



SPECIFIC FEATURES OF EARTHQUAKE MANIFESTATION IN SEISMOTECTONIC DEFORMATION FIELD

O. A. Kuchay

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS,
630090, Novosibirsk, acad. Koptuyug prosp., 3, Russia*

Abstract: Earthquake concentration areas in the changeable stress-strain medium are considered. In strong earthquake centres, rupturing occurs within the limits of the arbitrarily-set boundary between deformations of positive and negative values in the field of latitudinal, meridional and vertical components of seismotectonic deformation (Fig. 1–12).

Keywords: seismotectonic deformation, focal mechanism of earthquakes.

Recent geodynamics

Recommended by S.I. Sherman 10 August 2010

Kuchay O.A. Specific features of earthquake manifestation in seismotectonic deformation field // Geodynamics & Tectonophysics. 2010. V. 1. № 3. P. 285–296.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЯВЛЕНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ПОЛЕ СЕЙМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ

O. A. Kuchay

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, проспект академика Коптюга, 3, Россия*

Аннотация: В работе рассматривается вопрос о местах сосредоточенности землетрясений в изменяющейся напряженно-деформированной среде. Вспарывание в очагах ряда сильных землетрясений начинается в пределах условной границы, разделяющей положительные и отрицательные величины деформаций в поле широтной, меридиональной и вертикальной компонент сейсмотектонических деформаций (рис. 1–12).

Ключевые слова: сейсмотектоническая деформация, механизм очага землетрясений.

В последнее время усиливается интерес к анализу непосредственных проявлений напряженно-деформированного состояния среды в очаговых зонах готовящихся землетрясений. Как известно, важное значение в возникновении землетрясений могут иметь контакты сред с разной реологией. Концентраторы напряжения в таких средах обусловлены разной деформируемостью объемов горных масс. Исследованы особенности сейсмотектонических деформаций этих сред, полученные по данным механизмов очагов умеренных землетрясений перед сильными сейсмическими событиями.

В настоящее время утвердились представления о деформировании значительных объемов земной коры при смещениях по разноориентированным разрывам в очагах землетрясений [Ризниченко, 1985; Костров, 1975; Юнга, 1979]. Такая деформация получила название сейсмотектонической (СТД). Средний тензор СТД равен сумме тензоров сейсмических моментов всех землетрясений, возникших в единице объема за определенный промежуток времени:

$$E_{im} = \frac{1}{\mu V} \sum_{n=1}^N M_0^{(n)} Q_{im}^{(n)},$$

где μ – модуль упругости на сдвиг, V – объем осреднения, $M_0^{(n)}$ – величина сейсмического момента n -го землетрясения, $Q_{im}^{(n)}$ – компоненты единичного тензора сейсмического момента n -го землетрясения. Ориентировка единичного тензора сейсмического момента задается механизмом очага землетрясения. $M_0^{(n)}$ служит весовым коэффициентом, N – число землетрясений в объеме осреднения. При массовых определениях M_0 вычисляется по энергетическому классу (или магнитуде) землетрясения [Ризниченко, 1985].

Для расчета сейсмотектонических деформаций привлекались данные о механизмах очагов землетрясений [Harvard CMT Catalog] с $M > 4.6$, произошедших в сейсмоактивных регионах Земли с 1976 г. по март 2010 г. СТД тех участков, где, наряду со слабыми, возникли и сильные землетрясения, определяется в основном сильными. Поэтому использование землетрясений с $M > 4.6$ позволяет нам рассчитать сейсмотектоническую деформацию перед сильнейшими событиями. Выбор сильнейших землетрясений осуществлялся с учетом того, чтобы материал, используемый для расчета СТД, был представительным. На данном этапе расчет проводился в случае, если площадки осреднения вблизи эпицентра сильнейшего землетрясения содержали не менее двух-трех механизмов очагов землетрясений. В более удаленных зонах в ячейки осреднения могло попасть и по одному событию.

Так как для многих районов Земли определения механизмов очагов землетрясений в каталоге СМТ, особенно в ранние периоды, представлены не полностью, нами рассматривались сильнейшие землетрясения 2000–2010 гг., а также представительный

материал с 1976 г., т.е. за 15–30 лет до этих событий.

При расчете СТД большое значение имеет выбор объема осреднения из-за неравномерного распределения землетрясений в пределах района и величины произошедших землетрясений. В нашем случае величина участка осреднения выбрана таким образом, чтобы его размеры превышали предполагаемые величины разрывов, вызванных землетрясениями, входящими в ячейку. Размер площадок осреднения соответственно равен $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, шаг 0.25° . Глубины очагов используемых землетрясений приводятся в подписях к рисункам и составляют 10–60 км.

В данной работе рассмотрены только широтная, меридиональная и вертикальная компоненты деформаций. Результаты представлены картами компонент тензора сейсмотектонических деформаций E_{xx} (широтная), E_{yy} (меридиональная), E_{zz} (вертикальная). На этих картах-схемах положительные значения деформаций соответствуют относительному удлинению, отрицательные значения – относительному укорочению линейных размеров элементарных объемов в соответствующих направлениях. Так как нас интересуют только области удлинения и укорочения, на картах не приводятся непосредственно сами величины деформаций. Эпицентры сильнейших землетрясений, перед которыми рассчитаны деформации, нанесены по каталогам геологической службы США [USGS] и каталогу СМТ.

Эпицентры землетрясений 19 марта 2009 г., 18 ноября 2003 г., 10 августа 2009 г. и 27 декабря 2003 г. характеризуются тем, что на картах трех компонент (E_{xx} , E_{yy} , E_{zz}), рассчитанных по механизмам очагов землетрясений, произошедших до этих сильнейших событий, располагаются вблизи нулевой изолинии (рис. 1–4). Вспарывание разрывов при землетрясениях 29 сентября 2009 г. и 5 декабря 2003 г. происходит в зоне смены характера деформаций в поле двух компонент, в поле третьей продольной компоненты эпицентры попадают в однородное поле (рис. 5, 6). Эпицентры землетрясений 2003 г. (20 января, 7, 20 июня, 8 октября) и землетрясения 6 апреля 2010 г. зафиксированы вблизи линии смены деформации растяжения и сжатия только в поле одной компоненты (рис. 7–11). В ряде случаев сильные землетрясения происходят в однородном поле сейсмотектонических деформаций (рис. 12). Практически все землетрясения, до которых нам удалось рассчитать сейсмотектоническую деформацию, произошли в зонах субдукции.

Из приведенных рисунков (рис. 1–11) следует, что сейсмотектонические деформации, рассчитанные по данным механизмов очагов землетрясений до главных толчков, характеризуются тем, что основные землетрясения произошли в пределах границы изменения характера деформаций в поле компонент E_{xx} , E_{yy} , E_{zz} .

В пользу того, что ряд землетрясений происходит в зоне условной границы, разделяющей положительные и отрицательные величины деформаций, свидетельствуют и материалы по Алтайскому землетрясению (27 сентября 2003 г., $M=7.3$,

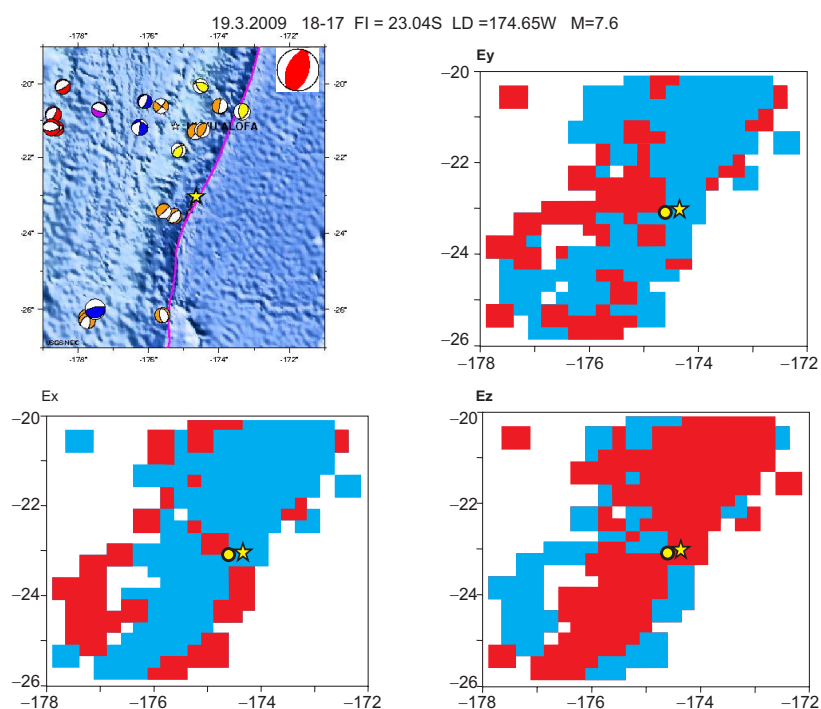


Рис. 1. Поля широтной (Ex), меридиональной (Ey) и вертикальной (Ez) компонент сеймотектонических деформаций по данным механизмов очагов умеренных событий в период подготовки сильнейшего землетрясения 19 марта 2009 г. ($M=7.6$). Красным цветом показаны области удлинения, синим – укорочения. Кружком отмечен эпицентр землетрясения по данным геологической службы США, звездочкой – по материалам Гарвардского каталога СМТ. Глубина главного события по данным (<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes>) 34 км, по данным (www.globalcmt.org) 49 км. Для расчета использовалось 507 землетрясений с глубиной 10–67 км. На врезке, расположенной в левом верхнем углу, показаны механизмы очагов землетрясений за последние несколько лет перед сильнейшим землетрясением и диаграмма механизма этого сильнейшего события.

Fig. 1. Fields of latitudinal (Ex), meridional (Ey) and vertical (Ez) components of seismotectonic deformation (STD), reconstructed from focal data on medium-scale earthquakes for the period before the strong earthquake ($M=7.6$) of 19 May 2009. Extension areas are coloured in red; compression areas are coloured in blue. The earthquake epicentre is shown by a dot as per data from the US Geological Survey data, and by a star as per data from the Harvard CMT Catalogue.

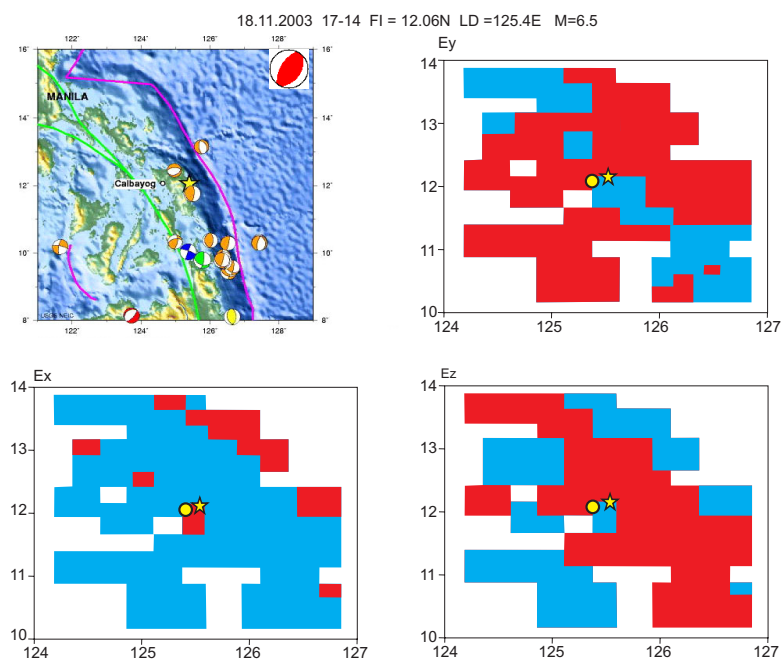


Рис. 2. Обозначения те же, что и на рис. 1. STD перед сильнейшим землетрясением 18 ноября 2003 г. ($M=6.5$). Глубина главного события по разным каталогам 35 км и 37 км. Для расчета использовалось 95 землетрясений с глубиной 10–33 км.

Fig. 2. STD before the strong earthquake of 18 November 2003 ($M=6.5$). See Figure 1 for legend.

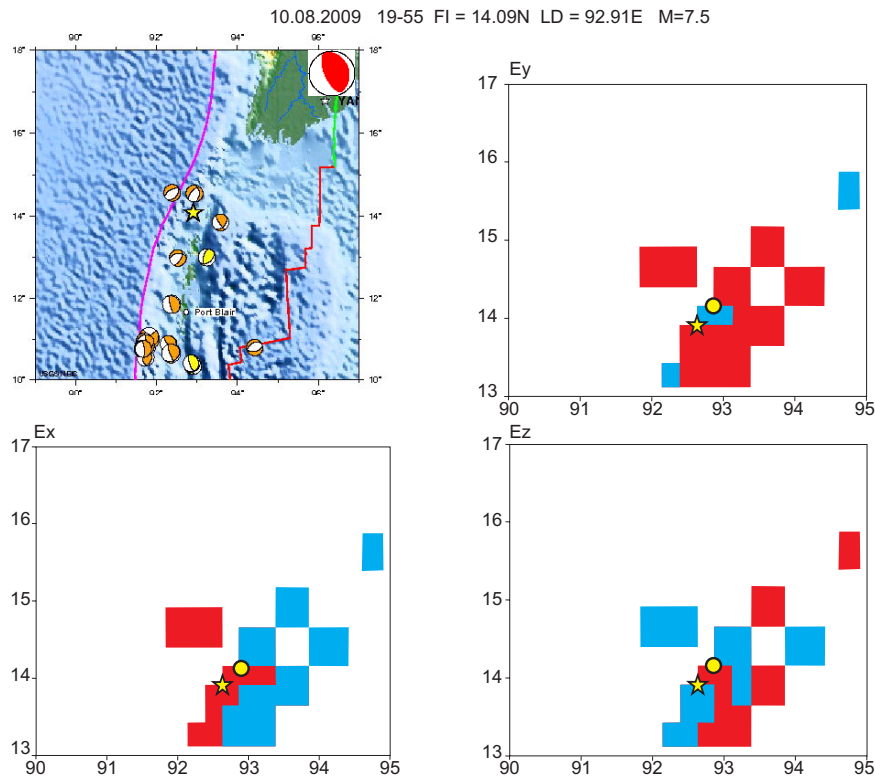


Рис. 3. Обозначения те же, что и на рис. 1. STD перед сильнейшим землетрясением 10 августа 2009 г. ($M=7.5$). Глубина главного события 33 км и 14 км соответственно по разным каталогам. Для расчета использовалось 50 землетрясений с глубиной 10–44 км.

Fig. 3. STD before the strong earthquake of 10 August 2009 ($M=7.5$). See Figure 1 for legend.

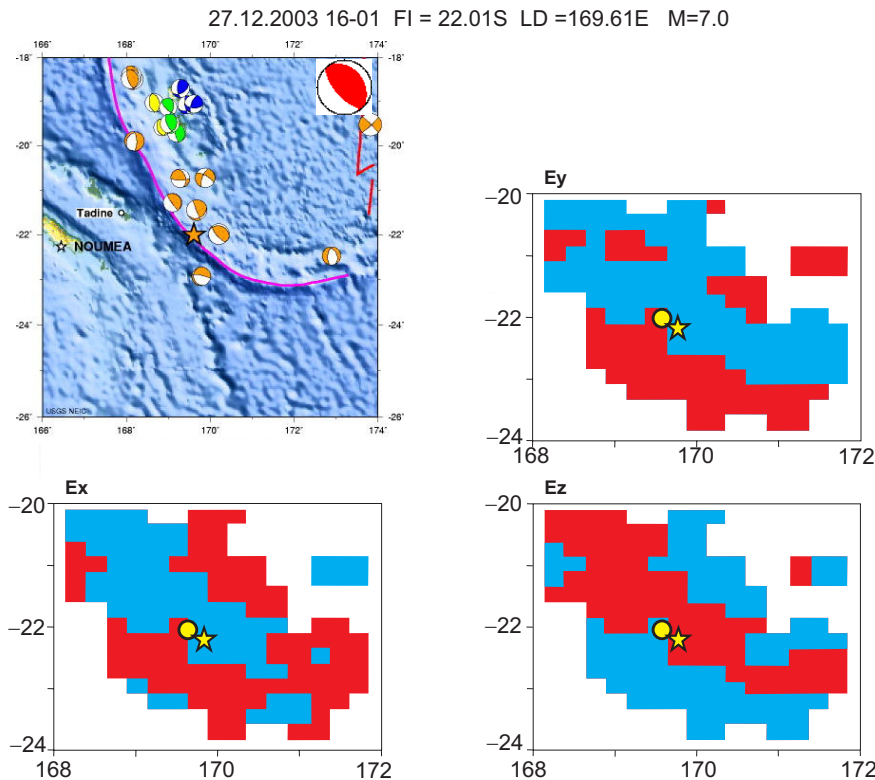


Рис. 4. Обозначения те же, что и на рис. 1. STD перед сильнейшим землетрясением 27 декабря 2003 г. ($M=7.0$). Глубина главного события 10 км и 23 км. Для расчета использовалось 176 землетрясений с глубиной 10–35 км

Fig. 4. STD before the strong earthquake of 27 December 2003 ($M=7.0$). See Figure 1 for legend.

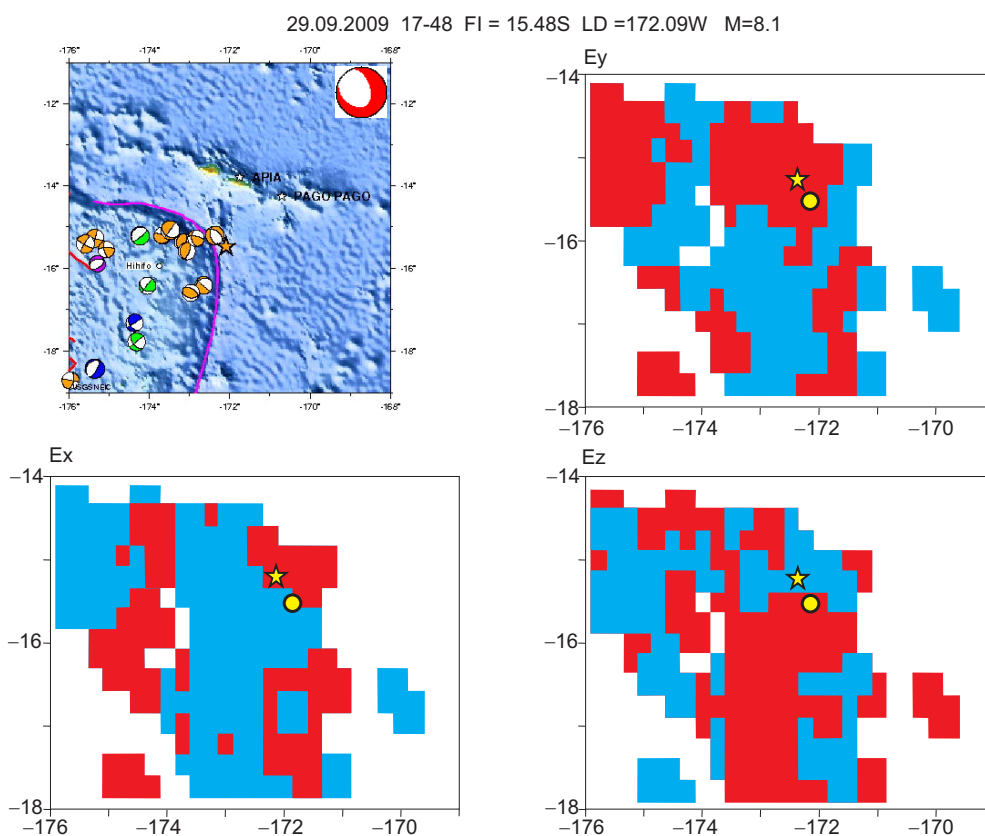


Рис. 5. Обозначения те же, что и на рис. 1. STD перед сильнейшим землетрясением 29 сентября 2009 г. ($M=8.1$). Глубина главного события 18 км и 12 км. Для расчета использовалось 491 землетрясение с глубиной 15–65 км.

Fig. 5. STD before the strong earthquake of 29 September 2009 ($M=8.1$). See Figure 1 for legend.

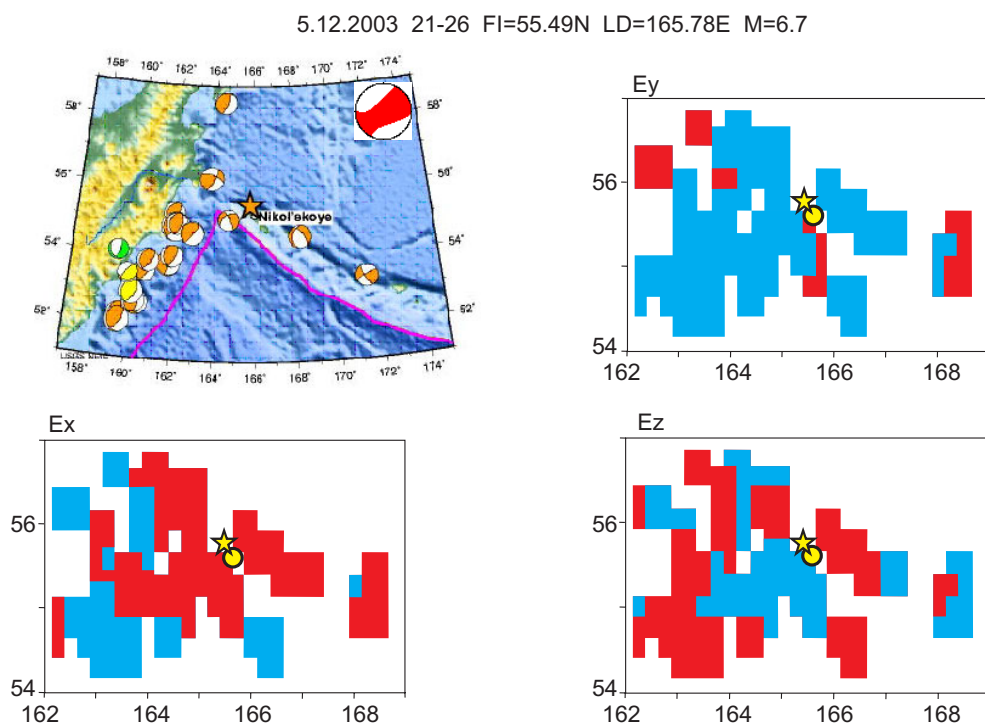


Рис. 6. Обозначения те же, что и на рис. 1. STD перед сильнейшим землетрясением 5 декабря 2003 г. ($M=6.7$). Глубина главного события 10 км и 18 км. Для расчета использовалось 63 землетрясения с глубиной 15–34 км.

Fig. 6. STD before the strong earthquake of 05 December 2003 ($M=6.7$). See Figure 1 for legend.

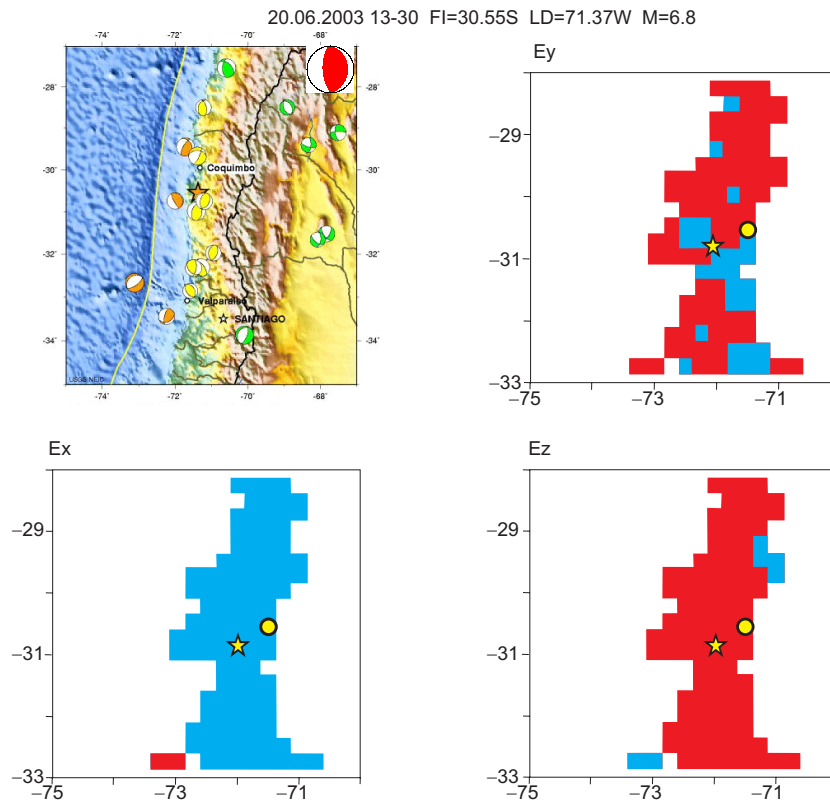


Рис. 7. Обозначения те же, что и на рис. 1. STD перед сильнейшим землетрясением 20 июня 2003 г. ($M=6.8$). Глубина главного события 13 км и 35 км. Для расчета использовалось 81 землетрясение с глубиной 15–55 км.

Fig. 7. STD before the strong earthquake of 20 June 2003 ($M=6.8$). See Figure 1 for legend.

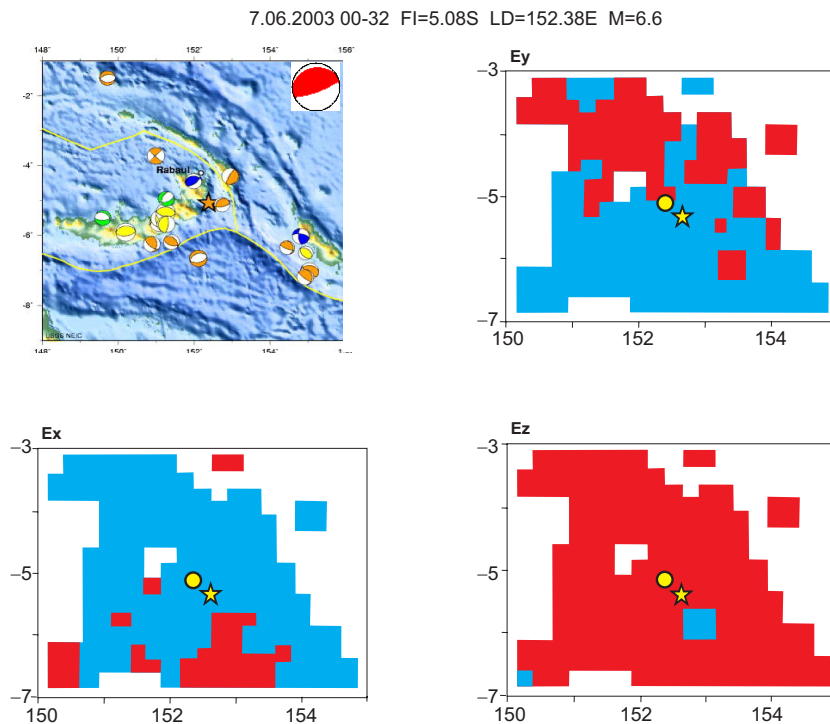


Рис. 8. Обозначения те же, что и на рис. 1. STD перед сильнейшим землетрясением 7 июня 2003 г. ($M=6.6$). Глубина главного события 33 км и 30 км. Для расчета использовалось 288 землетрясений с глубиной 10–45 км.

Fig. 8. STD before the strong earthquake of 07 June 2003 ($M=6.6$). See Figure 1 for legend.

20.01.2003 08-43 FI=10.49S LD=160.77E M=7.3

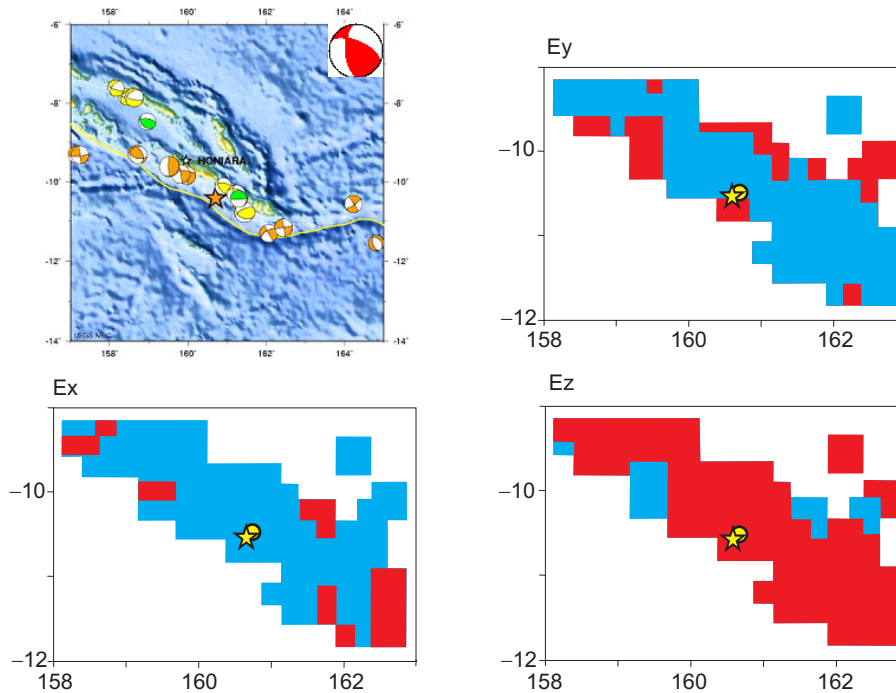


Рис. 9. Обозначения те же, что и на рис. 1. STD перед сильнейшим землетрясением 20 января 2003 г. ($M=7.3$). Глубина главного события 33 км и 31 км. Для расчета использовалось 110 землетрясений с глубиной 10–41 км.

Fig. 9. STD before the strong earthquake of 20 January 2003 ($M=7.3$). See Figure 1 for legend.

8.10.2003 09-06 FI=42.66N LD=144.49E M=6.7

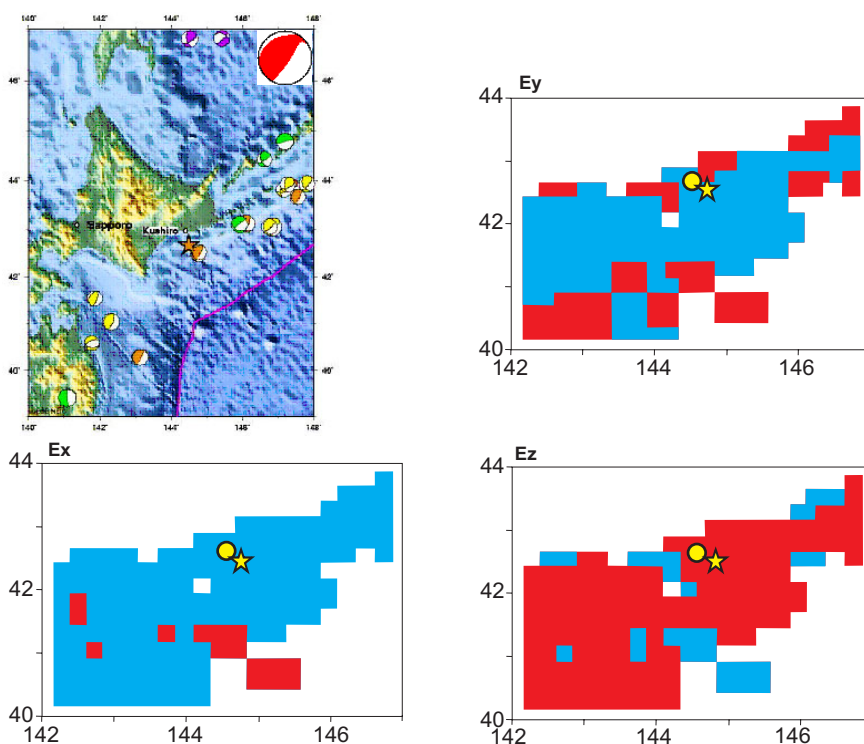


Рис. 10. Обозначения те же, что и на рис. 1. STD перед сильнейшим землетрясением 8 октября 2003г. ($M=6.7$). Глубина главного события 32 км и 36 км. Для расчета использовалось 143 землетрясения с глубиной 15–54 км.

Fig. 10. STD before the strong earthquake of 08 October 2003 ($M=6.7$). See Figure 1 for legend.

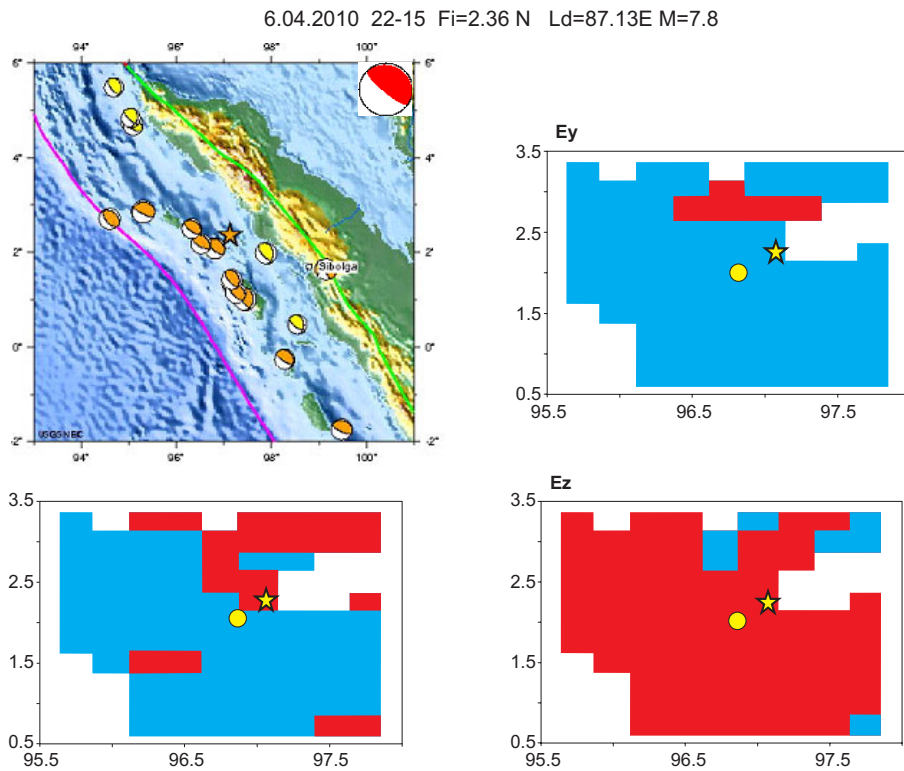


Рис. 11. Обозначения те же, что и на рис. 1. STD перед сильнейшим землетрясением 6 апреля 2010 г. ($M=7.8$). Глубина главного события 31 км и 20 км. Для расчета использовалось 143 землетрясения с глубиной 12–50 км.

Fig. 11. STD before the strong earthquake of 06 April 2010 ($M=7.8$). See Figure 1 for legend.

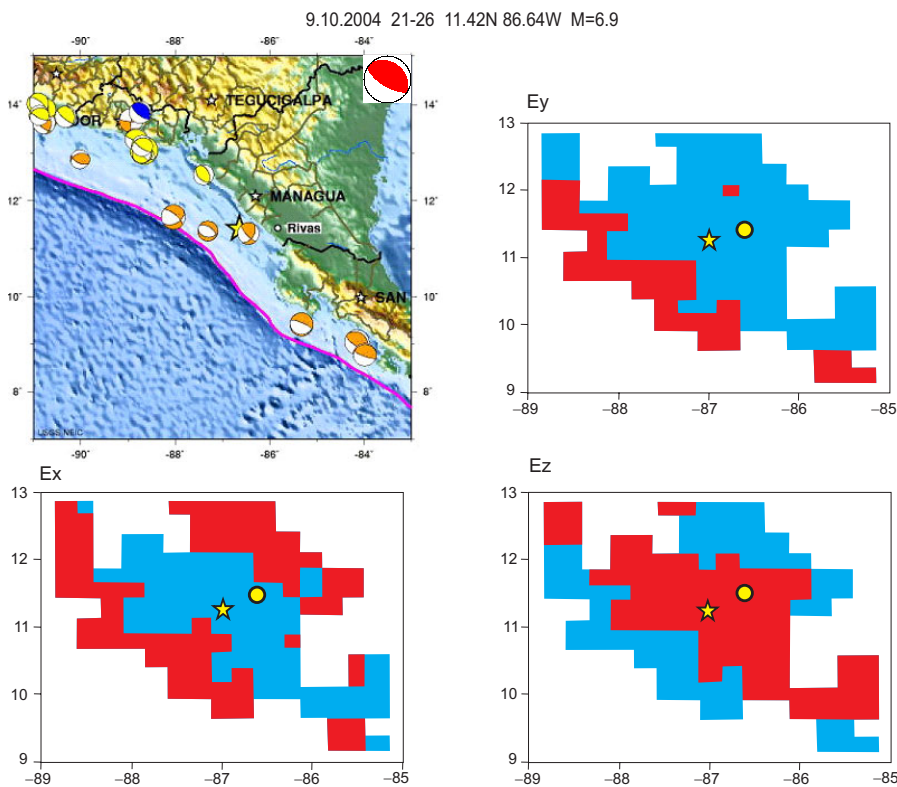


Рис. 12. Обозначения те же, что и на рис.1. STD перед сильнейшим землетрясением 9 октября 2004 г. ($M=6.9$). Глубина главного события 35 км и 39 км. Для расчета использовалось 90 землетрясений с глубиной 15–44 км.

Fig. 12. STD before the strong earthquake of 09 October 2004 ($M=6.9$). See Figure 1 for legend.

$\varphi=50.04^\circ$, $\lambda=87.97^\circ$). Согласно статье [Гольдин, Кучай, 2008], сейсмотектонические деформации, накопленные за 30 лет до землетрясения, показывают, что в области подготовки Алтайского землетрясения ориентация главных осей сейсмотектонических деформаций такова, что к западу от очага будущего землетрясения оси удлинения близгоризонтальны при близвертикальных осях укорочения, к востоку от очага расположена зона с близгоризонтальными осями укорочения. Следовательно, всплывание при Алтайском землетрясении произошло в зоне контакта деформаций с разнонаправленным положением максимальных осей сжатия и растяжения. Данные космической геодезии [Гольдин и др., 2005] подтверждают этот вывод.

Аналогичная картина была получена и при расчете деформаций по GPS-данным. Расчеты тензоров скоростей деформаций на основе данных GPS были осуществлены по методике [Burford et al., 1968]. В пределах каждой элементарной площадки выделялись три пункта наблюдения GPS, составляющие наибольшую площадь в ячейке. Если площадка содержала только одну или две точки регистрации, то площадь увеличивалась к северу и востоку в два раза.

Для этого использовались изменения длины трех непараллельных линий в каждой ячейке осреднения. Суть метода заключается в следующем. По данным о скоростях деформаций трех непараллельных линий измерений, имеющих с осью координат соответствующие углы, составляется система трех уравнений, далее вычисляются определители и рассчитываются компоненты линейной скорости деформации. Для изучаемого региона расчеты по скоростям деформаций были получены в работе [Тычков и др., 2008]. Напомним некоторые данные из этой статьи. Рассматриваемый регион ограничен координатами $41\text{--}44^\circ$ с.ш., $75\text{--}79^\circ$ в.д. и для расчета разделен на элементарные площадки размером $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ с шагом 0.25° . В пределах каждой элементарной площадки выделялись три пункта наблюдения GPS, составляющие наибольшую площадь в ячейке. Если площадка содержала только одну или две точки регистрации, то площадь увеличивалась к северу и востоку в два раза.

Все вычисления компонент горизонтальной деформации проводились для временных интервалов 1994–1998 гг., 1994–1999 гг., 1994–2000 гг., 1994–2001 гг. Плотность сети GPS увеличивалась с каждым годом, поэтому в первом временном интервале использовались 54 пункта наблюдений, во втором – 57, в третьем – 91, в четвертом – 102. Данные GPS любезно предоставлены А.В. Зубовичем, а также заимствованы из работ [Зубович и др., 2001; Зубович, Мухамедиев, 2010]. Полученные в статье [Тычков и др., 2008] поля приращений скоростей деформаций использовались в настоящей работе следующим образом: на картах широтной и меридиональной компонент деформаций эпицентры землетрясений с $M > 3.5$ наносились за последний год каждого временного интервала.

Площадное распределение умеренных ($5.0 > M > 3.5$) землетрясений и областей положительных и

отрицательных скоростей продольных деформаций, рассчитанных по данным GPS для Северного Тянь-Шаня, показало, что наблюдается локализация эпицентров готовящихся землетрясений в зоне смены знака деформации сжатия–растяжения. Близость к нулевой изолинии очагов землетрясений хотя бы на одной из компонент на материале GPS по Северному Тянь-Шаню отмечается практически всегда (рис. 13, 14).

Описанные явления рассмотрены С.В. Гольдиным и О.А. Кучай [2008] с точки зрения мезомеханической концепции пластического состояния вещества [Панин, 1998]. В рамках этой концепции, согласно основным положениям физической мезомеханики, развитие разрушения (на любом масштабном уровне) происходит по схеме: первичный концентратор напряжения → релаксационный стесненный сдвиг → стесненный поворот → формирование деформации изгиба–кручения → последующий релаксационный сдвиг. Разрыв по магистральной трещине является финальным релаксационным сдвигом. При этом важную роль играют жесткие домены, способные к повороту как целое. Изгибная деформация появляется в последний этап развития напряженно-деформированного состояния в очаговой области землетрясения и накладывается на уже существующее поле деформаций.

Классические теории изгиба и кручения имеют дело с идеальными объектами (стержни, балки, пластины), ограниченными свободными границами, тогда как в нашем случае имеют место стесненные при изгибе и кручении объекты, ограниченные областями неоднородной сплошной среды.

Важнейшей характеристикой изгибаемых объектов является наличие нейтральной поверхности. Нейтральная поверхность является границей между положительными и отрицательными значениями деформаций. При сечении нейтральной поверхности горизонтальной плоскостью получается линия изгиба.

При рассмотрении механизма влияния изгибной деформации на формирование главного разрыва имеет смысл говорить о двух возможностях. Первая состоит в том, что, благодаря упругому повороту жесткого блока, поле сдвиговой деформации в некоторой ограниченной области полностью трансформируется в изгибную деформацию. Изгибные деформации инициируют возникновение трещины отрыва в пределах сейсмогенного разлома (либо в полосе локализованной деформации), которая, в свою очередь, вызывает неустойчивость по всему сейсмогенному разлому. Предполагается, что землетрясение возникает на некотором расстоянии от пересечения нейтральной поверхности с сейсмогенным разломом. Вторая возможность состоит в том, что изгибная деформация есть локальное ослабление общего поля сдвиговой деформации. Возникающее напряжение растяжения при поперечном пересечении нейтральной поверхности и сейсмогенного разлома снижает нормальное напряжение сжатия на разломе, что увеличивает отношение T/N (здесь T – касательное и N – нормальное напряжение на разломе) и ускоряет раз-

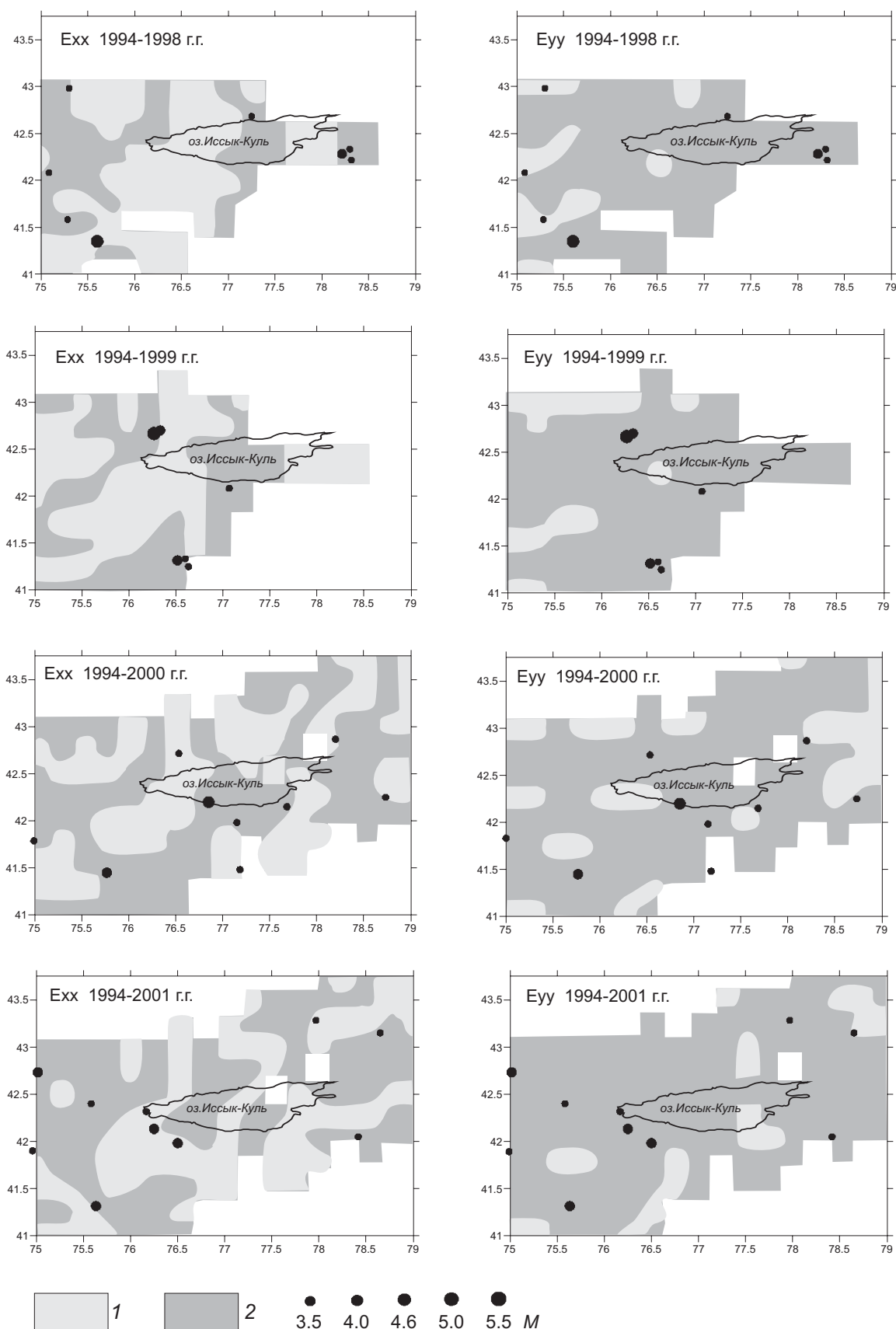


Рис. 13. Карты-схемы распределения эпицентров землетрясений в течение последнего года каждого временного интервала в поле компонент E_{yy} и E_{xx} по данным GPS для территории Северного Тянь-Шаня за 1994–1998 г., 1994–1999 г., 1994–2000 г. и 1994–2001 г. 1 – области положительных значений деформаций; 2 – области отрицательных значений деформаций.

Fig. 13. Schematic maps showing distribution of earthquake epicentres in the field of E_{yy} and E_{xx} components, as per GPS data for the territory of the Northern Tien Shan, for the last year of each time interval: 1994–1998, 1994–1999, 1994–2000, and 1994–2001. 1 – areas of deformations with positive values; 2 – areas of deformations with negative values.

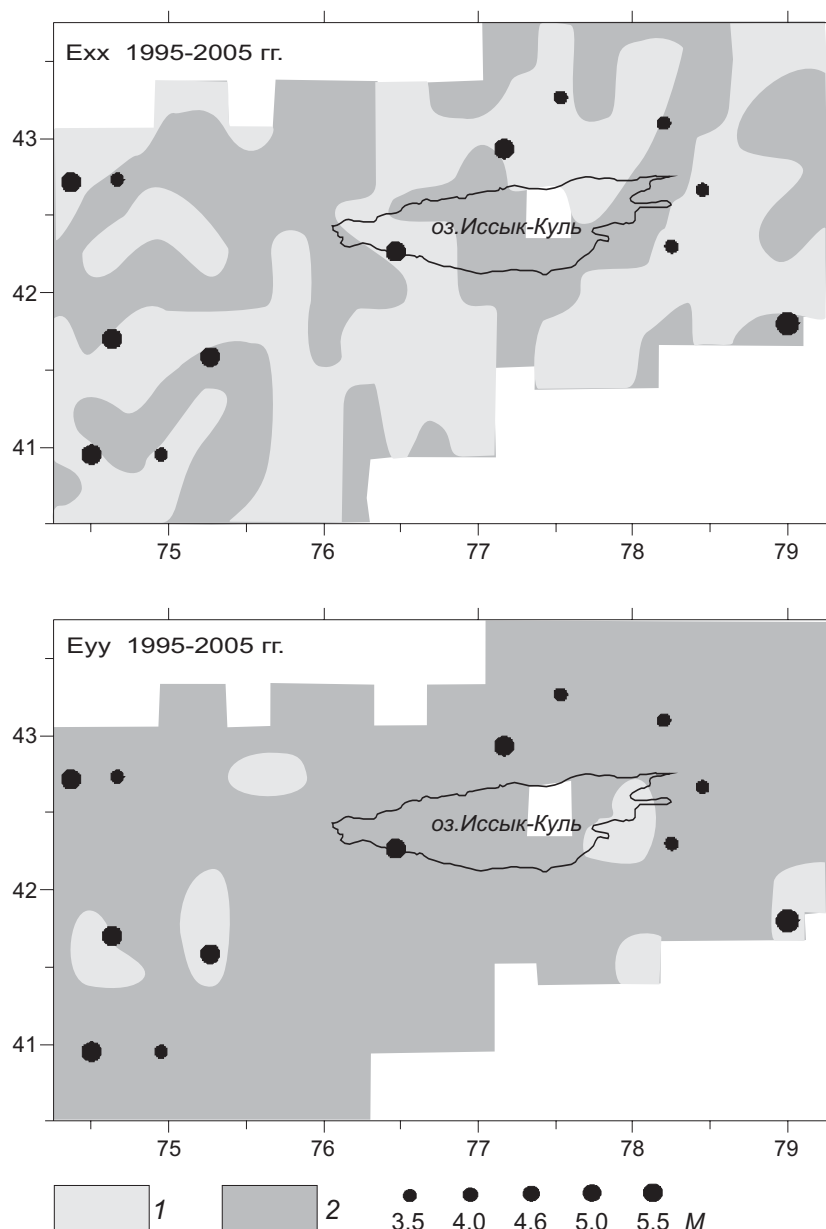


Рис. 14. Карты-схемы распределения эпицентров землетрясений в течение последнего года в поле компонент E_{yy} и E_{xx} по данным GPS для территории Северного Тянь-Шаня за 1995 г. – июнь 2005 г. Обозначения те же, что и на рис. 13.

Fig. 14. Schematic map showing distribution of earthquake epicentres in the field of E_{yy} and E_{xx} components, as per GPS data for the territory of the Northern Tien Shan, for the period from 1995 to June 2005. See Figure 13 for legend.

рыв в рамках критерия Кулона-Мора.

Таким образом, представленный материал показывает, что вспарывание разрывов при ряде сильнейших землетрясений инициируется на границе изолинии нулевой деформации, полученной при расчете СТД по данным механизмов очагов предшествующих землетрясений. Фиксируется близость эпицентров землетрясений с $M > 3.5$ к нулевым изолиниям (по GPS), разделяющим положительные и отрицательные участки деформации.

Работа была выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 16, проект № 16.8 и при частичной поддержке

РФФИ (проект № 10-05-01042).

ЛИТЕРАТУРА

- Гольдин С.В., Кучай О.А. Сейсмотектонические деформации в окрестности сильных землетрясений Алтая // Физическая мезомеханика. – 2008. – Т. 11, № 1. – С. 5–13.
- Гольдин С.В., Тимофеев В.Ю., Ардюков Д.Г. Поля деформаций земной поверхности в зоне Чуйского землетрясения, Горный Алтай // Доклады АН. – 2005. – Т. 405, № 6. – С. 804–809.
- Зубович А.В., Мухамедиев Ш.А. Метод наложенных триангуляций для вычисления градиента скорости горизонтальных движений: приложение к Центрально-Азиатской GPS-сети // Геодинамика и тектонофизика. – 2010. – Т. 1, № 2. – С. 169–185.
- Зубович А.В., Трапезников Ю.А., Брагин В.Д., Мосиенко О.И.,

- Щелочков Г.Г., Рыбин А.К., Баталев В.Ю.* Поле деформации, глубинное строение земной коры и пространственное распределение сейсмичности Тянь-Шаня // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42, № 10. – С. 1634–1640.
- Костров Б.В.* Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1975. – 174 с.
- Панин В.Е.* Основы физической мезомеханики // Физическая мезомеханика. – 1998. – Т. 1, № 1. – С. 5–22.
- Ризниченко Ю.В.* Проблемы сейсмологии. – М.: Наука, 1985. – 408 с.
- Тычков С.А., Кучай О.А., Бушенкова Н.А., Брагин В.Д., Кальметьева З.А.* Природа современных деформаций коры Северного Тянь-Шаня по геодезическим и сейсмологическим данным // Геология и геофизика. – 2008. – Т. 49, № 4. – С. 367–381.
- Юнга С.Л.* О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1979. – № 10. – С.14–23.
- Burford R.O., Eaton J.P., Pakiser L.C.* Crustal strain and microseismicity investigations at the national center for earthquake research of the United States geological survey // Проблемы современных движений земной коры. – Л., 1968. – С. 370–377.
- Harvard CMT Catalog* – <http://www.globalcmt.org>.
- USGS* – <http://earthquake.usgs.gov>.



Кучай Ольга Анатольевна, канд. физ.-мат. наук, с. н. с.
Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН
630090, Новосибирск, проспект академика Коптюга, 3, Россия
Тел. (383)3333792; e-mail: KuchayOA@ipgg.nsc.ru



Kuchay Olga A., Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher
Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS
630090, Novosibirsk, acad. Koptuyug prosp., 3, Russia
Tel. (383)3333792; e-mail: KuchayOA@ipgg.nsc.ru