

УДК 550.34+539.3 +551.24

## ФОКАЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ ПО ДАННЫМ СЕТИ KNET

Н.А. Сычева, В.Н. Сычев

Получены решения фокальных механизмов очагов по знакам первых вступлений продольных волн (1056 событий) и на основе инверсного метода (30 событий) для землетрясений Северного Тянь-Шаня по данным сети KNET. Построены диаграммы распределения азимутов осей сжатия и растяжения. Проведено сравнение полученных результатов с данными каталога СМТ (Гарвардский университет) и исследованиями других авторов.

*Ключевые слова:* землетрясение; фокальный механизм очага; тензор сейсмического момента; знак прихода Р-волны; инверсный метод; ось сжатия.

## FOCAL MECHANISMS OF EARTHQUAKES OF THE NORTHERN TIEN-SHAN ACCORDING TO THE KNET DATA

N.A. Sycheva, V.N. Sychev

There were worked out the solutions for focal mechanisms of seismic focuses by the signs of first P-waves arrival (1056 events) using the inversion method (30 events) for the earthquakes occurred within North Tien-Shan according to the KNET data. The distribution diagrams for compression and tension axes azimuths were constructed. The comparison between results obtained and CMT (Centroid-Moment-Tensor) catalog (Harvard University) data and investigations of other authors were made.

*Key words:* earthquake; focal mechanism of source; tensor of the seismic moment; sign of arrival P waves; inverse method; compression axis.

**Введение.** Представления о природе действующих в недрах нашей планеты сил получили развитие во многих разделах наук о Земле. Однако не будет преувеличением отметить, что данные по механизму очагов землетрясений поставляют едва ли не основную часть информации о напряженном состоянии земных недр. Механизм возбуждения сейсмических волн очагом землетрясения связывается в современной сейсмологии с внезапной подвижкой горных пород по некоторой поверхности ослабленной прочности. Таким образом, механизм очага является фактически сугубо геометрической характеристикой, отражающей одновременно ориентацию плоскости разрыва в очаге и направление относительного смещения сторон разрыва, т. е. *механизм – есть кинематика движения в очаге*. Накопление данных о механизмах землетрясений детализирует описание сеймотектонического процесса и обеспечивает возможность более подробного исследования ключевых проблем геодинамики и сейсмической опасности территории Северного Тянь-Шаня

и Казахской платформы. При наличии данных по фокальным механизмам для тектонофизического анализа могут быть привлечены различные методы, в том числе метод сеймотектонических деформаций [1] и метод катакластического анализа разрывных нарушений [2, 3]. В первом случае на основе *метода среднего механизма* (МСМ) рассчитываются параметры тензора приращений сеймотектонических деформаций, а во втором методе (МКА) кроме параметров этого тензора определяются также компоненты тензора напряжений.

Сейсмическая сеть KNET [4] была установлена в 1991 г. и включает в себя 10 цифровых широкополосных станций, расположенных на севере Тянь-Шаня. За время работы сети ею зарегистрировано более 7000 локальных сейсмических событий (рисунок 1).

Одним из условий надежного определения механизма очага является полное окружение эпицентра пунктами наблюдений. Поэтому в качестве исследуемой территории была выбрана область площадью

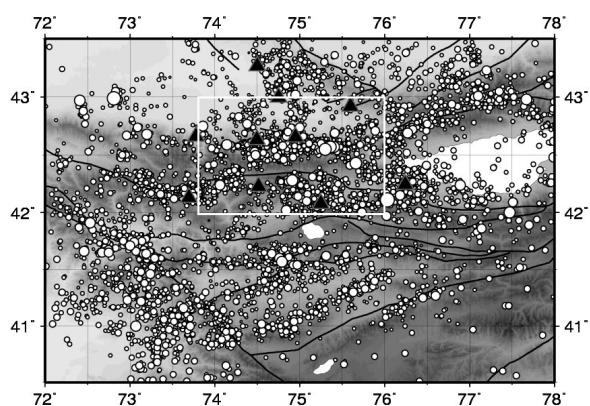


Рисунок 1 – Положение сейсмических станций сети KNET и эпицентральное расположение землетрясений, произошедших в 1994–2012 гг. (более 7000 событий). Треугольниками обозначены станции сети, прямоугольником – область, ограниченная координатами краевых станций сети KNET

≈ 100 × 00 км, ограниченная координатами расположения краевых станций сети (обозначена прямоугольником на рисунке 1). Обработка сейсмических данных началась в 1994 г., каталог фокальных механизмов, полученный по методике, использующей знаки первых вступлений продольных волн [5], формировался в 2000–2004 гг. и содержал решения механизмов землетрясений за 1999–2004 гг. Первый анализ фокальных механизмов очагов опубликован в работах [6, 4]. Результаты анализа, проведенных на основе накопленных данных за 2005–2008 гг., представлены в работе [7]. В данной работе проведена верификация ранее полученных решений механизмов (1999–2008 гг.) и обработка данных за 2009–2012 гг.

В сейсмологии сейчас широко применяются компьютерные технологии определения полного тензора сейсмического момента, использующие в цифровом виде зарегистрированные волновые формы [8, 9]. Однако эти методы могут применяться только к сильным землетрясениям, зарегистрированным на телесеизмических расстояниях. В работе [10] представлен инверсный метод, который можно применять к событиям умеренной силы ( $M > 3.5$ ). В наших условиях это позволяет определять тензор сейсмического момента для событий с  $K > 10$ , которые находятся на расстоянии 1–2° от станций сети. Инверсный метод был применен к событиям, удовлетворяющим этим условиям, которые произошли на территории и в окрестности сети KNET в 1996–2006 гг. [11]. В данной работе метод инверсии применен к событиям, произошедшим за 2007–2010 гг.

Цель данной работы – расчет фокальных механизмов очагов землетрясений Северного Тянь-

Шаня по данным сети KNET для использования их при оценке напряженного состояния земной коры.

**Исходные данные и методика.** Для определения фокальных механизмов по методике, описанной в работе [5], были использованы сейсмические записи землетрясений, которые произошли на территории 42–43°с.ш. и 73.75–76 °в.д. в 1994–2012 гг. Максимальное количество знаков прихода Р-волны на станцию составляет 10 (по количеству станций), минимальное 7 (заложено в алгоритме обработки).

Инверсный метод был применен к записям землетрясений с  $K > 10$ , которые произошли в 2007–2010 гг. на территории сети KNET и за ее пределами на расстоянии не более 1–2° от станций сети.

**Определение фокальных механизмов землетрясений по знаку прихода Р волны.** Для расчета фокальных механизмов очагов использовалась программа *fffit* [12], которая находит решения для двойной пары плоскостей разрыва (исходная модель), наилучшим образом удовлетворяющих данному множеству зарегистрированных значений первых вступлений землетрясения. В качестве входных данных эта программа использует выходной ARC-файл (файл архива фаз) программы *hypocenter* [13] (расчет параметров гипоцентра) и файл управления, позволяющий настраивать значения параметров расчета, например, количество зарегистрированных фаз.

**Инверсный метод.** В работе [11] изложена методика волнового моделирования и приведены решения для 60 землетрясений. Метод волновой инверсии позволяет оценить не только углы ориентации и подвижки нодальных плоскостей (strike, dip, slip), но и получить значения скалярного сейсмического момента, моментной магнитуды ( $M_w$ ) и глубины ( $H$ ) землетрясения.

**Результаты.** *Определение фокальных механизмов землетрясений по знакам первых вступлений продольных волн.* На рисунке 2 представлены эпицентральное положение (рисунок 2а) и фокальные механизмы очагов (рисунок 2б) 1056 землетрясений, которые произошли на рассматриваемой территории с 1994 по 2012 г. Основную часть составляли слабые события ( $M = 1.5–2.0$ ), которые произошли с 2000 по 2012 г. и располагались на глубине 5–15 км (рисунок 3). Получение качественных данных стало возможным с началом работы KNET в реальном режиме времени, начиная с середины 1998 г. Этим фактом можно объяснить, что основную часть каталога составляют сейсмические события за 2000–2012 гг. Большая часть решений получена по 8–9 станциям.

*Инверсный метод* позволил определить тензор сейсмического момента для 90 землетрясений

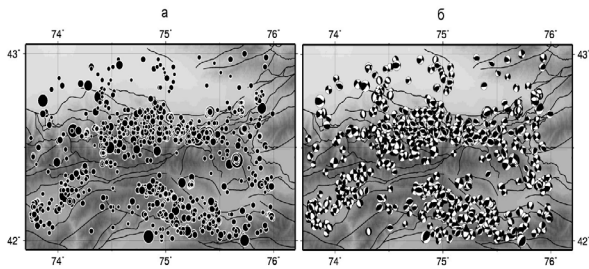


Рисунок 2 – Эпицентральное расположение землетрясений (а) их фокальные механизмы (б)

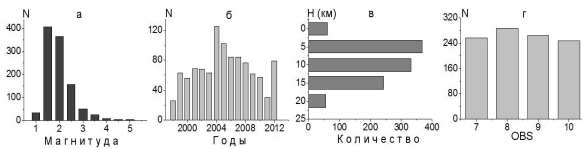


Рисунок 3 – Распределение некоторых характеристик каталога фокальных механизмов очагов (1056 событий): а – по магнитудам; б – по времени; в – по глубине, г – по OBS

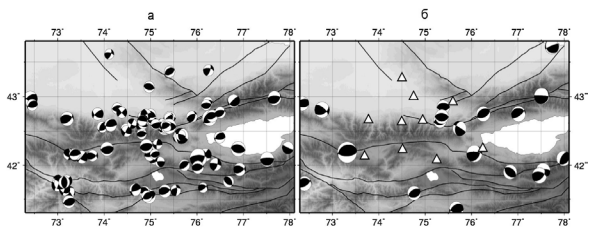


Рисунок 4 – Фокальные механизмы, полученные методом инверсии: а – по данным сети KNET за 1996–2010 гг.; б – из каталога СМТ за 1976–2012 гг.

с  $K > 10$ , которые произошли за 1996–2010 гг. Из них 30 решений получены в данной работе. Эпицентральное расположение и механизмы очагов этих событий представлены на рисунке 4а. На рисунке видно, что этот метод позволил получить решения для событий, которые находятся не только внутри сейсмической сети, но и за ее пределами. На рисунке 4б представлены механизмы очагов из каталога СМТ (Гарвардский университет, США) [14] за 1976–2012 гг. Сравнение данных на рисунках 4а и 4б показывает, что инверсный метод [10] позволил получить решения для землетрясений за пределами сети, которые не входят в каталог СМТ. Гистограммы распределения количества событий по магнитудам, годам и глубине представлены на рисунке 5.

*Сравнение решений.* На рисунке 6 представлены механизмы очагов некоторых землетрясений,

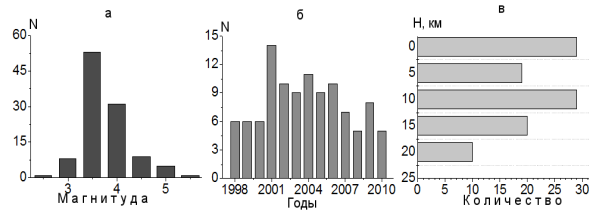


Рисунок 5 – Распределение характеристик каталога тензоров сейсмического момента: а – по магнитудам; б – по времени; в – по глубине

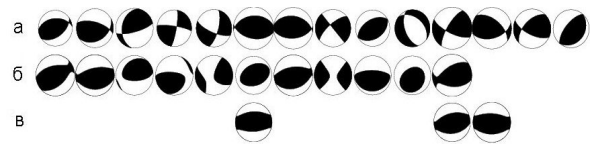


Рисунок 6 – Механизмы очагов полученные: а – по знаку прихода Р-волны; б – по инверсному методу; в – из СМТ каталога

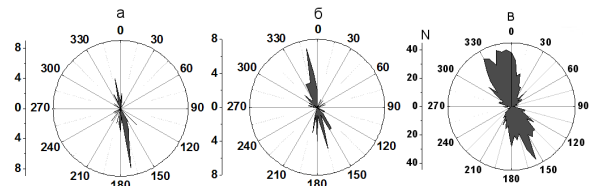


Рисунок 7 – Направление азимутов осей сжатия: а – СМТ решения (19 событий с  $M > 4$ ); б – инверсный метод (90 событий с  $M > 2.5$ ); в – по знаку прихода Р-волны (1056 событий, с  $M > 1$ )

для которых решения получены и по знаку прихода Р-волны (рисунок 6а) и по инверсному методу (рисунок 6б). Для сравнения также приведены решения из каталога СМТ (рисунок 6в).

Решения, полученные по знаку прихода Р волны в целом хорошо согласуются с решениями по инверсному методу, некоторые наблюдаемые различия можно объяснить недостаточностью количества знаков (7–10 станций) при использовании метода по знаку прихода Р-волны.

*Оси сжатия и растяжения.* Решения фокальных механизмов связаны с определением параметров нодальных плоскостей (потенциальные плоскости разрыва) и осей главных напряжений, которые характеризуются углом погружения и направлением азимута. На рисунке 7 представлены диаграммы распределения азимутов осей сжатия по трем источникам механизмов очагов, которые

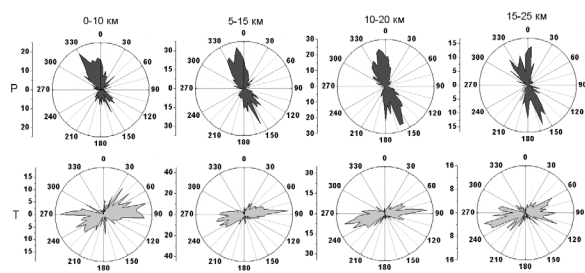


Рисунок 8 – Направление главных осей деформации для событий, расположенных на разных глубинах

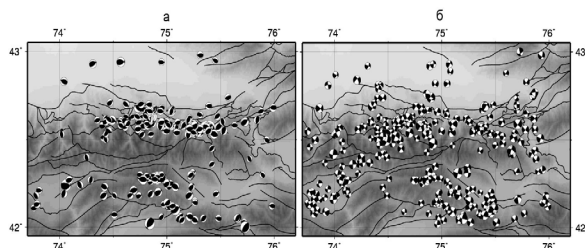


Рисунок 9 – Расположение событий с разными типами механизмов очагов: А – взбросы (241); б – сдвиги (349)

включают в себя события разного масштабного уровня: СМТ-решения, инверсный метод и по знакам прихода Р-волны. Отмечено, что на всех рассматриваемых уровнях выделяется северо-северо-западное направление, от уровня к уровню меняется только величина разброса от генерального направления. Максимальный разброс определяется сектором 330–360°. Это хорошо согласуется с ранее опубликованными результатами [4, 11, 15, 16].

Многие исследователи Тянь-Шаня предполагают, что земная кора имеет слоистую структуру, при этом слои имеют различную реологическую структуру и по-разному реагируют на напряжения, возникающие в земной коре. На рисунке 8 представлены диаграммы распределения осей сжатия и растяжения для слабых событий (1056), построенные для различных глубин с пересечением (0–10 км, 5–15 км и т. д.). Как видно на рисунке, направление оси сжатия на всех рассматриваемых глубинах меняется в секторе 330–360°, однако пиковое значение числа событий с глубиной смещается от 330° (северо-западное направление) к 360° (северное). Направление осей растяжения для всех глубин меняется от северо-восточного до юго-восточного.

**Типы механизмов. СМТ решения.** Согласно рисунку 4б, основная часть событий ( $M > 4.5$ ) из каталога СМТ имеют взбросовый характер и расположены в окрестности региональных разломов.

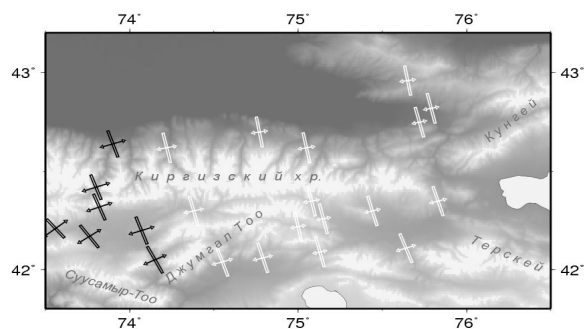


Рисунок 10 – Пример карты СТД

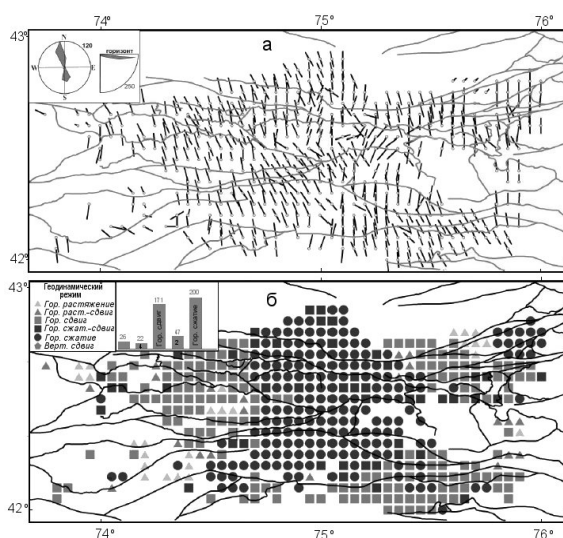


Рисунок 11 – Пример результатов реконструкции напряжений для глубины 10–20 км: а – проекции на горизонтальную плоскость погружения осей главных напряжений; б – тип напряженного состояния (геодинамический режим)

Для событий с  $M > 3$  (рисунок 4а, решения получены *инверсным методом*) наряду со взбросовыми типами механизмов встречаются события, имеющие сдвиговую составляющую подвижки. Расположены эти события также в окрестности разломных зон. Для слабых событий, начиная с  $M > 1$  (решения получены *по знакам первых вступлений продольных волн*), характерны различные механизмы: взбросы, сдвиги, взбросо-сдвиги и сбросо-сдвиги. Большая часть этих событий, произошла вблизи региональных и локальных разломов. На рисунке 9 представлены карты расположения событий имеющих взбросовый (рисунок 9а) и сдвиговый (рисунок 9б) характер механизмов очагов. На рисунке видно, что события, имеющие взбро-

совый характер, расположены вдоль узких зон, вытянутых субмеридионально.

Полученные решения фокальных механизмов можно использовать для оценки напряженно-деформированного состояния земной коры методами СТД и МКА, о которых упоминалось выше. На рисунке 10 представлена карта СТД, построенная для сейсмоактивного слоя 10–20 км на основе анализа слабых событий, согласно которой для рассматриваемой территории по классификации режимов СТД [17] характерны два режима: для западной части – сдвиговый, для центральной и восточной части – режим трансгрессии (прямоугольником обозначено направление оси сжатия, стрелочками направление оси растяжения, а цветом – тип режима). На рисунке 11 представлены результаты реконструкции напряжений по методу МКА для того же диапазона глубин.

**Заключение.** Получены механизмы очагов слабых (1056) и умеренных 30 землетрясений, которые произошли на территории внутри сети KNET в 1994–2012 гг. Проведено сравнение некоторых полученных решений с другими источниками. Построены диаграммы азимутов осей сжатия для событий разных масштабных уровней и проведено сравнение направления осей сжатия с результатами, полученными другими исследователями. Результаты сравнения показали, что полученные данные можно использовать для оценки напряженно-деформированного состояния земной коры Северного Тянь-Шаня.

Работа выполнялась при частичной поддержке в рамках Программы № 14 фундаментальных исследований Президиума РАН, а также по гранту Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 12-05-00234а, № 12-05-00550а.

#### Литература

1. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмоструктурных деформаций / С.Л. Юнга. М.: Наука, 1990. 191 с.
2. Ребецкий Ю.Л. Методы реконструкции тектонических напряжений и теории пластичности / Ю.Л. Ребецкий // Докл. РАН. 1999. Т. 365. № 3. С. 370–373.
3. Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов / Ю.Л. Ребецкий. М.: Академкнига. 2007. 406 с.
4. Сычева Н.А. Сейсмоструктурные деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети KNET) / Н.А. Сычева, С.Л. Юнга, Л.М. Богомолов и др. // Физика Земли. 2005\_а. № 11. С. 62–78.
5. Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций / А.В. Введенская. М.: Наука, 1969. 136 с.
6. Сычева Н.А. Очаговые механизмы и сейсмоструктурные деформации как проявление напряженного состояния коры Северного Тянь-Шаня / Н.А. Сычева, А.В. Аладьев, В.А. Мухаммадеева и др. // В сб. Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска. Казахстанско-Российская межд. конф. Алматы. 2005\_б. С. 41–48.
7. Сычева Н.А. Обновленные материалы по механизмам очагов и сейсмоструктурным деформациям земной коры Тянь-Шаня / Н.А. Сычева, С.Л. Юнга // Тр. конф. с учас. иностр. ученых, 3–6 октября 2011. Новосибирск. С. 151–156.
8. Dzierwowski A.M., Chou T.A., and J.H. Woodhouse J.H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of regional and global seismicity // J. Geophys. Res. No.86. 1981. P. 2825–2852.
9. Sipkin S.A. USGS Moment tensor software and catalog. 2001.
10. Yagi Y. Determination of focal mechanism by moment tensor inversion Tsukuba: IISEE Lecture Note. 2004. 51 p.
11. Костюк А.Д. Деформация земной коры Северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии / А.Д. Костюк, С.Л. Юнга, Л.М. Богомолов и др. // Физика Земли. 2010. № 3. С. 52–65.
12. Reasenber P. A. and Oppenheimer D. FPFIT, FP-PLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions. U.S. Geological Survey 345 Middlefield Road Menlo Park. California Open-File Report. 1985. No.85–739.
13. Lienert Barry R., Berg E. and Frazer Neil L. Hypocenter: An Earthquake Location Method Using Centered, Scaled, and Adaptively Damped Least Squares // Bulletin of the Seismological Society of America. June 1986. Vol. 76. No. 3. P. 771–783.
14. CMT решения. URL: <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>.
15. Курскеев А.К. Землетрясения и сейсмическая безопасность Казахстана / А.К. Курскеев. Алматы: Эверо, 2004. 501 с.
16. Крестников В.Н. Напряженное состояние земной коры Центрального и Северного Тянь-Шаня / В.Н. Крестников, Е.И. Шишкин, Д.В. Штанге и др. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1987. № 3. С. 13–30.
17. Юнга С.Л. О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу / С.Л. Юнга // Докл. РАН. 1997. Т. 352. № 2. С. 253–255.