

УДК 550.344.43

## ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ОЧАГАХ СРЕДНЕМАГНИТУДНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В СЕВЕРНОМ ТЯНЬ-ШАНЕ

© 2014 г. Н. А. Сычева<sup>1</sup>, Л. М. Богомолов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научная станция РАН, г. Бишкек (НС РАН), Кыргызстан

<sup>2</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Россия

Поступила в редакцию 20.05.2013 г.

Работа посвящена оценкам динамических параметров 14 землетрясений с умеренной магнитудой (энергетический класс от 11 до 14), которые произошли на территории Северного Тянь-Шаня. Для проведения этих оценок (в частности, падения напряжения, которое в дальнейшем может использоваться в методике реконструкции коровых напряжений, разработанной Ребецким Ю.Л., ИФЗ РАН) были усовершенствованы алгоритмы и программы построения спектров сейсмограмм. Учитывались станционные поправки и трансформация спектров при распространении сейсмических волн в среде (эффект конечной добротности). Новый подход позволил рассчитать по сейсмограммам сети KNET значения радиуса очага, (Брюновского радиуса), скалярного сейсмического момента и падения (снятия) напряжений для упомянутых 14 землетрясений. Полученные результаты выявили разброс в величинах радиуса источника и падения напряжения даже для землетрясений близких энергетических классов. Диапазон изменения сброшенных напряжений оказался от одного бара до 75 бар. Также определялись фокальные механизмы и тип напряженного состояния земной коры. Стоит отметить, что в течение рассматриваемого периода не было сильных землетрясений (с классом выше 14) на территории внутри сети KNET.

DOI: 10.7868/S0002333714030119

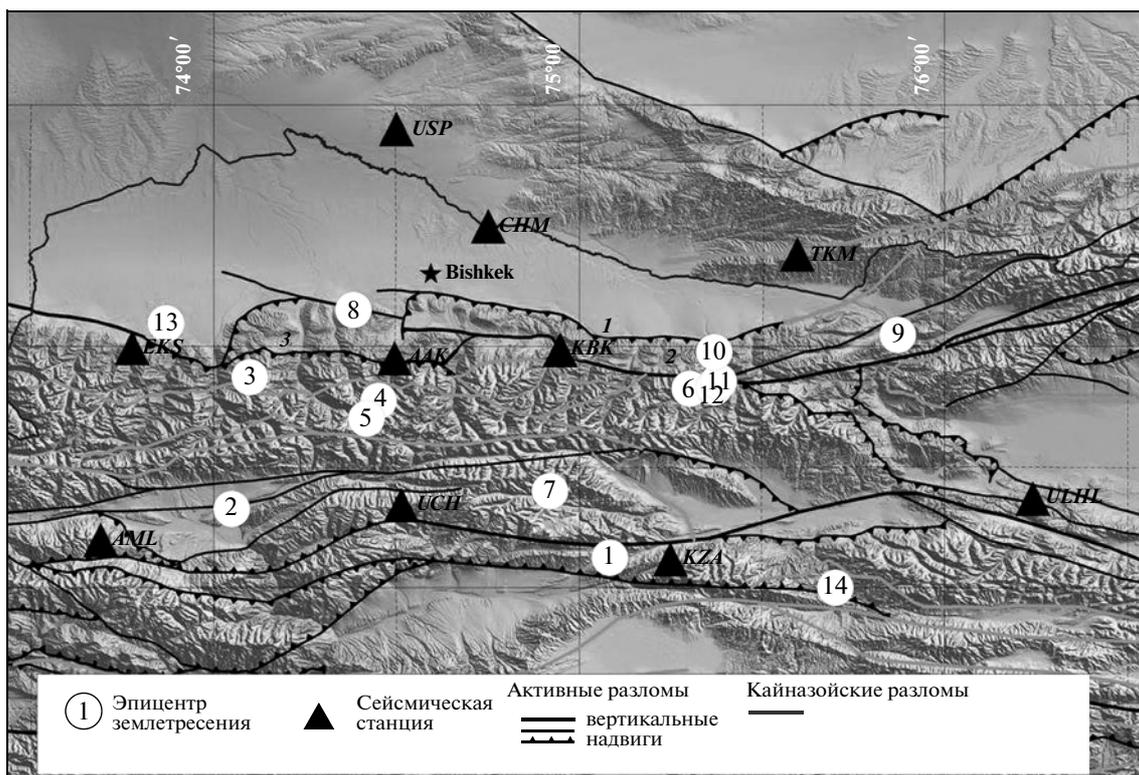
### ВВЕДЕНИЕ

Массовое определение падений напряжения в очагах землетрясений, ЗЛТ, умеренной силы (наряду с единичными случаями сильных ЗЛТ) может характеризовать современное напряженное состояние земной коры сейсмоактивных регионов и особенности процесса деструкции среды. Для Тянь-Шанского региона данные о динамических параметрах: скалярных сейсмических моментах  $M_0$ , радиусах “среза” спектральной плотности,  $r$ , (Брюновских радиусах) и падениях напряжения  $\Delta\sigma$  были ранее получены в работах [Горбунова, Кальметьева, 1988; Кальметьева и др., 1992]. Однако в этих работах расчеты проводились лишь для наиболее сильных и слабых событий в изучаемом регионе.

Теоретические основы метода расчетов были заложены в работах [Костров, 1966; 1975; Ризниченко, 1976; Вгуне 1970; 1971]. Важным выводом теоретических работ стало то, что для оценочных расчетов скалярного момента и Брюновского радиуса достаточно определить по сейсмограммам всего два параметра: частоту среза и предельную спектральную плотность смещения на низких частотах. При этом прочие параметры (плотность,  $\rho$ , скорость поперечных волн  $V_S$ ) характеризуют макрообъем массива в земной коре, и, как правило, считаются одинаковыми для всех событий. Развитие модели очаговой подвижки Кострова—

Брюна и др. в детализационных работах [Арефьев, 2003; Ключевский, Демьянович, 2002; Madariaga, 1983; Atkinson, Booge, 1995] не изменило вывода о применимости вышеописанного подхода. Этот общепринятый подход позволяет значительно расширить число землетрясений, для которых определяются динамические параметры, если имеются качественные исходные данные (цифровые записи сейсмограмм) [Сычева и др., 2012].

В настоящей работе расчет динамических параметров очагов землетрясений проводится по данным цифровой телеметрической сети KNET. Сеть KNET включает 10 широкополосных сейсмостанций, установленных на территории Северной части Центрального Тянь-Шаня (Кыргызский хребет и прилегающие территории). Сеть обеспечивает регистрацию локальной сейсмичности внутри области ( $41^\circ$ – $43^\circ$  с.ш.,  $73^\circ$ – $77^\circ$  в.д.) (рис. 1). По данным KNET были определены фокальные параметры (более 1000 решений), и усредненные сеймотектонические деформации [Сычева и др., 2005; 2008; Костюк и др., 2010]. Полученные с помощью этой сети данные были использованы для реконструкции напряжений в коре Тянь-Шаня методом катакластического анализа [Rebetskiy et al., 2012]. Данные о падениях напряжений важны для дальнейшего развития метода катакластического анализа (МКА), который уже доказал свою эффективность [Ребецкий, 2007; 2009]. Можно ожидать проявление синер-



**Рис. 1.** Карта расположения станций сети KNET [Сычева и др., 2005] и эпицентров землетрясений. Номера землетрясений согласно табл. 1. Разломы по данным А.В. Миколайчука [Кальметьева и др., 2009]. Разломы: 1 – Иссык-Атинский; 2 – Шамси-Тюндюкский; 3 – Чонкурчакский.

гизма в результате сопоставления материалов об абсолютных значениях напряжений в земной коре, полученных методом МКА, и оценках падения напряжения при землетрясениях 11–14 класса, которые в Северном Тянь-Шане происходят достаточно часто. Для общей характеристики сейсмичности стоит отметить, что на территории изучаемого региона в период 1998–2009 гг. не было ЗЛТ классов выше 14.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

### Исходные данные

В качестве исходных данных были использованы сейсмограммы локальных сейсмических событий, которые произошли на территории расположения станций сети KNET [Сычева и др., 2005] за 1998–2009 гг. с  $K = 11.5–13.7$ . В табл. 1 представлены параметры исследуемых землетрясений, а на рис. 1 пронумерованными белыми кружками отмечено эпицентральное положение этих событий, нумерация соответствует порядковому номеру (табл. 1).

Для определения знака прихода  $P$ -волны и расчета динамических параметров использовались записи скоростей сейсмических волн (в нм/с) с частотой оцифровки 100 Гц.

### Определение фокальных механизмов

*Определение фокальных механизмов землетрясений по знаку прихода  $P$ -волны.* Для расчета фокальных механизмов очагов использовалась программа FPFIT [Reasenber and Oppenheimer, 1985], 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 [Lienert et al., 1986] (программа расчета параметров гипоцентра) и файл управления, позволяющий настраивать значения параметров расчета, например, количество зарегистрированных фаз. Программа FPFIT позволяет получать решения фокальных механизмов, если события зарегистрированы пятью и более станциями ( $OBS = 5$ , observation). Как известно, сейсмическая сеть KNET включает в себя 10 станций и максимальное число станций, которыми может быть зарегистрировано событие, равно 10. При нахождении решений механизмов очагов землетрясений из решения исключались станции, которые находятся вблизи события, поэтому в среднем решения получены по 7–9 станциям сети.

Таблица 1. Основные параметры исследуемых землетрясений

№	Дата	Час	Мин	Сек	$\varphi^\circ$	$\lambda_0$	$H$ , км	$K$
1	02.11.1998	0	57	36.6	42.09	75.07	17	11.5
2	21.11.1998	11	46	9.4	42.24	74.08	19	12.5
3	18.11.2001	1	28	55.1	42.59	74.13	5	12.7
4	21.02.2003	10	35	21.4	42.52	74.47	21	11.7
5	06.10.2003	16	42	13.5	42.50	74.48	22	12.0
6	16.01.2004	9	6	17.6	42.54	75.30	10	13.7
7	02.06.2004	17	15	10.6	42.27	74.91	18	13.3
8	20.06.2005	14	25	1.5	42.77	74.37	21	12.0
9	27.12.2005	0	55	30.3	42.70	75.90	12	11.6
10	28.12.2005	1	52	47.9	42.69	75.41	12	11.9
11	08.11.2006	2	21	26.7	42.56	75.35	11	13.4
12	06.06.2007	11	9	25.4	42.56	75.40	15	13.3
13	01.02.2009	11	25	38.0	42.75	73.87	15	12.3
14	07.08.2009	4	32	46.6	42.01	75.69	15	11.8

*Инверсный метод.* В сейсмологии в последнее время нашли широкое применение компьютерные технологии определения полного тензора сейсмического момента, использующие в цифровом виде зарегистрированные волновые формы [Dziewonski et al., 1981; Sipkin, 2001]. Однако эти методы могут применяться только к сильным землетрясениям, зарегистрированным на телесеismicких расстояниях. В нашем случае, выбранные события можно отнести к событиям умеренной силы. Для такого рода событий можно применить инверсный метод, описанный в работе [Yagi, 2004]. В работе [Костюк и др., 2010] изложена методика волнового моделирования (инверсии) и приведены решения для 76 землетрясений, и в том числе для 11 из (табл. 1). Методика волновой инверсии применялась для оценки парамет-

ров очагов землетрясений: углов ориентации nodальной плоскости и подвижки (strike, dip, slip), а также параметров: моментной магнитуды ( $M_w$ ), глубины ( $H$ ) и др. для событий находящихся на расстоянии не более  $1^\circ-2^\circ$  за пределами сейсмической сети KNET.

*СМТ-решения.* На сайте <http://www.globalcmt.org> представлены определения механизма очага только для трех, наиболее значимых событий из табл. 1.

Все решения фокальных механизмов очагов землетрясений (табл. 1), полученные в данной работе по знаку прихода  $P$ -волны на станцию, а также из других источников представлены на рис. 2.

Решения, полученные по знаку прихода  $P$ -волны в целом хорошо согласуются с решениями из других источников, некоторые наблюдаемые раз-

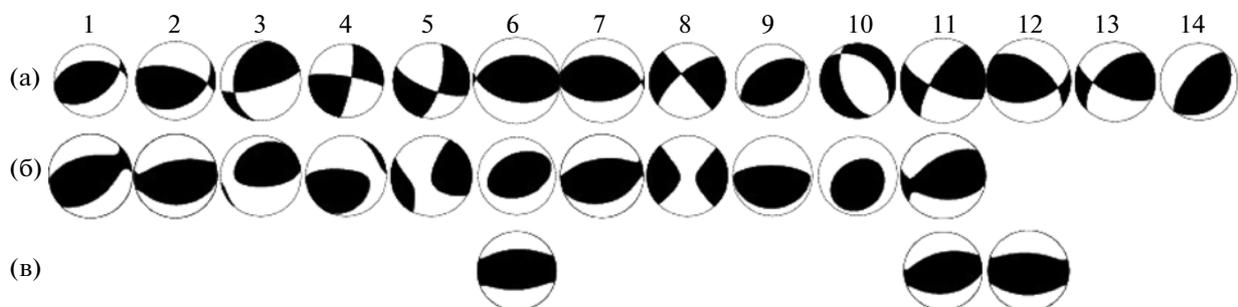


Рис. 2. Механизмы очагов ЗЛТ из табл. 1: (а) – решения получены по знаку прихода  $P$ -волны; (б) – инверсный метод [Костюк, 2008]; (в) – СМТ-определения [СМТ решения, 2013].

личия можно объяснить недостаточностью количества знаков (7–9 станций).

### Теоретические основы и методика расчета динамических параметров ЗЛТ

Оценочный расчет динамических параметров очагов ЗЛТ: радиуса очага,  $r$ , скалярного сейсмического момента,  $M_0$ , и падения напряжения,  $\Delta\sigma$ , проводился с использованием общепринятых выражений из источников, ставших классическими [Аки, Ричардс, 1983; Ризниченко, 1985]. В этих выражениях важно, что радиус  $r$  и момент  $M_0$  определяются по спектральным характеристикам сейсмограмм независимо друг от друга, а  $\Delta\sigma$  оказывается пропорциональным отношению  $M_0/r^3$  [Костров, 1975].

Размер очага (так называемый радиус Брюна,  $r = r_B$ ) определяется формулой

$$r = 2.34V_S/2\pi f_0, \quad (1)$$

где  $V_S$  — скорость поперечных волн,  $f_0$  — угловая частота, определяемая по изменению (излому) характерного для низких частот линейного тренда спектральной плотности. При применении формулы Брюна поверхности разрыва обычно считается круговой, с радиусом  $R$ , а зона очага — сферической. Тогда площадь разрыва равна  $S = \pi r^2$ , а скалярный сейсмический момент описывается, согласно [Аки, Ричардс, 1983] как произведение

$$M_0 = \mu \pi r^2 D. \quad (2)$$

В формуле (2)  $\mu$  — модуль сдвига по месту очага,  $D$  — среднее смещение вдоль плоскости разрыва. Практически во всех моделях очага считается, что смещение происходит одновременно по всей плоскости разрыва.

Выражение для расчета скалярного момента по низкочастотному пределу спектральной плотности смещения  $\Omega_0$  вытекает из решений волновых уравнений для сферически расходящихся сейсмических волн [Аки, Ричардс, 1983]. Это выражение записывается в форме

$$M_0 = 4\pi\rho R V_S^3 \Omega_0 / \Psi_\theta, \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность пород в области очага,  $R$  — гипоцентральное расстояние,  $\Psi_\theta$  — фактор направленности излучения из очага (для источника, описываемого скачком смещения на плоскости разрыва), среднее значение этого фактора принимается 0.64 [Ризниченко, 1985]. В дальнейшем будем для краткости называть  $\Omega_0$  амплитудой на нулевой частоте, или НЧ амплитудой. Стоит отметить, что формула (3) справедлива для любых расстояний от источника, превышающих характерную длину волны, т.е. в волновой зоне [Аки, Ричардс, 1983]. Однако наибольшая точность по-

лучается для относительно небольших расстояний  $R$ , когда значения  $\rho$ ,  $V_S$ , в самом очаге и в референтной точке можно считать одинаковыми.

Для оценки падения напряжения для землетрясения с моментом  $M_0$  можно использовать выражение,

$$\Delta\sigma = 7M_0/16r^3 \quad (4)$$

в котором значение коэффициента пропорциональности между  $\Delta\sigma$  и отношением  $M_0/r^3$  выбрано в соответствии с результатами расчетов [Brune, 1970] для модели поверхности разрыва в форме круга.

При расчетах динамических параметров ЗЛТ на территории Северного Тянь-Шаня по формулам (1)–(4) значения плотности, скорости поперечных волн и модуля сдвига принимались равными, соответственно,  $\rho = 2.6$  г/см<sup>3</sup>, согласно [Чедия, 1986],  $V_S = 3.5$  км/с, согласно [Roecker et al., 1993],  $\mu = 2 \times 10^{10}$  Н/м<sup>2</sup>.

Методика определения базовых параметров: угловой частоты  $f_0$  и НЧ амплитуды  $\Omega_0$  по спектрам сейсмограмм описана в ряде работ [Аптекман и др., 1989; Ameri et al., 2009; Oth et al., 2011; 2009; Parolai et al., 2007]. При расчетах этих параметров по данным сети KNET учитывалось, что сейсмические ряды со станций KNET представляют собой записи скорости, а не смещения. Поэтому для использования стандартной методики спектры скоростей пересчитывались на смещения.

Построение спектральных зависимостей сейсмограмм, по которым определяются входящие в выражения (1) и (3) базовые параметры  $f_0$  и  $\Omega_0$ , включает в себя следующие этапы: 1 — выбор станций и интервалов сейсмограмм; 2 — расчет спектров сейсмограмм по месту регистрации; 3 — приведение спектра к референтной точке в окрестности очага (переход к спектрам источников). Совершенствование методики расчетов на втором и третьем этапе имеет ключевое значение для результатов данной работы

*Выбор станций и интервалов сейсмограмм.* Исследуемые события (табл. 1) были зарегистрированы всеми десятью станциями сети KNET. Для обработки и анализа для каждого ЗЛТ были отобраны записи с трех станций, которые находятся на минимальном расстоянии от гипоцентра, но не меньше 50 км. С другой стороны, с удалением от очага может увеличиваться искажение спектра из-за влияния среды.

Для построения спектров использовались записи  $S$ -волн. Станции сети KNET относятся к малошумящим [Сычева и др., 2010], и для выбранных землетрясений уровень полезного сигнала, т.е. амплитуды  $S$ -волн, более чем в три раза превышает уровень помех. При выборе интервала участка  $S$ -волны решается задача выделения так

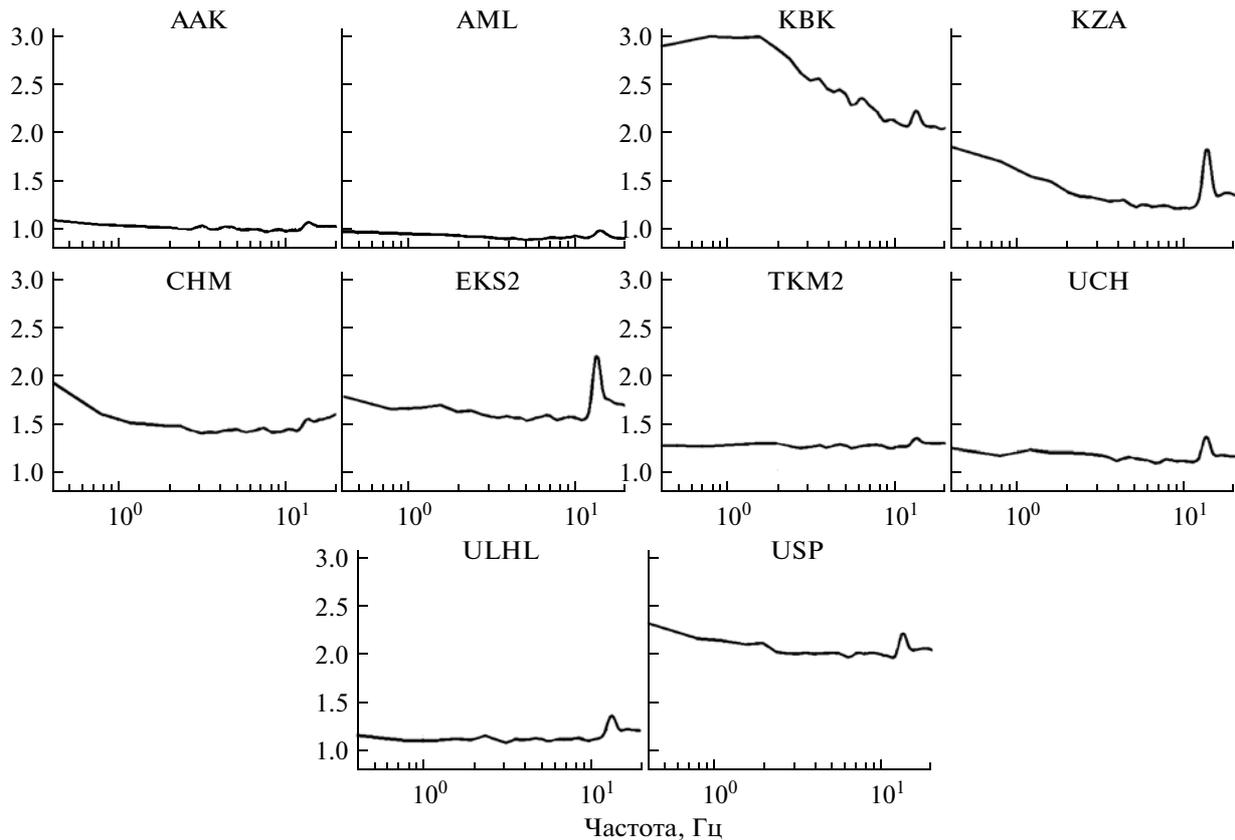


Рис. 3. Станционные поправки станций сети KNET.

называемых “прямых” сейсмических волн, которые наиболее полно характеризуют очаг землетрясения. Длина отрезка выбирается в интервале времени от  $\sim 1$  с до начала  $S$ -волны и до момента спада ее амплитуды до  $1/3$  от максимального значения (участок выделения 80% сейсмической энергии) [Ameri et al., 2009; Oth et al., 2011; 2009]. Выбранный участок записи проходит фильтрацию во взвешивающем окне с применением фильтра Хемминга для исключения разрыва функции.

**Построение станционного спектра.** Построение спектра выполнялось путем применения стандартного алгоритма быстрого преобразования Фурье, БПФ. БПФ применяется к сигналам, длительность которых, нормированная на шаг оцифровки, кратна двойке, поэтому выбранный участок записи обрезается или дополняется к длине, удовлетворяющей этому требованию. Выбор расстояния более 50 км от гипоцентра ЗЛТ обеспечивает достаточную длительность записи  $S$ -волны для эффективного применения БПФ. Например, для отобранного 5 с интервала анализ проводился для 512 дискрет.

Построение станционных спектров  $S$ -волны проводилось по двум горизонтальным компонентам записей скоростей с поляризацией N (север-юг) и E (восток-запад).

**Построение станционных поправок.** Расчет функции поправок (сайт-эффектов) для станций сети KNET проводился по данным о сейсмическом шуме с применением метода Накамуры, рассматривающего отношения горизонтальных спектральных гармоник к вертикальным, [Nakamura, 1989]. Длительность временного отрезка записи сейсмического шума составлял 60 с [Bindi et al., 2000]. Количество анализируемых окон около 40 по каждой станции. Из выбранного участка записи удалялся линейный тренд, и сигнал сглаживался на концах с помощью 5% косинусоидального окна. Далее к полученному ряду применялись поправки за погрешность измерения прибора, проводилось быстрое преобразование Фурье, результат сглаживался при помощи метода Конно и Омачи. К полученным спектрам применялся метод Накамуры. На рис. 3 приведены результаты расчета станционных поправок станций сети KNET.

**Переход от станционного спектра к спектру источника.** Эта вычислительная задача реализована с использованием результатов [Ameri et al., 2009; Oth et al., 2011; 2009; Parolai et al., 2007]. Следуя подходу этих работ соотношение между спектром смещения для отдельной  $j$ -станции, находящейся на расстоянии  $R$  от источника,  $U_j(f, r)$ , и спектром источника  $S_j(f)$  — можно записать в виде

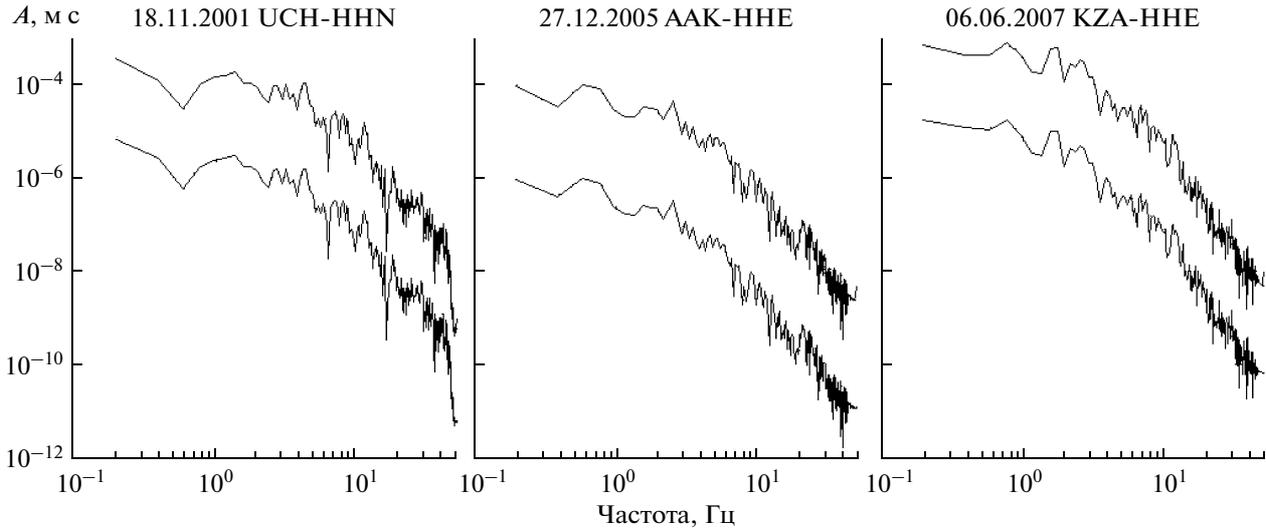


Рис. 4. Спектры источника (вверху) и станционные спектры (внизу) для записей ЗЛТ № 3, № 9 и № 12 из табл. 1.

$$U_j(f, R) = S_i(f)A_j(f, R)G_j(f). \quad (5)$$

В правую часть (5) входят две гриновские функции  $A_j(f, R)$  и  $G_j(f)$ , причем, функция  $G_j(f)$  является станционной поправкой (см. выше). Эта поправка определялась для каждой станции на основе подхода, описанного в работах [Parolai et al., 2004; Nakamura, 1989]. Зависящая от частоты и расстояния функция  $A_j(f, R)$  описывает изменения амплитуды спектральных гармоник на пути от очага до станции за счет геометрического расхождения и поглощения энергии в среде (фактор конечной добротности,  $Q$ ). Выражение для функции  $A_j(f, R)$  может быть представлено в форме,

$$|A_j(f, R)| = \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{\pi f R}{Q V_s}\right). \quad (6)$$

Для определения частотной зависимости добротности были использованы материалы из работы [Земцова, 1985], где показано, что для Тянь-Шаня применима аппроксимация  $Q(f)$  степенной функцией  $Q(f) = Q_0 f^\alpha$  с численными значениями коэффициентов  $Q_0$  и  $\alpha$ :  $Q_0 = 137$ ,  $\alpha = 0.82$ . Таким образом, функцию  $A_j(f, R)$ , как и  $G_j(f)$ , ниже можно считать полностью определенной.

Выражение (5) удобно преобразовать при помощи логарифмирования, тогда формула для расчета спектра, приведенного к источнику, запишется в виде:

$$\lg_{10}(S_i(f)) = \lg_{10}(U_j(f, R)) - \lg_{10}(A_j(f, R)) - \lg_{10}(G_j(f)). \quad (7)$$

Процедура приведения спектра к источнику по формуле (7) с исключением станционных эффектов и влияния среды при распространении сейсмических волн применялась для компонент  $E$  и  $N$  трех выбранных станций по каждому исследуемому ЗЛТ. Вычисление  $f_0$  и  $\Omega_0$  осуществлялось по спек-

тру той компоненты, для которой уровень спектральной плотности был выше, и, как следствие больше величина  $\Omega_0$ . На рис. 4. приведены примеры станционных спектров и спектров источника, построенные в соответствии с выражением (7). Расчет станционных спектров проводился по программе [Мансуров, Сычева, 2011].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

*Расчет параметров фокальных механизмов.* На рис. 5 представлено расположение эпицентров землетрясений и на края карты вынесены решения фокальных механизмов. Очаги 10 ЗЛТ лежат непосредственно в предгорьях Киргизского хребта, а четыре на хребтах Джумгал-Тоо, Кара-Катты и Суусамырской впадине. Первая часть событий произошла непосредственно в зоне сочленения Тянь-Шаня и Казахской платформы, а вторая часть уже за Киргизским хребтом. Рассматривая механизмы землетрясений первой зоны можно отметить разнообразие решений механизмов очагов: сбросы (событие 10), горизонтальные сдвиги (4, 5, 8), взбросо-сдвиги (3, 13) и взбросы (6, 9, 11, 12), что может свидетельствовать о сложной геодинамической обстановке зоны сочленения. События, попавшие во вторую группу, имеют однотипный механизм очага – взбросовый, что может свидетельствовать об устойчивости режима деформации вдали от зоны сочленения. Согласно диаграммам распределения азимутов осей сжатия и растяжения (рис. 6) преобладающим направлением для оси сжатия является северо-западное и для оси растяжения направление меняется в секторе от северо-восточного до юго-восточного. Это согласуется с результатами опубликованными [Сычева и др., 2005; Костюк и др., 2010].

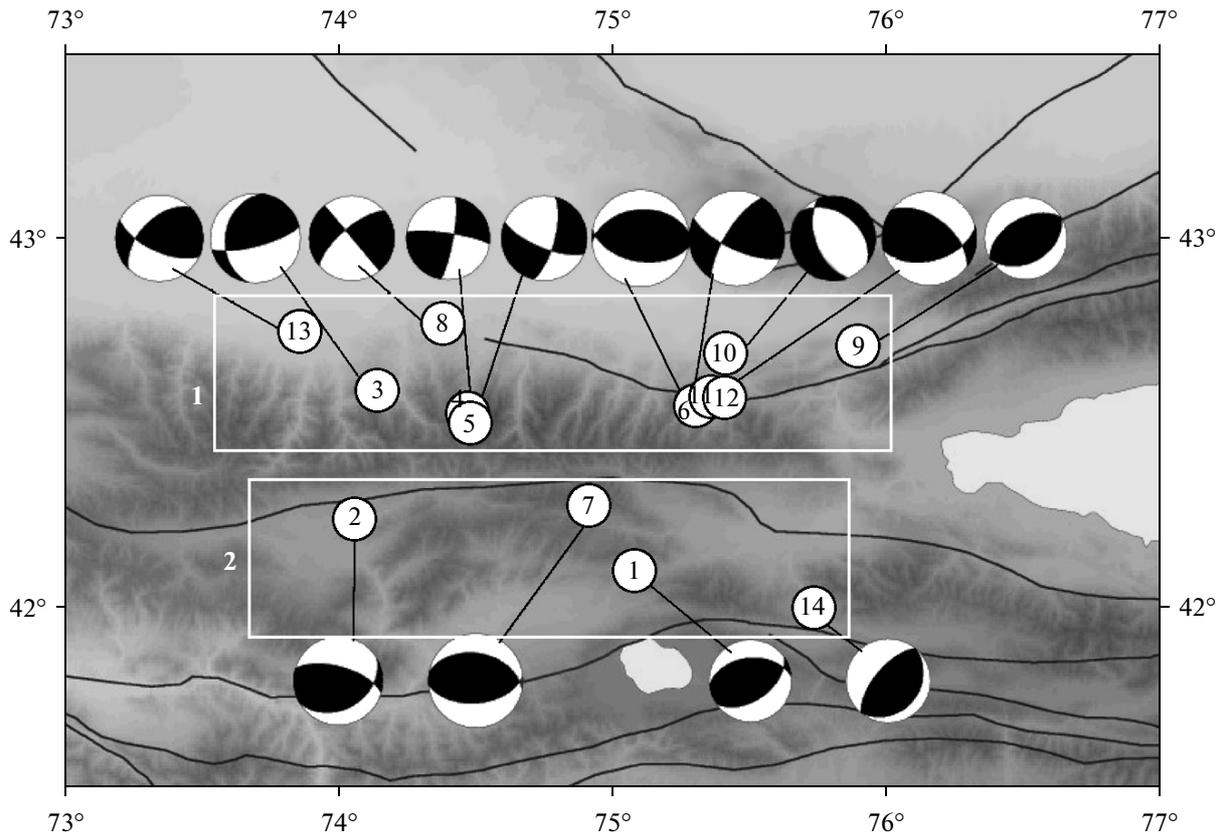


Рис. 5. Карта эпицентрального положения землетрясений и фокальные механизмы очагов.

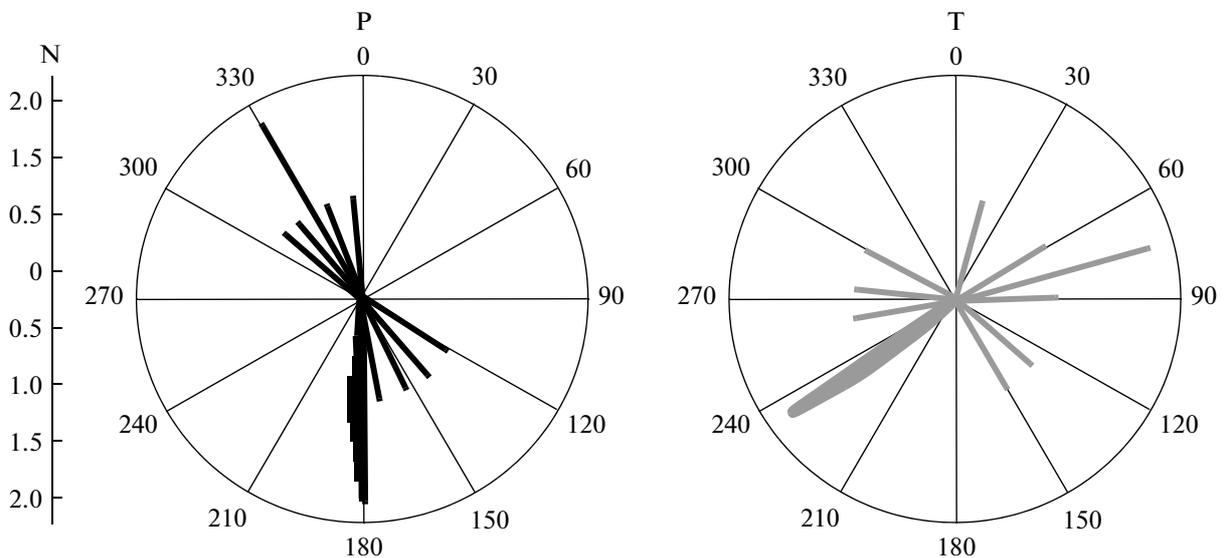


Рис. 6. Диаграммы распределения азимутов осей сжатия (Р) и растяжения (Т).

*Расчет динамических параметров ЗЛТ.* Расчет динамических параметров очагов ЗЛТ проводился по формулам (1), (3) и (4). В табл. 2 приведены результаты расчета “промежуточных” параметров  $f_0$ ,  $\Omega_0$ , определяемых по спектрам очагов, а

также сейсмического момента,  $M_0$ , радиуса очага,  $r$ , и падения напряжения,  $\Delta\sigma$ , для каждого из 14 рассматриваемых ЗЛТ.

Для формирования окончательного результата расчетов по каждому событию из табл. 2 были ис-

Таблица 2. Промежуточные результаты расчета динамических параметров ЗЛТ

№ события	Станция	Канал	$S$ , км	$f_0$ , Гц	$\Omega_0$ , м с	$M_0$ , дин см	$r$ , м	$\Delta\sigma$ , МПа
1	КБК	HHN	65	2.9	2.0E-05	4.67E+22	449	0.225
	UCH	HHN	51	2.9	6.0E-05	1.4E+23	449	0.675
	ULHL	HHN	98	2.8	1.8E-05	4.2E+22	466	0.182
2	ААК	HHE	59	1.6	2.8E-04	6.54E+23	815	0.529
	EKS2	HHN	55	1.9	2.0E-04	4.67E+23	686	0.633
	КБК	HHN	88	2.8	1.9E-04	4.44E+23	466	1.924
3	AML	HHN	63	3.3	4.5E-04	1.05E+24	395	7.459
	КБК	HHN	67	3.2	6.1E-05	1.42E+23	407	0.922
	UCH	HHN	51	2.6	1.9E-04	4.44E+23	501	1.540
4	AML	HHN	80	2.9	6.0E-06	1.4E+22	449	0.067
	СНМ	HHE	61	3	4.0E-06	9.34E+21	434	0.050
	EKS2	HHE	62	3	9.9E-06	2.31E+22	434	0.123
5	AML	HHE	81	3.4	1.2E-05	2.8E+22	383	0.218
	СНМ	HHE	63	3.8	2.0E-05	4.67E+22	343	0.506
	EKS2	HHN	64	3.3	3.3E-05	7.7E+22	395	0.547
6	ААК	HHN	67	2.2	5.2E-04	1.21E+24	592	2.554
	СНМ	HHE	68	1.3	3.8E-04	8.87E+23	1003	0.385
	UCH	HHN	74	1.9	3.9E-04	9.11E+23	686	1.234
7	ААК	HHE	56	2.7	4.8E-04	1.12E+24	483	4.357
	СНМ	HHE	83	2.8	6.5E-05	1.52E+23	466	0.658
	TKM2	HHE	92	2.8	3.0E-04	7E+23	466	3.037
8	EKS2	HHN	54	3.2	1.3E-05	3.04E+22	407	0.196
	КБК	HHE	53	2.9	1.8E-05	4.2E+22	449	0.202
	USP	HHN	60	3.2	6.0E-06	1.4E+22	407	0.091
9	КБК	HHE	78	3.1	1.1E-05	2.57E+22	420	0.151
	KZA	HHE	88	2.8	2.9E-05	6.77E+22	466	0.294
	ULHL	HHE	53	3.4	2.0E-05	4.67E+22	383	0.363
10	ААК	HHE	76	1.3	5.6E-05	1.31E+23	1003	0.057
	СНМ	HHE	65	2.5	4.6E-05	1.07E+23	521	0.331
	KZA	HHN	70	1.7	1.8E-04	4.2E+23	767	0.408
11	ААК	HHE	72	2	7.8E-04	1.82E+24	652	2.878
	СНМ	HHE	65	2.2	3.9E-04	9.11E+23	592	1.915
	KZA	HHN	70	2.1	6.0E-04	1.4E+24	621	2.563
12	ААК	HHN	76	2.8	3.0E-04	7E+23	466	3.037
	СНМ	HHE	73	3.2	3.8E-04	8.87E+23	407	5.743
	KZA	HHE	58	3	4.8E-04	1.12E+24	434	5.977
13	ААК	HHE	55	2.8	1.9E-04	4.44E+23	466	1.924
	AML	HHE	72	2.4	1.3E-04	3.04E+23	543	0.829
	USP	HHE	79	3.2	2.6E-05	6.07E+22	407	0.393
14	КБК	HHN	98	3.3	2.8E-05	6.13E+22	395	0.435
	TKM2	HHE	103	2.8	1.6E-05	3.5E+22	466	0.152
	UCH	HHE	104	3.2	1.9E-05	4.16E+22	407	0.269

**Таблица 3.** Значения динамических параметров ЗЛТ из (табл. 1) и тип фокального механизма. Серым цветом отмечено совпадение порядка с другими источниками

№	$H$ , км	$K$	$f_0$ , Гц	$\Omega_0$ , м с	$r$ , м	$\Delta\sigma$ , бар	$M_0$ , дин см			Тип механизма
							данная работа	[Костюк, 2010]	СМТ решения	
1	15	11.5	2.9	6.00E-05	449	6.7	1.4E+23	4.50E+23		Взб. сдвиг
2	20	12.5	1.6	2.80E-04	815	5.3	6.54E+23	4.44E+24		Взброс
3	6	12.7	3.3	4.50E-04	395	74.6	1.05E+24	1.99E+24		Взб. сдвиг
4	13	11.7	3.0	9.90E-06	434	1.2	2.31E+22	2.10E+23		Гор. сдвиг
5	16	12.0	3.3	3.30E-05	395	5.5	7.7E+22	2.19E+23		Гор. сдвиг
6	13	13.7	2.2	5.20E-04	592	25.5	1.21E+24	7.92E+24	2.37E+24	Взброс
7	17	13.3	2.7	4.80E-04	483	43.6	1.12E+24	3.67E+24		Взброс
8	23	12.0	2.9	1.80E-05	449	2.0	4.2E+22	2.32E+23		Гор. сдвиг
9	6	11.6	2.8	2.90E-05	466	2.9	6.77E+22	3.60E+23		Взброс
10	12	11.9	1.7	1.80E-04	767	4.1	4.2E+23	1.91E+24		Сброс
11	18	13.4	2.0	7.80E-04	652	28.8	1.82E+24	9.41E+24	2.07E+24	Взброс
12	13	13.3	3.0	4.80E-04	434	59.8	1.12E+24		3.80E+24	Взброс
13	15	12.3	2.8	1.90E-04	466	19.2	4.44E+23			Взб. сдвиг
14	5	11.8	3.3	2.80E-05	395	4.4	6.13E+22			Взброс

пользованы те станции, для которых значение скалярного сейсмического момента максимально. Полученные результаты представлены в табл. 3. Для сравнительного анализа там же представлены значения скалярного сейсмического момента, полученные по этим событиям, но из других источников [Костюк и др., 2010; СМТ решения, 2013]. Можно отметить, что значения сейсмического момента, полученные в данной работе соизмеримы со значениями из каталога СМТ, и несколько различаются от значений, полученных на основе инверсного метода.

Согласно табл. 3, диапазон изменения снимаемых напряжений от 1 до 75 бар. Наибольшая величина падения напряжения отмечается для ЗЛТ № 3, 12, 7, 11, 6, 13. Гипоцентры этих событий расположены вблизи Шамси-Тундукского и Чонкурчакского разломов. Всем четырем событиям с классом более 13 соответствуют повышенные значения  $\Delta\sigma$ , хотя максимальный спад  $(\Delta\sigma)_{\max} = 75$  бар имел место при ЗЛТ № 3,  $K = 12.7$ .

Наименьшее снятие напряжения было при ЗЛТ № 4, 8, 10, 14. Для этих событий энергетический класс меньше или равен 12. За исключением случая события № 10, гипоцентры ЗЛТ с малыми  $\Delta\sigma$  разнесены с расположением очагов ЗЛТ, которые дали наибольшее падение напряжения.

На рис. 7 представлены распределения динамических параметров ЗЛТ в зависимости от класса и построены линейные тренды, которые оказались нарастающими для всех параметров:  $r$ ,  $M_0$ ,  $\Delta\sigma$ .

*Сброшенные напряжения и фокальные механизмы.* На рис. 8 представлена карта распределения геодинамического режима земной коры Северного Тянь-Шаня [Rebetsky et al., 2012] и эпицентральное положение исследуемых землетрясений. Слева на карте представлена легенда, согласно которой для исследуемой территории характерно разнообразие режимов напряженного состояния. Согласно уровню сброшенных напряжений из табл. 3 отмечено, что 4 из 5 землетрясений с уровнем сброшенных напряжений больше 10 бар попадают в области, которые характеризуются режимом горизонтального сжатия (№ 6, 11, 12, 7). События № 3 и № 13, имеющие уровень сброшенных напряжений больше 10 бар попадают вне обозначенного поля напряжений.

Важно отметить различие в величинах спада напряжений для событий с практически одинаковыми энергетическими характеристиками, но разными фокальными механизмами. Так, например, для событий № 9 ( $K = 11.6$ ) и № 4 ( $K = 11.7$ ) с механизмами взброс и горизонтальный сдвиг соответственно уровень  $\Delta\sigma$  составляет 2.9 бар для взбросового ЗЛТ и 1.2 бар для сдвигового ЗЛТ.

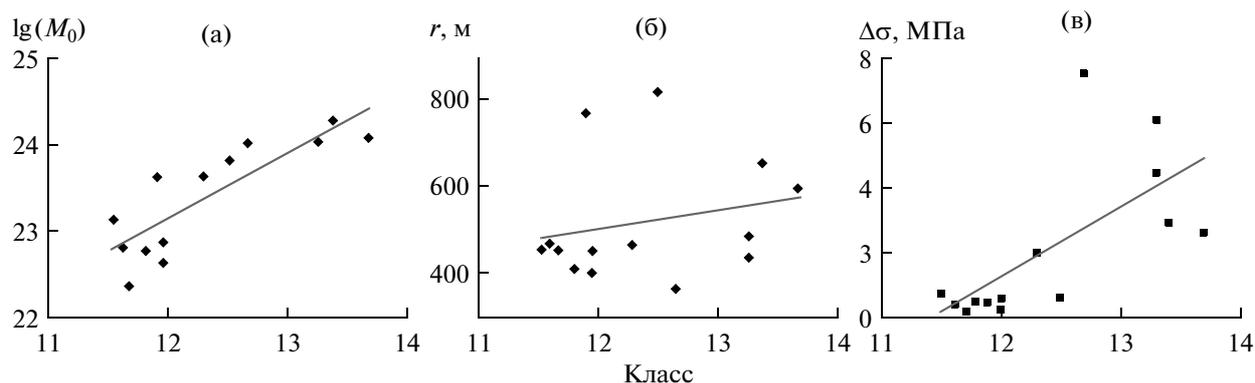


Рис. 7. Зависимости динамических параметров от класса ЗЛТ: (а) – сейсмический момент ( $M_0$ ); (б) – радиус очага; (в) – сброшенное напряжение ( $\Delta\sigma$ ).

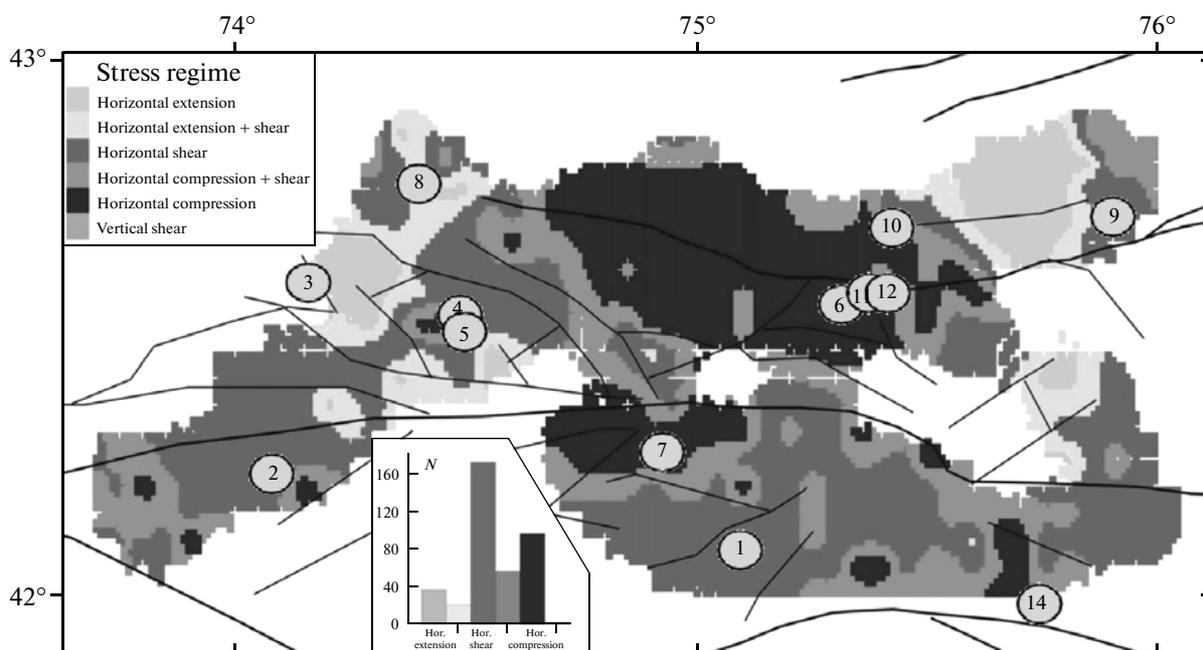


Рис. 8. Тип геодинамического режима земной коры Северного Тянь-Шаня [Rebetsky et al., 2012] и эпицентральное положение землетрясений. Нумерация ЗЛТ согласно табл. 1.

Другим примером могут быть события № 5 ( $K = 12.0$ ) и № 10 ( $K = 11.9$ ) с очень близкой энергией, но имеющие разные механизмы очагов: сдвиг № 5, и сброс для № 10. Для этих событий получены следующие значения снимаемых напряжений: для сдвигового очага ЗЛТ  $\Delta\sigma = 5.5$  бар, а для сбросового – 4.1 бара.

Из-за небольшой статистики определений  $\Delta\sigma$  землетрясений можно лишь отметить различие величины падения напряжения для близких по энергии ЗЛТ с разными механизмами. Чтобы установить характер взаимосвязи между  $\Delta\sigma$  и режимом очагов необходимы дополнительные исследования, являющиеся задачей дальнейших работ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отработана методика расчета динамических параметров очагов землетрясений по данным станций сети KNET, у которых первичные сейсмические ряды являются записями скорости, а не смещения. Продемонстрировано, что учет стационарных поправок и искажений спектра из-за поглощения в среде (ограниченной добротности) позволяет получить оценки сейсмического момента, согласующиеся с СМТ. Получены значения падения напряжения и других динамических параметров для 14 землетрясений с энергетическими классами  $K = 11.5$ –13.6, которые произошли за 1998–2009 годы с. Построены фокальные

механизмы этих землетрясений. Проведен сравнительный анализ значений скалярного сейсмического момента из различных источников. Определено, что уровень сброшенных напряжений для событий такого класса может меняться от 1 до 75 бар. Величина сброшенных напряжений при одной и той же энергетической характеристике может меняться в зависимости от механизма очага землетрясения. Максимальный уровень падения напряжений достигается в зонах с режимом близгоризонтального сжатия. Полученные значения снимаемых напряжений можно использовать в методе МКА на 3 и 4 этапах реконструкции напряженного состояния (при определении величины эффективного внутреннего сцепления массивов горных пород).

Авторы выражают благодарность Кальметьевой З.А. за обсуждение вопросов о динамических параметрах очагов ЗЛТ, Мансурову А.Н. за программное обеспечение по расчету спектров и Брагину В.Д. за предоставление цифровых записей и каталога сейсмических событий.

Исследование частично поддержано по грантам РФФИ 12-05-00234, 11-05-98529 и Программой фундаментальных исследований Президиума РАН № 14

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. Теория и методы. М.: Мир. 1983. Т. 2. 880 с.
- Арефьев С.С. Эпицентральные сейсмологические исследования. М.: ИКЦ "Академкнига". 2003. 375 с.
- Аптекман Ж.Я., Белавина Ю.Ф., Захарова А.И. и др. Спектры Р-волн в задаче определения динамических параметров очагов землетрясений. Переход от станционного спектра к очаговому и расчет динамических параметров очага // Вулканология и сейсмология. 1989. № 2. С. 66–79.
- Горбунова И.В., Кальметьева З.А. Экспериментальные характеристики излучения очагов слабых землетрясений. Бишкек: Илим. 1988. 127 с.
- Земцова А.Г. Сейсмическая кода и динамические особенности землетрясений Киргизии. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Фрунзе: Институт сейсмологии. 1985. 164 с.
- Кальметьева З.А., Мельникова Т.А., Мусиенко Е.В., Юдахин Ф.Я. Модели очаговых зон сильных землетрясений. Типовые геолого-геофизические модели сейсмичных и асейсмичных районов. Бишкек: Илим. 1992. С. 124–13.
- Кальметьева З.А., Миколайчук А.В., Молдобеков Б.Д. и др. Атлас землетрясений Кыргызстана. Бишкек: ЦАИИЗ. 2009. 232 с.
- Ключевский А.В., Демьянович В.М. Динамические параметры очагов землетрясений Байкальской сейсмической зоны // Физика Земли. 2002. № 2. С. 55–66.
- Костров Б.В. Неустановившееся распространение трещин продольного сдвига // Прикладная математика и механика. 1966. Т. 30. Вып. 6. С. 1042–1049.
- Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука. 1975. 175 с.
- Костюк А.Д., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Сычева Н.А., Яги Ю. (Yagi). Деформация земной коры Северного Тянь-Шаня по данным очагов землетрясений и космической геодезии // Физика Земли. 2010. № 3. С. 52–65.
- Мансуров А.Н., Сычева Н.А. Программный пакет расчета динамических характеристик сейсмических событий для проведения комплексного анализа тектонических напряжений территории Северного Тянь-Шаня // Вестник КРСУ. 2011. Т. 11. № 11. С. 65–71.
- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность горных массивов. М.: Наука. 2007. 406 с.
- Ребецкий Ю.Л. Третий и четвертый этапы реконструкции напряжений в методе катакластического анализа сдвиговых разрывов // Геофизический журнал. 2009. Т. 31. № 2. С. 93–106.
- Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. Исследования по физике землетрясений. М.: Наука. 1976. С. 9–27.
- Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука. 1985. 408 с.
- СМТ решения. <http://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>
- Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Мухаммадиева В.А. Сейсмотектонические деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети КНЕТ) // Физика Земли. 2005. № 11. С. 62–78.
- Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Юнга С.Л., Макаров В.И. Сейсмотектонические деформации и новейшая тектоника Тянь-Шаня // Физика Земли. 2008. № 5. С. 3–15.
- Сычева Н.А., Богомолов Л.М., Сычев В.Н. Солнечные вспышки, вариации уровня сейсмического шума и сейсмический режим Северного Тянь-Шаня. Триггерные эффекты в геосистемах / Под ред. академика В.В. Адушкина и профессора Г.Г. Качаряна. Материалы Всероссийского семинара-совещания. г. Москва, 22–24 июня 2010 года. М.: Геос. С. 326–336.
- Сычева Н.А., Кальметьева З.А., Мансуров А.Н., Сычев В.Н. Методические особенности определения динамических параметров землетрясений по данным сейсмологической сети КНЕТ (Северный Тянь-Шань). "Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле". Третья тектонофизическая конференция. Мат. докл. конференции 8–12 октября 2012 г. 2012. Т. 2. С. 185–190.
- Чедия О.К. Морфоструктуры и новейший тектогенез Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим. 1986. 313 с.
- Ameri G., Oth A., Pilz M., Bindi D., Parolai S., Luzi L., Mucciarelli M., Cultreri G. Separation of source and site effects by generalized inversion technique using the aftershock recordings of the 2009 L'Aquila earthquake // Bull Earthquake Eng. doi: 10.1007/s10518-011-9248-4.
- Atkinson G.M., Boore D.M. Ground motion relation for eastern North America // Bull. Seism. Soc. Am. 1995. V. 85. P. 17–30.
- Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res. 1970. V. 75. P. 4997–5009.
- Brune J.N. Corrections // J. Geophys. Res. 1971. V. 76. P. 5002.
- Dziewonski A.M., Chou T.A., Woodhouse J.H. Determination of earthquake source parameters from waveform data

- for studies of regional and global seismicity // *J. Geophys. Res.* № 86. 1981. P. 2825–2852.
- Lienert Barry R., Berg E., Frazer Neil L.* Hypocenter: an earthquake location method using centered, scaled, and adaptively damped least squares // *Bull. Seism. Soc. Am.* June 1986. V. 76. № 3. P. 771–783.
- Madariaga R.* High frequency radiation from dynamic earthquake fault models // *Ann. Geophys.* 1983. V. L. P. 17–23.
- Nakamura Y.* A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, QR Railw // *Tech. Res. Inst.* 30. 1989. P. 25–33.
- Parolai S., Richwalski Sandra M., Milkereit C., Borman P.* Assessment of the stability of H/V spectral ratio from ambient noise and comparison with earthquake data in the Cologne area (Germany) // *Tectonophysics.* V. 390. 2004. P. 57–73.
- Oth A., Bindi D., Parolai S., Giacomo D.* Spectral analysis of K-NET and KiK-net data in Japan, Part II: On attenuation characteristics, source spectra, and site response of borehole and surface stations // *Bull. Seism. Soc. Am.* April 2011. V. 101. № 2. P. 667–687. doi: 10.1785/0120100135.
- Oth A., Parolai S., Bindi D., Wenz F.* Source spectra and site response from *S*-waves of intermediate-depth Vrancea, Romania, earthquakes // *Bull. Seism. Soc. Am.* February 2009. V. 99. № 1. P. 235–254. doi: 10.1785/0120080005.
- Parolai S., Bindi D., Durukal E., Grosser H., Milkereit C.* Source parameters and seismic moment–magnitude scaling for Northwestern Turkey // *Bull. Seism. Soc. Am.* April 2007. V. 97. № 2. P. 655–660. doi: 10.1785/0120060180.
- Reasenber P.A., Oppenheimer D.* FPFIT, FPLOT and FPAGE: 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. № 85–739.
- Rebetsky Yu. L., Kuchai O.A., Sycheva N.A., Tatevossian R.A.* Development of inversion methods on fault slip data stress state in orogenes of Central Asia // *Tectonophysics.* 2012. V. 581. P. 114–131.
- Roecker S.W., Sabitova T.M., Vinnik L.P., Burmakov Y.A., Golvanov M.I., Mamatkanova R., Munirova L.* Three-dimensional elastic wave velocity structure of the Western and Central Tien-Shan // *Journal of Geophysical Research.* 1993. V. 98. № B9. P. 15779–15795.
- Sipkin S.A.* USGS Moment Tensor Software and Catalog. 2001.
- Yagi Y.* Determination of Focal Mechanism by Moment Tensor Inversion. Tsukuba: IISEE Lecture Note. 2004. 51 p.