

УДК 550.34.01:550.24(235.216)

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВОЛНОВОЙ ИНВЕРСИИ
И СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ
ДЛЯ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ ТЕРРИТОРИИ ЦЕНТРАЛЬНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ**

Н.А. Сычева

Представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния земной коры Центрального Тянь-Шаня на основе данных о фокальных механизмах очагов, полученные на основе инверсии волновой формы.

Ключевые слова: землетрясение; сейсмограмма; волновая инверсия; ось сжатия; угол погружения; сейсмо-тектонические деформации; режим СТД.

**APPLYING WAVE INVERSION AND SEISMOTECTONIC
DEFORMATIONS METHODS FOR AN ASSESSMENT
OF THE STRESSED-DEFORMED STATE
OF THE CENTRAL TIEN-SHAN TERRITORY**

N.A. Sycheva

It is presented the results of research of the intense-deformed condition of crust of the Central Tien-Shan based on the centers given about focal mechanisms, the forms received on the basis of inversion by a wave.

Keywords: earthquake; seismographic record; wave inversion; compression axis; immersion corner; seismotectonic deformations; TDS mode.

Введение. Тянь-Шань представляет собой регион активных деформаций, зажатый между двумя жесткими блоками земной коры – Казахской платформой на севере и Таримской депрессией на юге. Изучение деформационного процесса, протекающего на этой территории, является необходимым для оценки природных и техногенных опасностей, связанных с геологическими и геодинамическими явлениями.

Фокальные механизмы очагов позволяют оценить деформационные процессы земной коры на глубинах, недоступных для непосредственного изучения. В настоящее время подавляющий объем информации по механизмам очагов землетрясений получен на основе данных по полярности вступления сейсмических волн. Этот подход для оценки механизмов очагов землетрясений используется и на Научной станции РАН (НС РАН) [1, 2]. Вместе с тем, наличие широкополосных цифровых за-

писей волновых форм позволяет использовать современные методы расчета механизма землетрясения, основанные на волновом моделировании. Это дает определенные преимущества, главными из которых являются: высокая точность определения параметров землетрясения и возможность оценки событий, находящихся за пределами сейсмической сети. Каталог фокальных механизмов, полученный на НС РАН на основе данных по полярности вступления сейсмических волн, включает в себя события по ограниченной территории, что позволяет оценить деформационные процессы небольшой области Северного Тянь-Шаня. Использование метода волновой инверсии позволит определить фокальные механизмы очагов для территории за пределами станций сети, и оценить деформационные процессы, протекающие на территории Центрального Тянь-Шаня, на основе применения метода сейсмо-тектонических деформаций (СТД) [3].

Метод волновой инверсии. Принцип, лежащий в основе волнового моделирования, – это разделение свойств источника и эффектов, накладываемых распространением колебаний. В сейсмическом волновом моделировании имеется три базовых фильтра [4].

$$u(t) = s(t) * g(t) * i(t), \quad (1)$$

где $u(t)$ – сейсмограмма; $s(t)$ – сигнал из сейсмического источника; $g(t)$ – фильтр распространения колебаний и $i(t)$ – эффект, накладываемый сейсмографом. В действительности $s(t)$ и $g(t)$ могут быть разделены на несколько фильтров для описания отдельных эффектов. Выражение (1) можно представить через тензор момента:

$$u_n(x, t) = s(t) * i(t) * \sum_{i=1}^5 (m_i \cdot Green_{ni}(t)), \quad (2)$$

$$m_1 = M_{11}, m_2 = M_{22}, m_3 = M_{12},$$

$$m_4 = M_{13}, m_5 = M_{23},$$

где u_n – трехкомпонентное смещение. Сумма представляет собой произведение тензора сейсмического момента (здесь записанного как m_i , остается пять элементов полагая, $m_{33} = -(m_{11} + m_{22})$) и $Green_{ni}(t)$ соответствуют функциям Грина. Компоненты тензора момента в данном случае могут быть легко определены. Функции Грина – это отклики на единичный импульс смещения сейсмического источника по соответствующим компонентам для каждого элемента тензора момента.

Таким образом, создание синтетической сейсмограммы осуществляется путем суммирования пяти базовых решений с различными весами. В данном случае можно пренебречь особенностями источника $s(t)$, используя только волны с большим периодом, при этом необходима предварительная корректировка сейсмограмм согласно эффектам, которые накладываются самим сейсмографом $i(i)$. Тогда выражение (2) принимает вид:

$$o_n(x, t) = \sum_{i=1}^5 m_i \cdot Green_{ni}(t), \quad (3)$$

где $o_n(x, t)$ – реальная сейсмограмма, которая прошла через фильтр, убирающий эффект, накладываемый характеристиками сейсмографа. Можно выражение (3) записать в простой матричной форме:

$$\mathbf{O} = \mathbf{Gm}. \quad (4)$$

где

$$\mathbf{O} = \begin{bmatrix} o_{ud1} \\ o_{ud2} \\ \vdots \\ o_{ns1} \\ \vdots \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} Green_{ud1}^{m_1} & Green_{ud1}^{m_2} & \dots & Green_{ud1}^{m_5} \\ Green_{ud2}^{m_1} & Green_{ud2}^{m_2} & \dots & Green_{ud2}^{m_5} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Green_{ns1}^{m_1} & \vdots & \dots & Green_{ns1}^{m_5} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \end{bmatrix},$$

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

При этом o_{ud1} – сейсмограмма для вертикальной компоненты (up-down) первого измерения; $Green_{ud1}^{m_1}$ – функция Грина вертикальной компоненты первого измерения для компоненты тензора сейсмического момента m_1 . Подбирается такое решение, при котором разница между наблюдаемой сейсмограммой и синтетической минимальна. В данном случае предполагается использование отраженных фаз pP и sP . Тогда функция Грина может быть представлена как

$$Green(t) = Ge(t) * [Ap \times \delta(t) + Ap' \times R_{pp} \times \delta(t - \Delta t_1) + As'' \times R_{sp} \times \delta(t - \Delta t_2)], \quad (5)$$

где $Ge(t)$ – коэффициент геометрического расхождения; Ap и As – модель очага; R_{pp} и R_{sp} – коэффициенты отражения; $\delta(t)$ – дельта функция [Yagi, 2004].

Соответственно $\Delta t_1 \approx \frac{D \times 2}{V_p}$ и $\Delta t_2 \approx \frac{D}{V_p} + \frac{D}{V_s}$. Временные задержки Δt_1 и Δt_2 зависят от глубины гипоцентра D . Таким образом, зная скорости P и S -волн легко определить глубину события, используя фазы pP и sP . Выражение в скобках (5) представляет собой три компоненты, вносящих различный вклад, который зависит от механизма очага [4].

Применение метода волновой инверсии к определению фокальных механизмов по данным сети KNET. Метод волновой инверсии был применен для определения тензоров сейсмического момента событий, которые произошли на территории расположения станций сети KNET за 1996–2006 гг. [5]. В данной работе этот метод применен к событиям, которые произошли за 2007–2013 гг. Волновые формы этих событий частично были получены с сайта [6] IRIS (2007–2010 гг.), а частично использовались цифровые записи станций сети KNET, хранящиеся на ИС РАН (2011–2013 гг.).

Для расчета отбирались землетрясения, лежащие в пределах исследуемого региона, и имеющие энергетический класс K не ниже 10.5 ($M > 3.5$). Определение фокальных механизмов очагов земле-

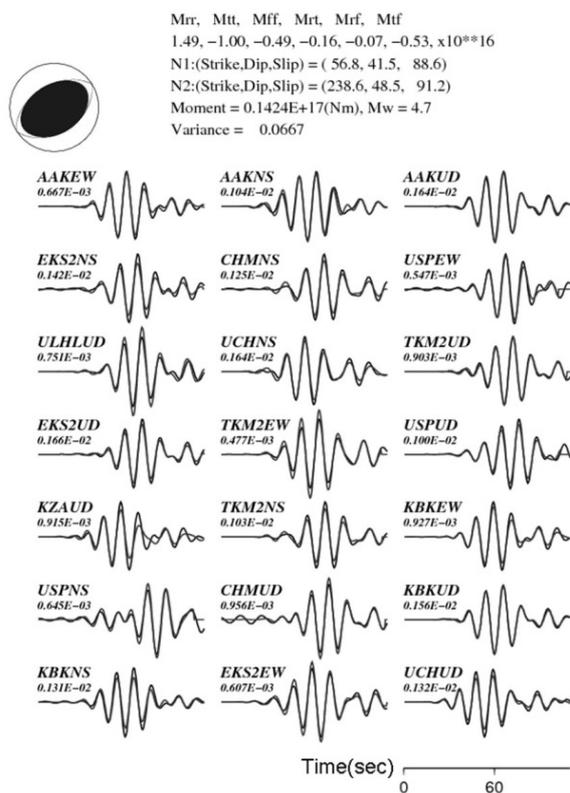


Рисунок 1 – Пример графического выходного файла расчета тензора сейсмического момента программой инверсии

трясений осуществлялось программой, разработанной Ю. Яги [7], которая использует метод инверсии волновой формы, представленный выше. В данной программе функция Грина рассчитывается по методу Кокецу [8], модифицированному Кикучи [9], при этом процедура инверсии строится согласно [10].

При расчете функции Грина для территории Северного Тянь-Шаня использовалась скоростная модель ИГД РАН [11], плотности пород указывались согласно [12], затухание Q определялось на основе геологической карты [13] и таблицам по свойствам пород [4].

Технология волновой инверсии применялась для оценки параметров очагов землетрясений, таких как strike, dip, slip, магнитуда M_w и глубина для событий, находящихся на расстоянии $1-2^\circ$ от сейсмологической сети. Пример графического выходного файла для землетрясения, которое произошло 5 февраля 2012 г. на южных склонах Молдо-Тоо, представлен на рисунке 1.

Результаты. Каталог тензоров сейсмического момента. В результате применения метода

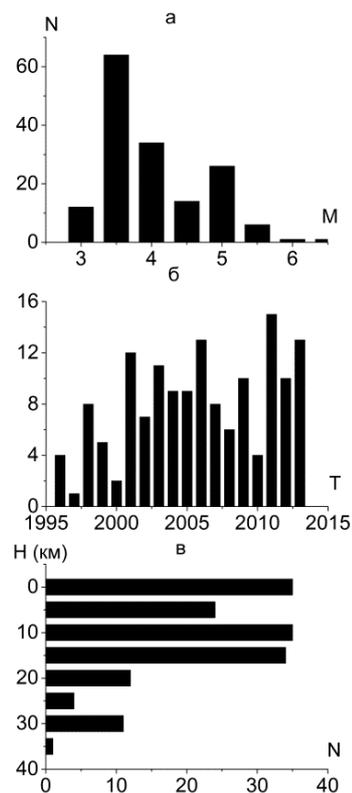


Рисунок 2 – Некоторые статистические характеристики каталога тензоров сейсмического момента: слева – распределение по магнитуде, в центре – по времени и справа – по глубине

инверсии к цифровым записям по данным сети KNET получено 128 решений тензоров сейсмического момента. Решения за 1996–2006 гг. получены А.Д. Костюком, и результаты представлены в работах [5, 14]. Решения за 2007–2013 гг. получены Н.А. Сычевой и добавлены к каталогу тензоров сейсмического момента. Данные по тензорам сейсмического момента для более сильных землетрясений с $M > 4$, произошедших на территории Тянь-Шаня начиная с 1976 г., можно получить на сайте СМТ [15]. Для исследуемой территории каталог СМТ содержит данные о 36 событиях, которые произошли с 1978 по 2013 г.

В результате объединения решений по методу инверсии и из каталога СМТ итоговый каталог тензоров сейсмического момента составил 157 событий. Некоторые статистические характеристики полученного каталога представлены на рисунке 2. Согласно полученным результатам основную часть событий составляют события с магнитудой $M=3.5-4$, большая часть событий произошла в 2000–2013 гг. (за 1978–1995 было всего 12 событий, и на рисунке

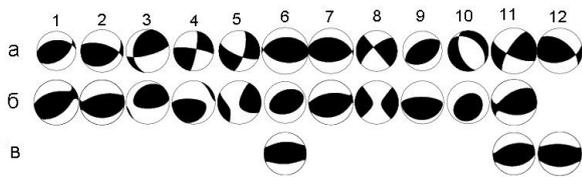


Рисунок 3 – Сравнение решений по трем источникам:
а – на основе Р волн; б – методом инверсии;
в – из каталога СМТ

2, б не показаны), и значительная часть землетрясений произошла на глубине 0–20 км.

На рисунке 3 для сравнения приведено несколько решений фокальных механизмов, полученных основе данных по полярности вступления сейсмических волн, методом волновой инверсии и из каталога СМТ. Приведенные решения, в целом, хорошо согласуются с решениями из других источников. Некоторые отличия с решениями по методу полярности сейсмических волн можно объяснить недостаточностью знаков (количества станций).

Эпицентральное расположение землетрясений их фокальные механизмы представлены на рисунке 4. Бело-черным цветом отмечены решения из каталога СМТ, а серо-черным – полученные инверсным методом.

На рисунке 5, а представлены диаграммы распределения направлений (азимут) осей сжатия (Р) и растяжения (Т), а на рисунке 5, б количественные зависимости угла погружения этих осей. Для построения зависимостей значение азимутов усреднялось с шагом 5°, а углов погружения – с шагом

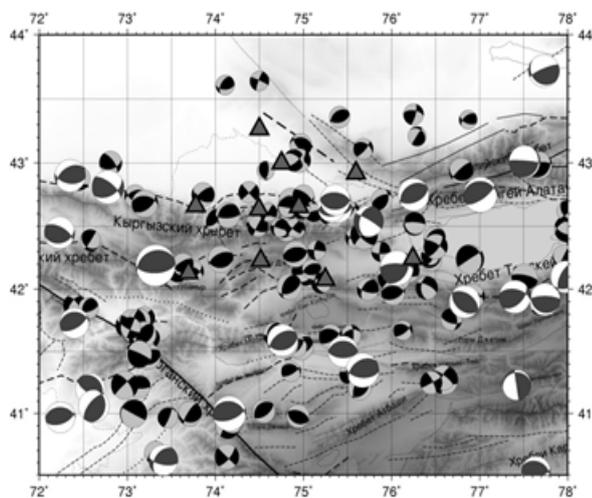


Рисунок 4 – Эпицентральное расположение и фокальные механизмы очагов событий с $K > 10.5$ за 1978–2013 гг. из каталога по методу инверсии (серо-черный цвет) и из каталога СМТ (бело-черный)

10°. Максимум числа осей сжатия имеют направление 340°, что соответствует северо-северо-западному направлению, и основная часть осей по падает в сектор 330–360°, при этом азимуты осей растяжения не имеют ярко выраженного максимума. При этом максимум осей сжатия имеют нулевой угол погружения (близко горизонтальное), а максимум осей сжатия имеют угол погружения 60° (близко вертикальное). Такое направление осей сжатия отмечается и другими исследователями для Тянь-Шанского региона [3, 12, 16].

Режим СТД. Тектонофизический анализ сейсмологических данных выполнялся методом С.Л. Юнги [3], где на основе *метода среднего механизма* (МСМ) рассчитывались параметры тензора приращений сеймотектонических деформаций. При использовании МСМ выборка землетрясений создается путем отбора из каталога фокальных механизмов землетрясений, попадающих в область осреднения, с определенным радиусом и с центром в узловой точке. В качестве таких точек могут быть координаты сильного землетрясения или координаты GPS-пунктов или др. В настоящей работе радиус зон осреднения составляет 0,5 град. и центром этих зон служат координаты 215 точек GPS локальной и региональной сети. Карта СТД, построенная на основе классификации режимов СТД [17], полученная по всему сейсмоактивному слою, представлена на рисунке 6. В левом верхнем углу представлено обозначение режимов СТД (S – shift, TS – transpression, T – trust, O – Oblique и TV – Vertical Trust). Направление узкого прямоу-

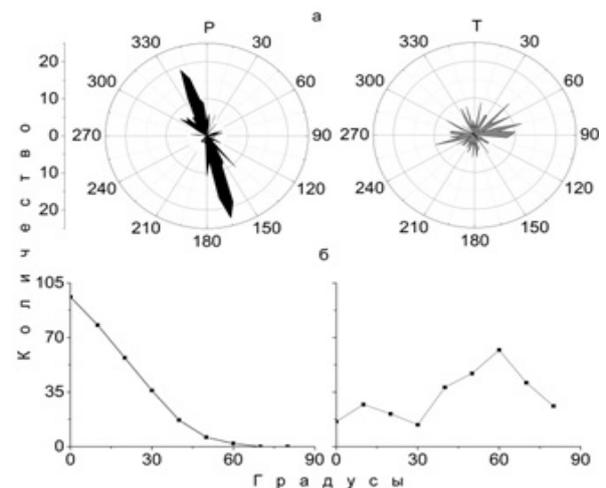


Рисунок 5 – Диаграммы распределения азимутов осей сжатия и растяжения и количественные зависимости угла погружения осей Р и Т

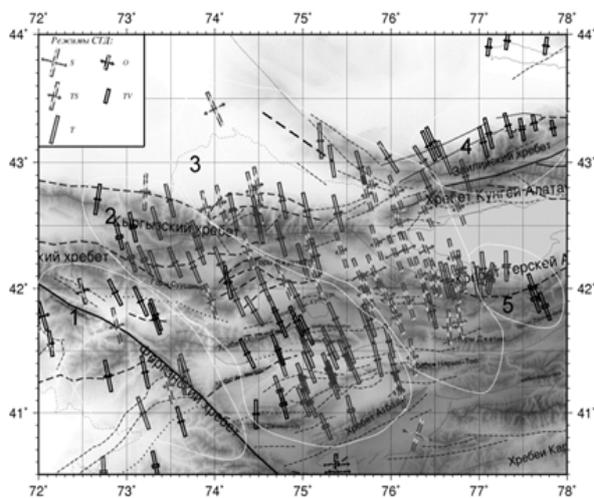


Рисунок 6 – Карта СТД

гольника обозначает азимут оси растяжения, стрелочка – оси сжатия, а их длина указывает на величину угла погружения. Согласно полученным результатам на территории Центрального Тянь-Шаня проявляются в основном три типа деформации: вертикальный взброс (TV), горизонтальное сжатие (T) и транспрессия (TS).

Рассмотрим каждую условно-обозначенную область проявления режимов СТД. Область 1 выделена как зона, включающая Талассо-Ферганский разлом. Эта зона характеризуется режимом сжатия и вертикального взброса. Вторая зона находится параллельно Талассо-Ферганскому разлому и для нее в основном характерен режим сжатия с проявлением в некоторых точках режима вертикального взброса. Для третьей зоны преобладающим является режим транспрессии на юге и режим сжатия на севере с вкраплениями точек с режимом транспрессии. Для 4 и 5 зон характерен режим вертикального взброса в восточной части и режим сжатия в западной. Оси сжатия в 1–3 областях имеют северо-северо-западное направление, в областях 4 и 5 оно меняется к субмеридианальному направлению, а в области 5 оси сжатия даже разворачиваются к северо-северо-восточному.

Кoeffициент Лодде-Надаи, угол вида напряженного состояния (омега). Для того чтобы получить представление о деформации земной коры в целом, используется коэффициент Лодде-Надаи, который не зависит от координатного представления тензора и может рассматриваться как инвариант. На рисунке 7 представлена карта распределения коэффициента Лодде-Надаи, построенная на

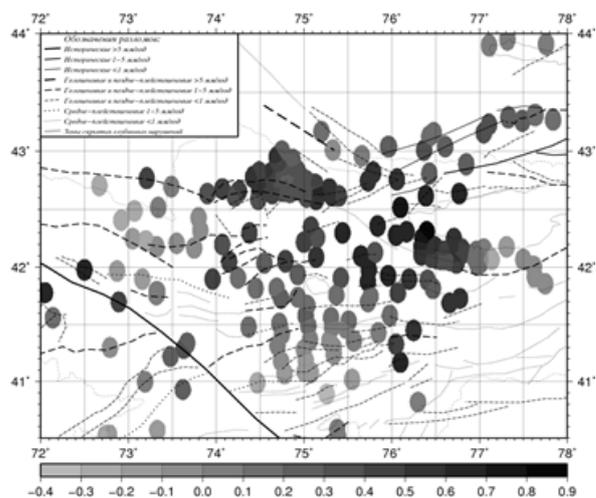


Рисунок 7 – Распределение коэффициента Лодде-Надаи

основе определения усредненных тензоров деформации для каждой узловой точки. Анализ значений этого коэффициента показал, что значительная часть исследуемой территории характеризуется деформацией простого сжатия ($\mu_s > 0,2$). Высокое значение этого коэффициента характерно для зоны сочленения Восточной части Киргизского хребта, западной части хребтов Терскей и Кунгей Ала-Тоо, обрамляющих оз. Иссык-Куль, район Кочкорской впадины, область северной части Талассо-Ферганского разлома и район Ат-Башинского хребта и Нарын-Тоо.

Схема классификации режимов СТД [17] основана на параметризации угловых параметров,

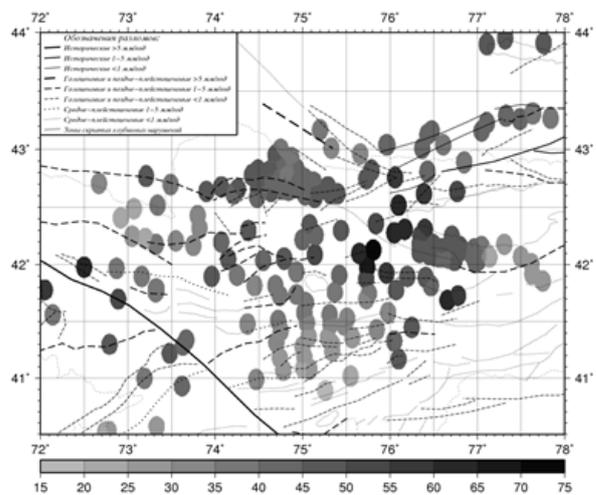


Рисунок 8 – Распределение угла омега (omega)

одним из которых является угол вида напряженного состояния ω [18]. Значение этого угла может меняться от 0° до 180° . Площадное распределение значений угла ω представлено на рисунке 8, где его значение меняется от 15° до 75° . Согласно полученным результатам, минимальное значение этого угла характерно для зоны, расположенной восточнее Талассо-Ферганского разлома (параллельная его расположению), и в Центральной части Терской Ала-Тоо, что может свидетельствовать о преобладающих горизонтальных усилиях в этих областях.

Заключение. В результате обработки цифровых записей землетрясений получены тензоры сейсмического момента для событий за 2007–2013 гг. и сформирован результирующий каталог, включающий в себя 128 событий, которые произошли в окрестности сети KNET за 1996–2013 гг. с $M > 3.5$, и данные из каталога СМТ (36 событий). Построены диаграммы распределения направления осей сжатия и растяжения и угла погружения этих осей. К исследуемым событиям применен метод сеймотектонических деформаций, построена карта СТД и выделены зоны проявления режимов СТД. Построены карты распределения коэффициента Лоде-Надаи и угла напряженно-деформированного состояния, выделены зоны сжатия и зоны с преобладающим горизонтальным усилием.

Автор выражает благодарность зав. ЛКИ В.Д. Брагину за предоставление цифровых записей землетрясений.

Работа выполнялась при частичной поддержке по гранту РФФИ № 15-05-06857а.

Литература

1. Сычева Н.А. Сеймотектонические 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, В.А. Мухамадиева // Физика Земли. 2005. № 11. С. 62–78.
2. Сычева Н.А. Обновленные материалы по механизмам очагов и сеймотектоническим деформациям земной коры Тянь-Шаня / Н.А. Сычева, С.Л. Юнга // Тр. конф. с участ. иностр. ученых. г. Новосибирск, 03–06 октября 2011 г. Новосибирск, 2011. С. 151–156.
3. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сеймотектонических деформаций / С.Л. Юнга. М.: Наука, 1990. 191 с.
4. Thorne Lay, Terry C. Wallace Modern Global Seismology / Thorne Lay, C. Terry. San Diego: Academic Press. 1995. 521 p.
5. Костюк А.Д. Механизмы очагов землетрясений средней силы на Северном Тянь-Шане / А.Д. Костюк // Вестник КPCY. 2008. Т. 8. № 1. С. 100–105.
6. URL: <http://www.iris.edu> Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS).
7. Yagi Y. Determination of focal mechanism by moment tensor inversion / Y. Yagi. Tsukuba: ISEE Lecture Note, 2004. 51 p.
8. Kohketsu K. The extended reflectivity method for synthetic nearfield seismograms / K. Kohketsu // J. Phys. Earth. 1985. V. 33. P. 121–131.
9. Kikuchi M., Kanamori H. Inversion of complex body waves-b / M. Kikuchi, H. Kanamori // Bull. Seismol. Soc. Am. 1991. 81. P. 2335–2350.
10. Yukitoshi Fukahata, Yagi Y., Matsu'ura M. Waveform inversion for seismic source processes using ABIC with two sorts of prior constraints: Comparison between proper and improper formulations / Fukahata Yukitoshi, Y. Yagi, M. Matsu'ura // Geophys. Res. Lett. 2003. 30, 10.1029/2002GL016293.
11. Земная кора и верхняя мантия Тянь-Шаня в связи с геодинамикой и сейсмичностью / отв. ред. А.Б. Бакиров. Бишкек: Илим, 2006. 116 с.
12. Курскеев А.К. Сейсмологическая опасность орогенов Казахстана / А.К. Курскеев, О.М. Белослюдцев, А.Р. Жданович, Б.З. Серазетдинова, Б.С. Степанов, Н.Б. Узбеков. Алматы: Эверо, 2004. 294 с.
13. Геологическая карта Киргизской ССР. М-6 1:500 000 / гл. ред. С.А. Игембердиев. Л.: Мингео СССР, 1980. 6 листов.
14. 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, Н.А. Сычева, Ю. Яги (Y. Yagi) // Физика Земли. 2010. № 3. С. 52–65.
15. URL: <http://www.globalcmt.org> Centroid moment tensor (СМТ)
16. Крестников В.Н. Напряженное состояние земной коры Центрального и Северного Тянь-Шаня / В.Н. Крестников, Е.И. Шишкин, Д.В. Штанге, С.Л. Юнга // 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.
18. Соколовский В.В. Теория пластичности / В.В. Соколовский. М.: Высшая школа. 1969. 608 с.