию. Вначале нас интересовало поле напряжений, восстановленное по механизмам очагов наиболее сильных землетрясений  $K_s \geq 6.5$ . А потом мы попытались исследовать поле напряжений как функцию времени и пространства.

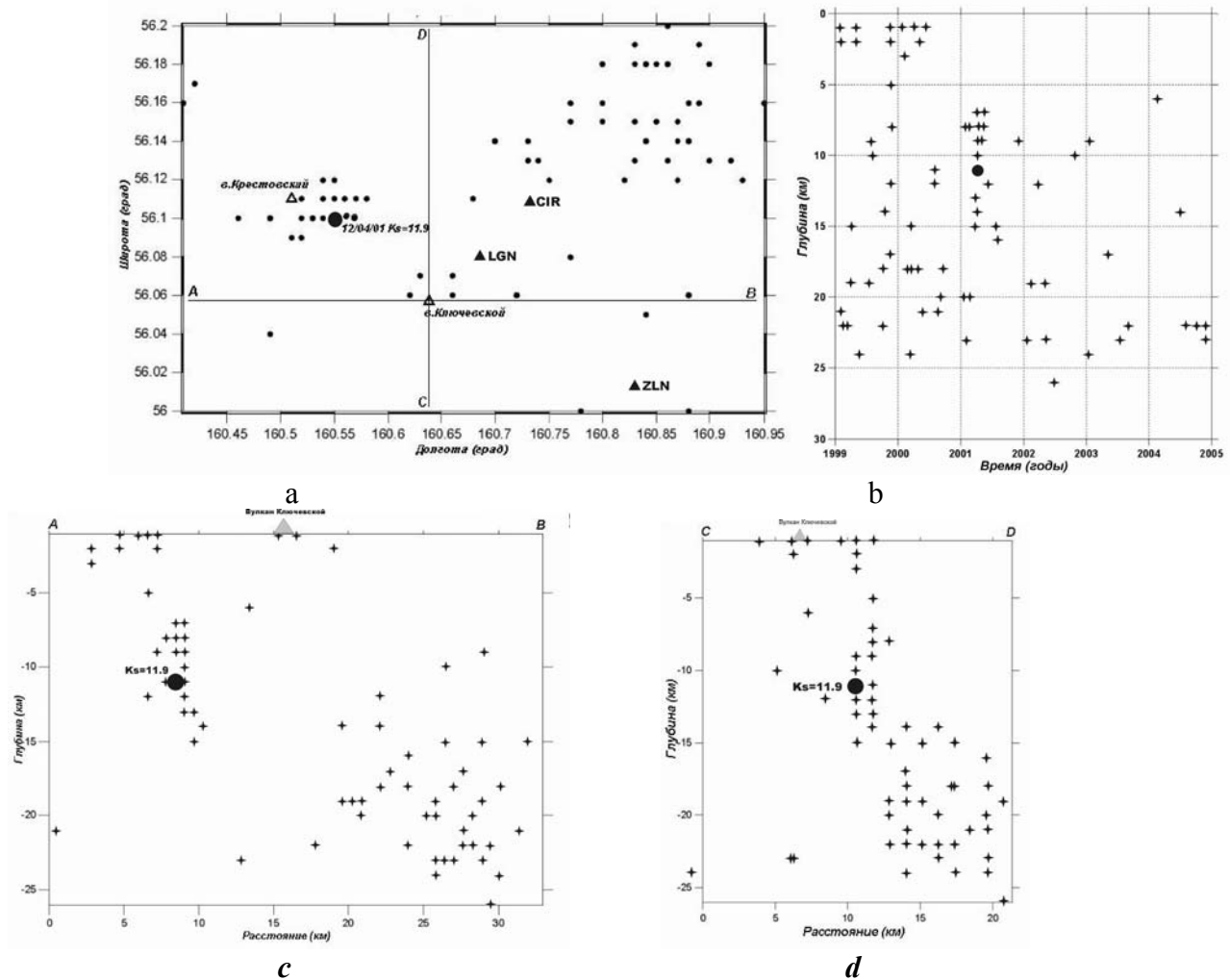


Рис. 1. а - карта эпицентров землетрясений  $K_s \geq 6.0$ ; б - распределение очагов по глубине в течение 1994-2004 гг.; с и d - проекции гипоцентров на вертикальные плоскости по линиям АВ и СД; залитым кружком показан эпицентр землетрясения  $K_s = 11.9$ ; черные треугольники с трехбуквенным кодом - ближайшие сейсмические станции; белые треугольники - вулканы.

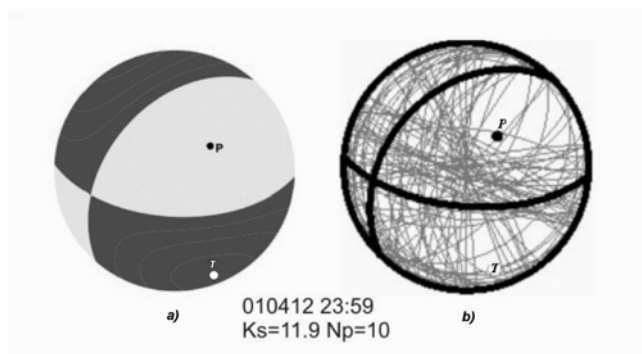


Рис. 2. Стереграммы механизма очага землетрясения 12.04.01,  $K_s = 11.9$ , рассчитанные по программам FA2002 (а) и NASH (б); Р и Т - оси сжатия и растяжения;  $N_p$  - количество знаков вступлений Р-волн.

На рис. 3 представлены стереографические проекции осей главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ , полученные в результате инверсии механизмов очагов  $K_s \geq 6.5$ . Мы наблюдаем близвертикально ориентированную ось  $\sigma_1$  и ориентированную в направлении СЗ-ЮВ расположенную близгоризонтально ось  $\sigma_3$ . Параметр F соответствует критерию

однородности поля напряжений,  $F = 6^\circ$ . Мы приняли эту модель тензора как базовую для расчета невязок.

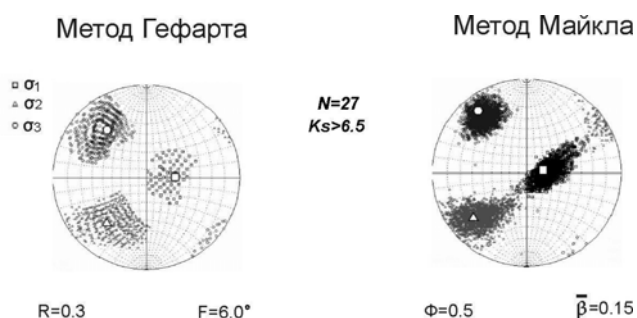


Рис 3. Стереографические проекции осей главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ , полученные в результате инверсии механизмов очагов  $K_s \geq 6.5$  (на 95% доверительном уровне),  $N$  - механизмов очагов, участвующих в инверсии.

С помощью метода кумулятивных невязок мы делили массив на когерентные группы, используя базовую модель тензора напряжений:  $\sigma_1 = 70^\circ / 90^\circ$  (угол/азимут) и  $R = 0.3$ .

#### **Изменения поля напряжений во времени**

График кумулятивных невязок по отношению к землетрясениям, сортированных по времени, показан на рис. 4. Даты, соответствующие изменению наклона, указаны на графике.

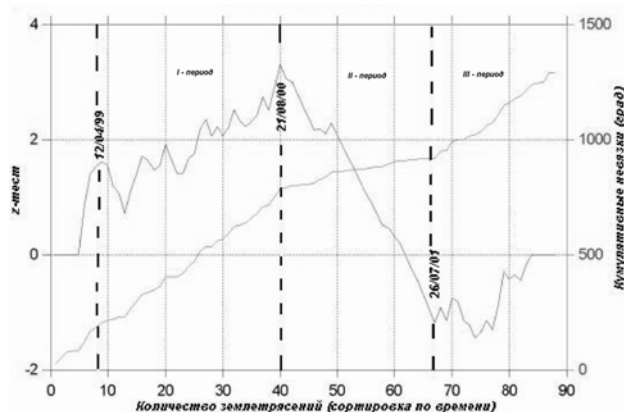


Рис. 4. График кумулятивных невязок (сортировка по времени 1999-2004 гг.). Временные фазы показаны вертикальными пунктирными линиями.

Для первого периода мы получили тензор напряжений с  $F = 8.7^\circ$ , что говорит о неоднородности поля напряжений. Дальнейшее деление его на меньшие отрезки времени не имело смысла из-за малого количества исходных данных [7]. Для второго периода, продолжавшегося с августа 2000 года по июль 2001 года, получен тензор напряжений с  $F = 6^\circ$ , что соответствует критерию однородности. Именно в этот период произошло наиболее сильное землетрясение с  $K_s = 11.9$ . Для третьего периода мы получили тензор напряжений с  $F = 6.7^\circ$ , что свидетельствует о некоторой неоднородности поля. Результат инверсии показан на рис. 5.

#### **Изменения поля напряжений по глубине**

График кумулятивных невязок по отношению к землетрясениям, сортированных по глубине, показан на рис. 6. Мы идентифицировали два изменения в наклоне графика - на глубине 5 км и на глубине 10-12 км, что соответствует распределению гипоцентров по глубине, которое наблюдается в течение 25-летнего периода исследований сейсмичности в ЦСО Ключевского вулкана [1]. В соответствии с этим делением по глубинам мы инвертировали механизмы очагов и получили параметры тензоров, соответствующие однородному полю напряжений, для интервалов глубин 0-5 км ( $F = 5.8^\circ$ ) и 5-12 км ( $F = 5.0^\circ$ ). Для интервала глубин 12-26 км мы получили значение  $F = 7.8^\circ$ , что не соответствует критерию однородности. На рис. 7 показаны стереограммы направлений осей главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  для интервалов глубин 0-5 км и 5-12 км.

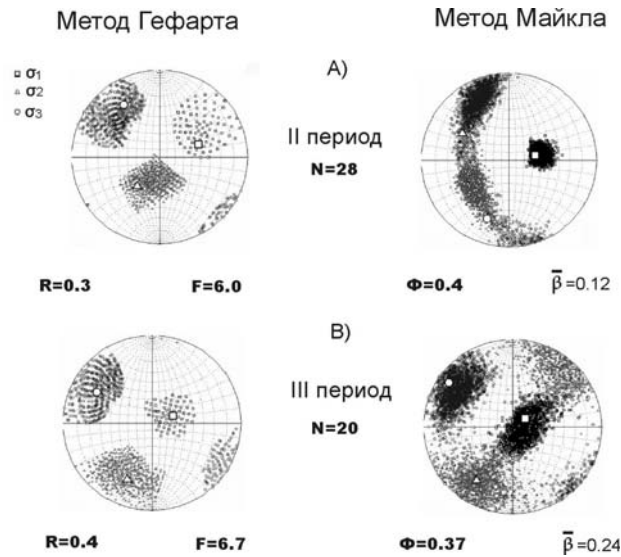


Рис. 5 Стереографические проекции направлений осей главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ , полученные в результате инверсии механизмов очагов: а - II период (авг. 2000 г.-июль 2001г.) В - III период (авг. 2001 г.-2004 г.),  $N_p$  - количество механизмов очагов, участвующих в инверсии.

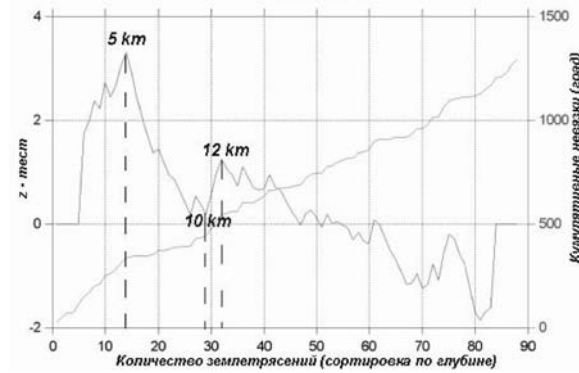


Рис. 6. График кумулятивных невязок (сортировка по глубине). Интервалы глубин, выделенные по оценке z-теста на 99% доверительном уровне, показаны вертикальными пунктирными линиями.

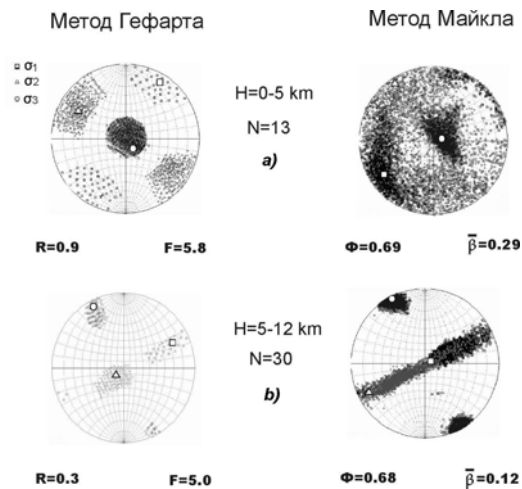


Рис. 7 Стереографические проекции направлений осей главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ , полученные в результате инверсии механизмов очагов, сортированных по глубине: а - для глубин 0-5км; б - для глубин 5-12 км;  $N$  - количество механизмов очагов, участвующих в инверсии.

### Изменения поля напряжений по широте и долготе

В соответствии с изменением наклона графиков кумулятивных невязок (рис. 8) мы разделили весь массив данных на две группы. Первая группа - это события, которые регистрируются к северо-западу от кратера Ключевского вулкана. Вторая группа - это землетрясения, которые регистрируются к северо-востоку от вулкана, восточнее  $160.77^\circ$  в.д. В результате инверсии механизмов очагов мы получили параметры тензоров напряжений для каждой группы, соответствующие критерию однородности. Стереограммы направлений осей главных напряжений показаны на рис. 9.

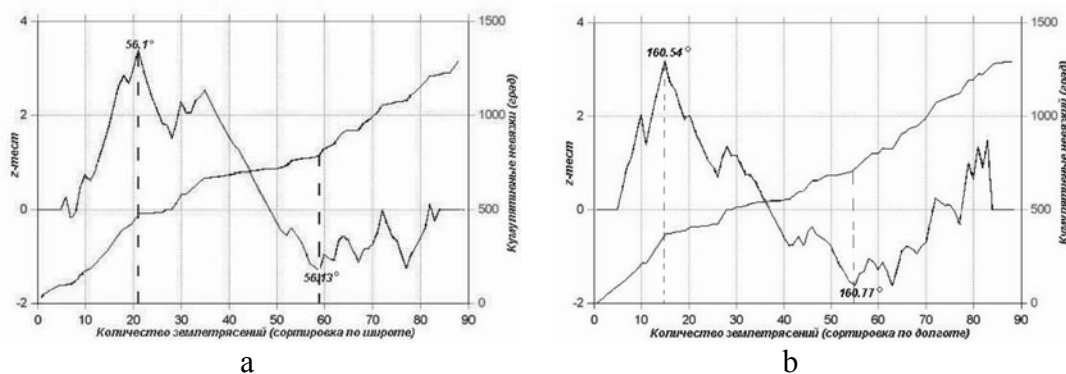


Рис. 8. Графики кумулятивных невязок: а - сортировка по широте, б - сортировка по долготе. Изменения наклона графиков, выделенные по оценке z-теста, показаны вертикальными пунктирными линиями.

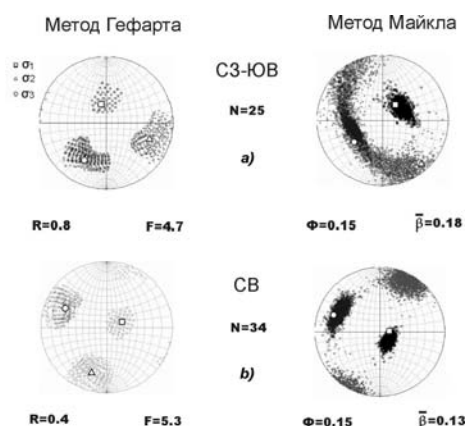


Рис. 9. Стереографические проекции направлений осей главных напряжений  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ , полученные в результате инверсии механизмов очагов, сортированных по широте и долготе: а - для событий к СЗ-ЮВ от кратера Ключевского вулкана; б - для землетрясений, расположенных к СВ от кратера.

### Результаты и обсуждение

То, что поле напряжений в земной коре под активными вулканами изменяется как функция пространства и времени, не вызывает сомнений. Проблема состоит в том, можем ли мы надежно оценить эти изменения, инвертируя механизмы очагов слабых землетрясений, зарегистрированных в ограниченном объеме земной коры.

Мы можем говорить о поле напряжений в окрестности Ключевского вулкана в период покоя, поскольку преобладающее большинство землетрясений, которые мы изучали в данной работе, произошли в отсутствие вулканической активности. Можно считать установленным, что наиболее сильные землетрясения с  $K_s \geq 6.5$  происходят под действием поля напряжений, главные оси которого ориентированы следующим образом:  $\sigma_1$  - близвертикальна,  $\sigma_2$  - близгоризонтальна и ориентирована в направлении СВ-ЮЗ,  $\sigma_3$  - близгоризонтальна и ориентирована в направлении СЗ-ЮВ. Подобное же расположение осей главных напряжений мы наблюдаем в период с августа 2000 года по июль 2001 года (определения сделаны для всех землетрясений, зарегистрированных в этот период). Мы позволим себе предположить, что это региональное поле напряжений, в котором происходит медленное погружение всего Ключевского дола, и оно если и менялось в рассматриваемый период времени, то незначительно.

Можно также считать установленным, что на небольших глубинах (0-5км) поле напряжений резко отличается от напряжений, действующих на глубине 5-12 км. На глубинах 0-5 км ось  $\sigma_3$  ориентирована близвертикально, в то время как на глубине 5-12 км вертикальное положение занимает  $\sigma_1$ , и наблюдается поле напряжений, близкое к региональному. Подобное изменение в ориентации осей описано для вулкана Редут, Аляска [7]. Глубже 5 км, где вес толщи горных пород становится преобладающим,  $\sigma_1$  вновь становится осью действия максимальных напряжений.

Относительно различий в напряженном состоянии области эпицентров землетрясений, находящихся к северо-востоку от кратера Ключевского вулкана и к северо-западу, следует отметить, что модель тензора для эпицентральной области к СВ от кратера близка к региональной модели. Для очагов, расположенных к СЗ от кратера, при близвертикальной оси  $\sigma_1$ ,  $\sigma_3$  занимает положение  $\sigma_2$  и становится ориентированной близгоризонтально в направлении СВ-ЮЗ. И хотя тензоры определены для этих двух областей достаточно надежно, мы пока не можем найти объяснение природы этого различия. Возможно, это различие связано со структурными особенностями ЦСО.

### **Выводы**

Мы определили механизмы очагов 88 вулканотектонических землетрясений Центральной сейсмоактивной области Ключевского вулкана за 1999-2004 гг. и установили, что преобладающими деформациями в очагах являются сбросо-сдвиги.

По механизмам очагов  $K_s \geq 6.5$  мы определили модель тензора напряжений для Центральной сейсмоактивной области Ключевского вулкана в период его покоя - ось  $\sigma_1$  ориентирована близвертикально,  $\sigma_2$  ориентирована близгоризонтально в направлении СВ-ЮЗ,  $\sigma_3$  - ориентирована близгоризонтально в направлении СЗ-ЮВ.

Мы не выявили существенных изменений поля напряжений во времени.

Мы обнаружили отличие поля напряжений на разных интервалах глубин под вулканом. Вертикально ориентированная ось  $\sigma_3$  на глубинах 0-5км замещается осью  $\sigma_1$  на глубине более 5 км, и это может означать, что величины всех трех главных напряжений примерно равны.

В данной работе представлены первые результаты по изучению напряженного состояния земной коры под Ключевским вулканом. Планируется дальнейшее продолжение работы.

### **Список литературы**

1. Горельчик В.И., Гарбузова В.Т. Сейсмичность Ключевского вулкана как отражение его современной магматической деятельности // Геодинамика и вулканизм Курило-Камчатской островодужной системы. ИВГиГ ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский, 2001. С. 352-373.
2. Cocina O., Neri G., Privitera E. et al. Stress tensor computations in the Mount Etna area (southern Italy) and tectonic implications // J. Geodyn. 1997. V. 23. P. 109-127.
3. Gephart J.W., Forsyth D.W. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando earthquake sequence // J. Geophys. Res. 1984. V. 89. P. 9305-9320.
4. Jolly A.D., Page R.A., Power J.A. Seismicity and stress in the vicinity of Mount Spurr volcano, south central Alaska // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P. 15305-15318.
5. Hardebeck J.L., Shearer P.M. A new method for determining first-motion focal mechanism. Bull. Seism. Soc. Am. 2002. V. 92. P. 2264-2276.
6. Michael A.J. Use of focal mechanism to determine stress: a control study // J. Geophys. Res. 1987. V. 92. P. 357-368.
7. Sanchez J.J., Wyss M., McNutt S.R. Temporal-spatial variations of stress at Redout volcano, Alaska, inferred from inversion of fault plane solutions // J. of Volcanology and Geothermal Research. 2004. V. 130. № 1-2. P. 1-30.

8. *Wiemer S.* A software package to analyze seismicity: ZMAP // *Seism. Res. Lett.* 2001. V. 72. P. 373-382.
9. *Wyss M., Gillard D., Liang B.* An estimate of the absolute stress tensor in Kaoiki, Hawaii // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 4763-4768.
10. *Wyss M., Liang B.* Comparison of stress and strain tensor based on fault plane solutions in Kaoiki, Hawaii // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 4769-4790.
11. *Wyss M., Lu Z.* Plate boundary segmentation by stress direction: Southern San-Andreas fault, California // *Geophys. Res. Lett.* 1995. V. 22. P. 547-550.