

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СЕЙСМИЧНОСТИ И ФОКАЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ СОБЫТИЙ В ПРЕДЕЛАХ СЕЙСМОСЕТИ KNET

*А. Д. Костюк* – мл. науч. сотр.

*Y. Yagi* – researcher

*А. В. Зубович* – канд. физ.-мат. наук

---

The results of investigation of earthquakes distribution and focal mechanisms have been described on the territory inside KNET seismic network. To determinate accurate hypocenters, double difference method has been applied. For determination of moment tensor solution, we used waveform inversion. Earthquakes distribution shows that this area consists of several zones with high seismicity. These zones have depth up to 25 km. The orientation of P-axis of earthquakes indicated that in general the compression tectonic stress is along north-south direction.

**Введение.** Тянь-Шань – один из сейсмически активных регионов в мире, представляющий собой горную систему со специфичной позицией в структуре литосферных плит. Основные тектонические силы в данном регионе обусловлены коллизией между Индийской и Евразийской плитами и определяют сейсмическую активность и процесс внутриконтинентального горообразования. Многие работы, посвященные изучению Тянь-Шаня, активно используют данные по сейсмичности [1–3]. Каталоги землетрясений ряда организаций охватывают территорию Тянь-Шаня, в том числе: Геологическая служба США (USGS/NEIC), Международный Сейсмологический Центр (ISC), Институт сейсмологии (ИС НАН КР) и Опытно-методическая сейсмологическая экспедиция (ОМСЭ КР) Национальной академии наук Кыргызской Республики, Научная станция Российской академии наук (НС РАН), Национальный центр данных Института геофизических исследований Национального ядерного центра Республики Казахстан (НЦД ИГИ НЯЦ РК). В то же время наличие на Северном Тянь-Шане сейсмосети KNET, представляющей собой 10

широкополосных станций STS-2, и скоростных моделей [4] позволяет достаточно надежно определять координаты землетрясений в этой зоне [5]. Точное определение гипоцентров землетрясений крайне важно для построения томографических моделей земной коры, определения характеристик активных разломов и других исследований. Известно, что определение гипоцентров землетрясений внутри сейсмосети осуществляется точнее (при всех прочих равных условиях), чем за ее пределами. А применение дополнительных алгоритмов переопределения гипоцентров позволяет увеличить точность решения. На смену одному из самых популярных методов пересчета положения гипоцентров – объединенного переопределения гипоцентров (Join hypocenter determination) – пришла новая технология двойных разностей (Double difference). Она позволяет за счет использования двойных разностей фактически избежать ошибок, связанных с эффектом станции (site effect) и неоднородностью земной коры (path effect), что является большим

## СЕЙСМОЛОГИЯ И ГЕОМЕХАНИКА

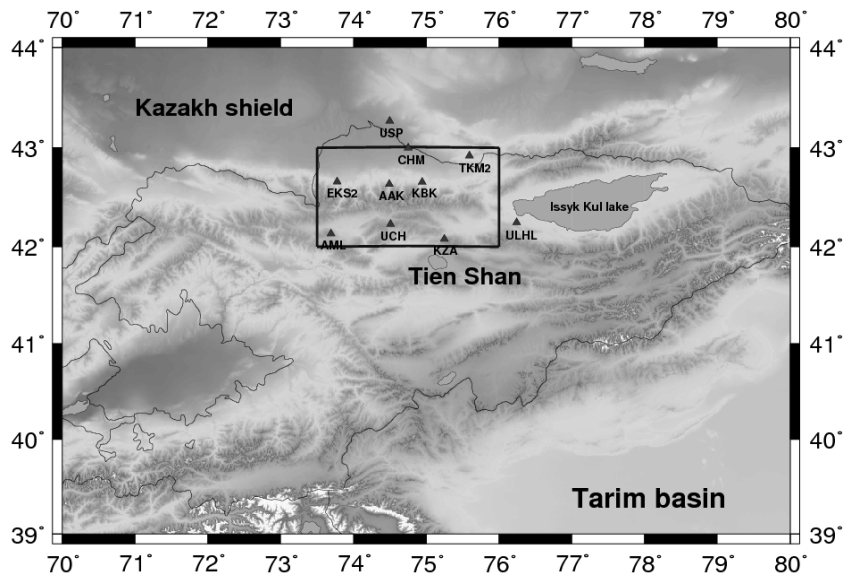


Рис. 1. Регион сети KNET. Черный прямоугольник указывает на область исследования; черные треугольники – сейсмостанции сети KNET.

преимуществом перед методом объединенного переопределения гипоцентров [6]. В данной работе предпринята попытка уточнения гипоцентров землетрясений в пределах и по данным сети KNET по технологии двойных разностей, используя каталог событий ИС РАН. В тоже время наличие цифровых сейсмограмм делает возможным получение более подробной информации о землетрясении, в том числе решение фокального механизма, используя метод инверсии волновой формы (waveform inversion) [7]. Таким образом, в настоящей работе мы попытались использовать преимущества локальной цифровой сейсмосети для точного определения гипоцентров землетрясений и решения фокальных механизмов на примере сети KNET (рис. 1).

**Методы и исходные данные.** Для точного определения гипоцентров землетрясений использовался метод “двойных разностей”. Этот метод представляет собой эффективную технологию определения гипоцентров землетрясений с высокой точностью [6]. Идея метода состоит в следующем: два события (пара) рассматриваются относительно общей станции. Время прохода волн от этих событий

к общей станции разное. В то же время, если расстояние между событиями мало по сравнению с расстоянием пара-станция и мало по сравнению с неоднородностью распределения скоростей сейсмических волн, то путь волн между станцией и событиями пары будет одинаков почти по всей длине траектории. Таким образом, получается, что разница во времени прохода волн от пары событий к общей станции зависит от расстояния между событиями, так как траектории волн событий проходят через одни и те же массивы пород и фиксируются одной и той же станцией. Метод минимизирует разницу между наблюдаемыми временами проходов волн пары событий, которая вычисляется как:

$$dr_{k}^{ij} = (t_{k}^{i} - t_{k}^{j})^{obs} - (t_{k}^{i} - t_{k}^{j})^{cal} = t_{k}^{i,obs} - t_{k}^{i,cal} - (t_{k}^{j,obs} - t_{k}^{j,cal}) \quad (1)$$

Здесь  $i$  и  $j$  – события пары;  $k$  – измерение;  $t^{obs}$  – наблюдаемое время прохода волны и  $t^{cal}$  – теоретическое время прохода волны. В тоже время отклонение наблюдаемого времени пути волны от вычисляемого зависит от ошибок в положении гипоцентра и времени события:

$$r_k^i = t_k^{i,obs} - t_k^{i,cal} = \frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i, \quad (2)$$

где  $\Delta x^i$ ,  $\Delta y^i$ ,  $\Delta z^i$  и  $\Delta \tau^i$  – отклонения параметров гипоцентра для события  $i$ . Используя (2), выражение (1) может быть представлено в виде:

$$dr_k^{ij} = \frac{\partial t_k^i}{\partial x} \Delta x^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial y} \Delta y^i + \frac{\partial t_k^i}{\partial z} \Delta z^i + \Delta \tau^i - \frac{\partial t_k^j}{\partial x} \Delta x^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial y} \Delta y^j - \frac{\partial t_k^j}{\partial z} \Delta z^j - \Delta \tau^j \quad (3)$$

Система линейных уравнений строится из выражений вида (3) для всех пар к общей станции и для всех станций, после чего определяются параметры  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  и  $\Delta \tau$  путем минимизации величины  $dr_k^{ij}$ . Для вычисления использовалась программа huroDD, реализующая этот алгоритм и разработанная одним из авторов метода Ф. Вальдхаусером (Waldhauser) [7]. В качестве входных данных были использованы каталог землетрясений и данные о временах прихода P- и S- волн (arrival-файлы), полученные в лаборатории комплексных исследований ИС РАН по сейсмосети KNET. Определение гипоцентров сейсмических событий в данном каталоге осуществлялось с использованием программы HYPOCENTER [9]. Используемый каталог содержит информацию за период 1994–2004 гг. по землетрясениям, а arrival-файлы – информацию за 1994 и 1996–2004 гг. Общее число событий в пределах сети KNET, используемых в обработке, составляет 1571. При обработке применялась скоростная модель сейсмических волн С. Рекера (Roecker) [4].

Определение фокальных механизмов событий осуществлялось программой, разработанной Ю. Яги (Yagi) и основанной на методе инверсии волновой формы (moment tensor inversion method). При этом предполагается модель “двойной пары сил” (double-couple), а создание синтетической

сейсмограммы осуществляется путем суммирования пяти базовых решений с различными весами. Волновая форма при этом определяется следующим образом:

$$\mathbf{u}(t) = \sum_{i=1}^5 m_i \times \mathbf{Green}_i(t) * \mathbf{Source}(t), \quad (4)$$

где  $\mathbf{Green}_i(t)$  – функция Грина (Green function), которая в общем случае отражает структуру неоднородности земной коры (path effect) и эффект станции (site effect);  $\mathbf{Source}(t)$  – функция источника (source time function);  $m_i$  – компоненты тензора сейсмического момента (seismic moment tensor):  $M_{11}$ ,  $M_{22}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{13}$ ,  $M_{23}$ . В данном случае мы пренебрегаем особенностями источника (source time function), используя только волны с большим периодом. Выражение (4) может быть представлено тогда в виде:

$$\mathbf{O} = \mathbf{G} \mathbf{m}, \quad (5)$$

где

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} u_{ud}(t_1) \\ u_{ud}(t_2) \\ \vdots \\ u_{ns}(t_1) \\ \vdots \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_{ud}^{m_1}(t_1) & G_{ud}^{m_2}(t_1) & \dots & G_{ud}^{m_5}(t_1) \\ G_{ud}^{m_1}(t_2) & G_{ud}^{m_2}(t_2) & \dots & G_{ud}^{m_5}(t_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{ns}^{m_1}(t_1) & \vdots & \dots & G_{ns}^{m_5}(t_1) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \\ m_4 \\ m_5 \end{bmatrix}$$

и

$$G_{ud}^{m_i}(t) = \mathbf{Green}_{ud}^{m_i}(t), \quad (7)$$

при этом  $u_{ud}(t_1)$  – синтетическая сейсмограмма для вертикальной компоненты (ud значит up-down) первого измерения;  $G_{ud}^{m_1}(t_1)$  – функция Грина вертикальной компоненты первого измерения для

компоненты тензора сейсмического момента  $M_{11}$ . Подбирается такое решение, при котором разница между наблюдаемой сейсмограммой и синтетической минимальна. Исходные данные представляли собой сейсмограммы землетрясений по сети KNET с магнитудой 3.5 и выше за период 1994–2004 гг., загруженные с сайта Объединенного Исследовательского Института Сейсмологии (Incorporated Research Institutions for Seismology – <http://www.iris.edu/>) и ИС РАН.

**Результаты.** Первоначальные положения землетрясений (до пересчета) показаны на рис. 2.

Определенная часть событий расположена на глубине 6–7 км, большое количество событий имеет глубину около 0 км, и выделяется ряд областей с высокой сейсмичностью. В результате пересчета гипоцентров расположение землетрясений изменилось (рис. 3). Как видно, гипоцентры землетрясений стали ближе друг к другу, а области высокой сейсмичности выделились более четко. Кроме того, практически полностью исчезли события, для которых глубина составляла 6–7 км (рис. 4).

Большинство областей высокой сейсмичности после пересчета стали представлять собой поверхности, погружающиеся на глубину до 25 км под различным углом к горизонту. При этом можно заметить разный характер расположения землетрясений от зоны к зоне вдоль профилей (рис. 5). Они представляют собой как плоскости, погружающиеся с

увеличением глубины на юг под различным углом, например профили (а) и (е), так и небольшие поверхности с различной ориентацией, расположенные на глубинах 10–20 км, например (с) на рис. 5. Выделившиеся поверхности в результате пересчета гипоцентров, по всей видимости, представляют собой фрагменты активных разломов, по которым происходят подвижки.

Сравнение расположения крупных разломов и распределения сейсмичности показывает, что линии разломов на земной поверхности не всегда совпадают с областями высокой сейсмичности (рис. 6).

Но разлом в Суусамырской впадине в плане хорошо коррелируется с расположением сейсмичности, а профиль по его части (а) показывает плоскость, вдоль которой происходят события (рис. 5), т.е., можно сказать, что в данном регионе многие крупные разломы в настоящее время не являются активными с точки зрения слабой сейсмичности. Сравнение эпицентров землетрясений, полученных в результате пересчета, с данными некоторых других каталогов показано на рис. 7. Как видно, эпицентры событий в полученном каталоге расположены ближе друг к другу, чем в других каталогах, и более резко отражают области высокой сейсмичности. Другими словами, в результате обработки события стягиваются в сейсмогенерирующие области и очерчивают их контуры.

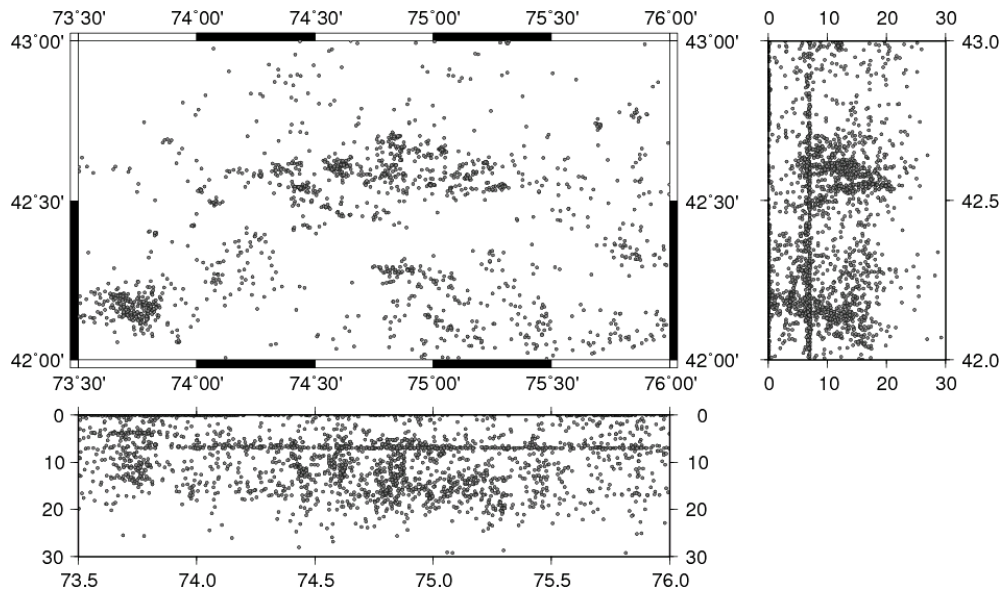


Рис. 2. Расположение землетрясений до обработки в плане (вверху слева) и в разрезах. Серые точки – положения землетрясений до пересчета гипоцентров.

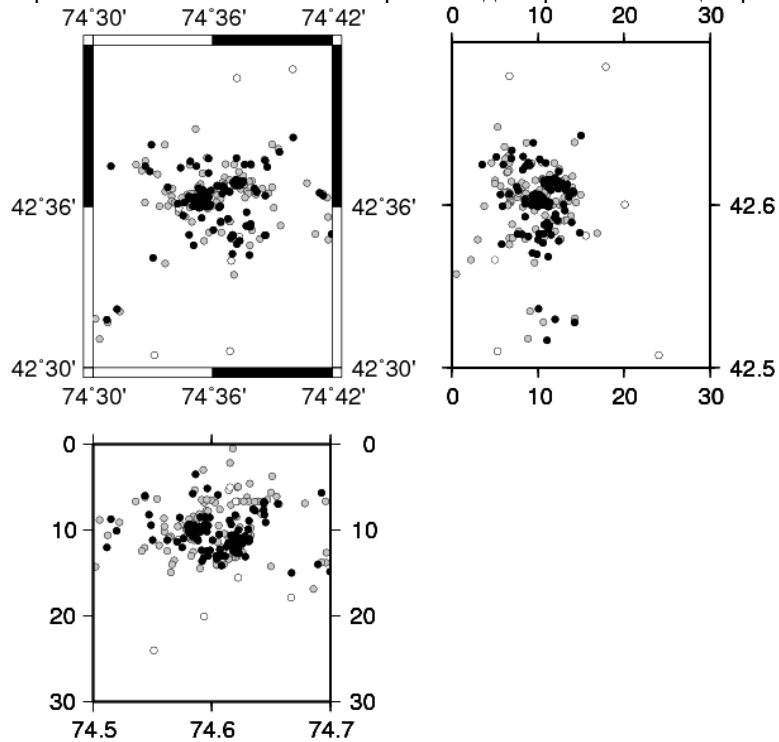


Рис. 3. Пример расположения землетрясений до и после обработки в плане (вверху слева) и в разрезах. Серые точки - положение землетрясений до пересчета гипоцентра; черные – после пересчета и белые – землетрясения, которые не удалось обработать.

Распределение сейсмичности и фокальные механизмы событий

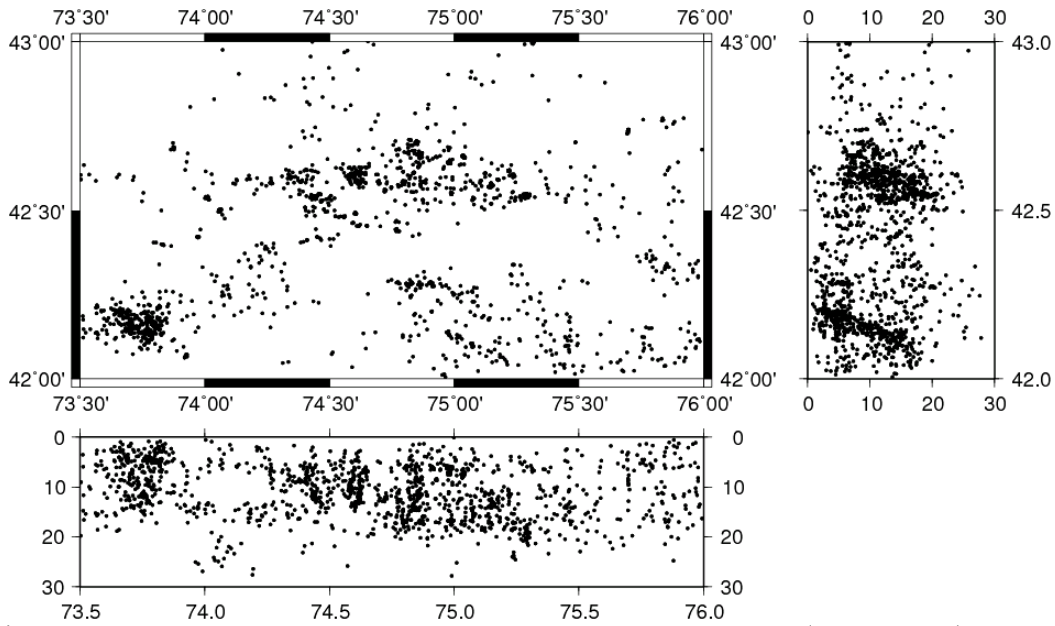
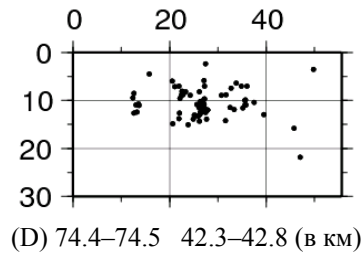
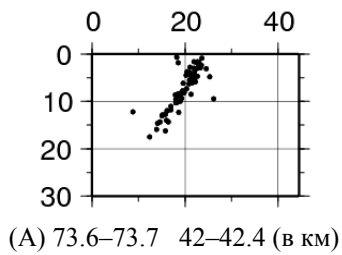
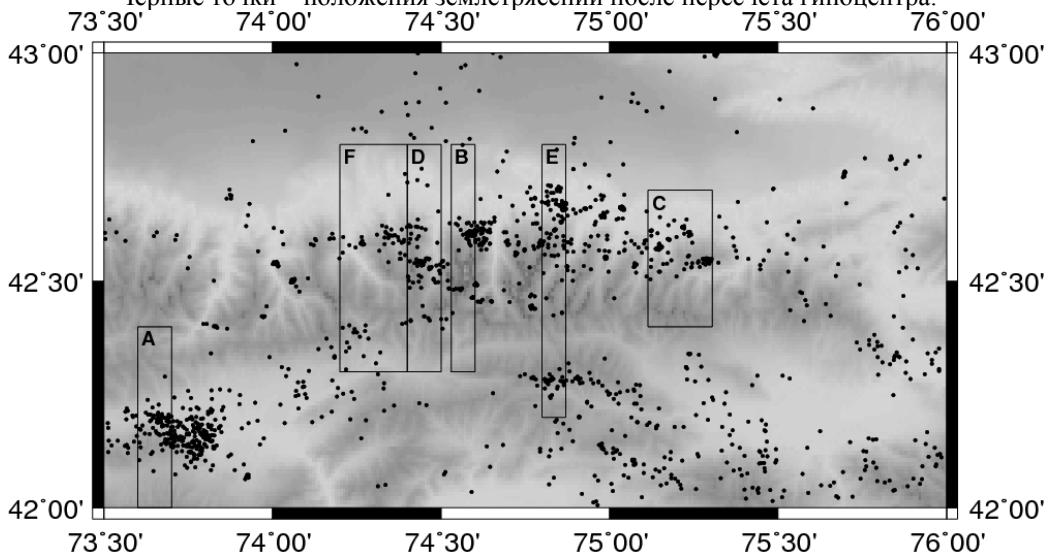


Рис. 4. Расположение землетрясений после пересчета гипоцентров в плане (вверху слева) и в разрезах.  
Черные точки – положения землетрясений после пересчета гипоцентра.



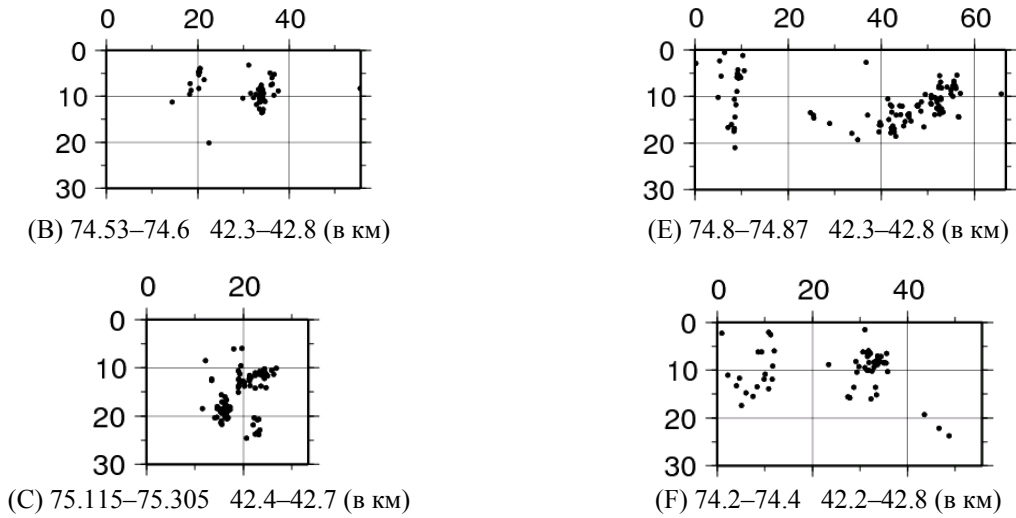


Рис. 5. Схема расположения профилей. Оси X и Y – в километрах. Черные точки – положения землетрясений после пересчета гипоцентров; начала систем отсчета на профилях находятся на их южных границах, на глубине 0 км.

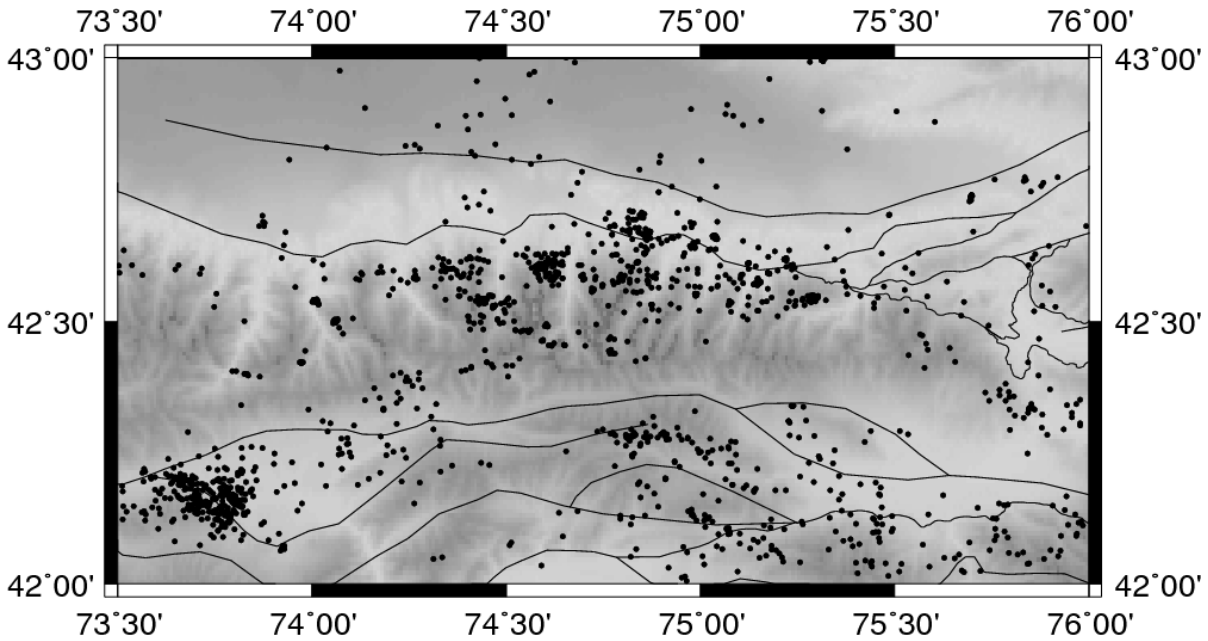


Рис. 6. Расположение землетрясений и основных разломов (разломы по С.И. Кузикову, ИС РАН). Черные точки – эпицентры землетрясений; черные линии – основные разломы.

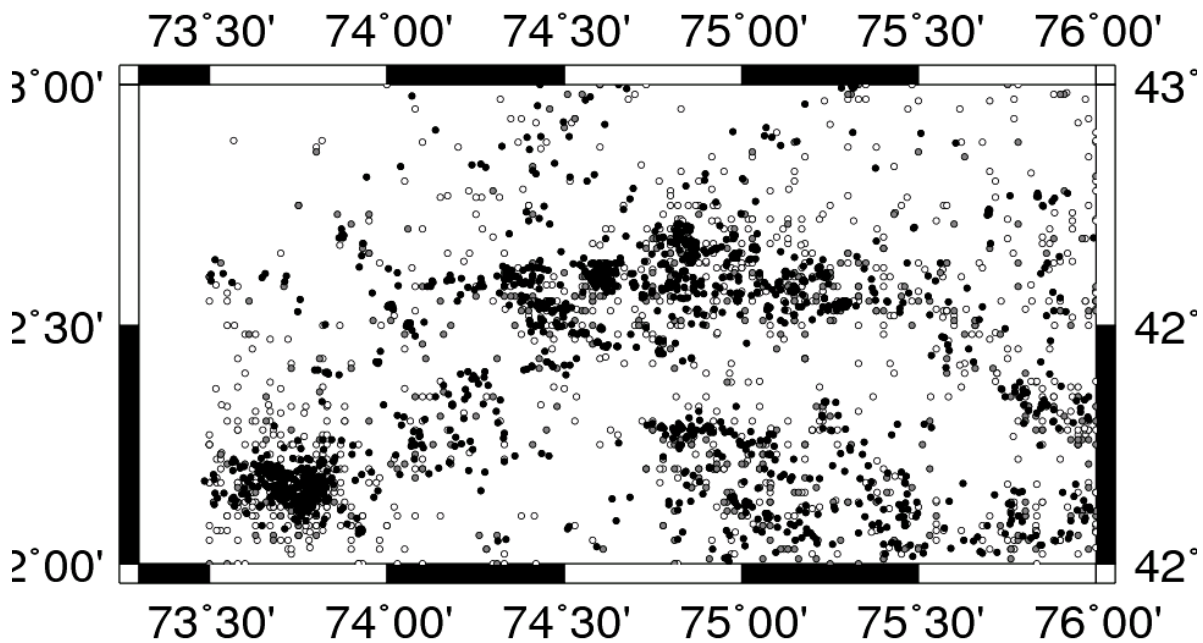


Рис. 7. Расположение землетрясений. Черные точки – положение землетрясений по каталогу НС РАН после пересчета (1994 г., 1996–2004 гг.); серые – по каталогу ОМСЭ КР после обработки Г.А. Соболевым (1991–2001 гг.); белые – по каталогу НИД ИГИ НЯЦ РК (1993–2003 гг.).

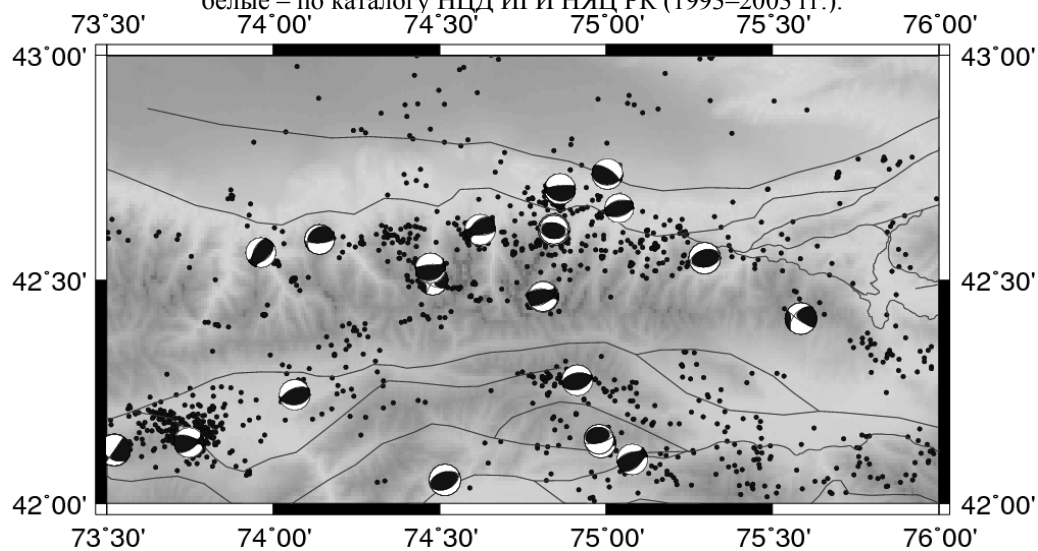


Рис. 8. Решения фокальных механизмов событий с магнитудой 3.5 и более (разломы по С.И. Кузикову, НС РАН). Черные точки – положение землетрясений; черные линии – основные разломы.

Решение фокальных механизмов событий с магнитудой 3.5 и выше показывает, что в основном события имеют взрывной характер

(рис. 8). Направления Р-осей указывают, что сжатие происходит в субмеридиональном направлении. Субмеридиональное сжатие



данного региона подтверждается также и GPS-измерениями [10]. В тех редких случаях, когда фокальные механизмы событий не являются взбросовыми, видимо, их характер обусловлен локальными свойствами среды, которые и определяют особенности разгрузки напряжений (рис. 8). В то же время известны сеймотектонические деформации для данной территории.

Они были получены по данным решения фокальных механизмов, определенных по полярности прихода Р-волн. Сеймотектонические деформации, в том числе коэффициент Лодэ-Надаи подтверждают, что Северный Тянь-Шань в основном характеризуется деформацией простого сжатия, за исключением Суусамырской впадины, где земная кора находится в условиях простого сдвига, при этом породы земной коры испытывают сжатие в меридиональном направлении [11].

**Заключение.** Положения гипоцентров хорошо проявляют поверхности разломов, погружающихся до глубин 25 км под различными углами, при этом разломы не всегда выходят на поверхность Земли.

Расположение разломов на земной поверхности и распределение сейсмичности не всегда совпадают. Это может происходить из-за невертикального падения разломов, когда проекция гипоцентров на поверхность Земли приходится на участок, удаленный от линии разлома. Возможно также, что некоторые разломы, отражаемые в сейсмичности на глубинах 10–20 км, не имеют выхода на поверхность.

Механизмы землетрясений с магнитудой от 3.5 Мб и выше, как правило, отражают характер сжатия областей, в которых они произошли.

### Литература

1. Сабитова Т.М., Адамова А.А. Сейсмотомографические исследования земной коры Тянь-Шаня (результаты, проблемы, перспективы) // Геология и геофизика. – 2001. – Т. 42. – № 10. – С. 1543–1553.
2. Омуралиев М., Абдрахматов К. Активные разломы и сильные землетрясения Тянь-Шаня // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов: Тез. докл. – Бишкек, 2002. – С. 103–104.
3. Копничев Ю., Михайлова Н. О геодинамических процессах в районе Центрального Тянь-Шаня: выделение аномальной области по сейсмическим данным // Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска: Докл. – Алматы, 2005. – С. 49–56.
4. Roecker S.W., Sabitova T.M., Vinnik L.P., Burmakov Y.A., Golovanov M.I., Mamatkanova R., Munirova L. Tree-dimensional elastic wave velocity structure of Western and Central Tien Shan // J.G.R. – 1993. – V. 98. – N. B.9. – P. 15779–15795.
5. Chose S., Hamburger M., Virieux J. Three-dimensional velocity structure earthquake location beneath the northern Tien Shan of Kyrgyzstan, central Asia // J. Geophys. Res. – 1998. – V. 103. – P. 2725–2748.
6. Адамова А.А., Миркин Е.Л., Багманова Н.Х., Сабитова Т.М. Переопределение параметров гипоцентров землетрясений Тянь-Шаня // Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов в XXI веке: Тез. докл. – Бишкек, 2005. – С. 63–64.
7. Waldhauser F., Ellsworth W.L. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault // Bull. Seism. Soc. Am. – 2000. – V. 90. – P. 1353–1368.
8. Thorne Lay, Terry C. Wallace. Modern Global Seismology // Academic Press in the International Geophysics Series. – 1995. – V. 58. – P. 397.
9. Barry R. Leinert, E. Berg and L. Neil Frazer. Hypocenter: An Earthquake Location Method Using Centered, Scaled and Adaptively Damped Least Squares // Bull. Seism. Soc. Am. – 1986. – V. 76. – P. 771–783.
10. Zubovich A.V., Beisimbaev R.T., Wang Xiaoqiang, Zhang Yunfeng, Kuzikov S.I., Mosienko O.I., Nusipov E.N., Schelochkov G.G., Scherba Yu.G. Recent Kinematics of the Tarim – Tien Shan – Altai Region of Central Asia from

GPS Measurements // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. – 2004. – N 9. – P. 31–40.

11. Сычева Н.А., Аладьев А.В., Мухамедеева В.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М. Очаговые механизмы и сеймотектонические деформации как проявления напряженного

состояния коры Северного Тянь-Шаня // Геодинамические, сейсмологические и геофизические основы прогноза землетрясений и оценки сейсмического риска: Докл. – Алматы, 2005. – С. 41–48.