

УДК 550.34+539.3+551.24

СЕЙМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ (ПО ДАННЫМ ОПРЕДЕЛЕНИЙ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА БАЗЕ ЦИФРОВОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СЕТИ KNET)

© 2005 г. Н. А. Сычева¹, С. Л. Юнга², Л. М. Богомолов¹, В. А. Мухамадеева¹

¹Научная станция РАН, г. Бишкек

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 20.05.2005 г.

По данным региональной сейсмической сети KNET, расположенной на Бишкекском геодинамическом полигоне, проведены исследования фокальных механизмов очагов и сеймотектонических деформаций Северного Тянь-Шаня. Каталог фокальных механизмов очагов землетрясений, полученный при обработке сейсмологических данных сети KNET, включил в себя решения более 700 сейсмических событий слабой и средней силы, что позволило выявить статистические особенности ориентации главных осей фокальных механизмов. На базе представительного материала по механизмам очагов землетрясений проведен расчет сеймотектонических деформаций (СТД) верхней толщи земной коры для территории, ограниченной координатами краевых станций сети KNET. При расчетах СТД используется специально подобранная региональная весовая функция, по которой определяется вклад единичного механизма каждого очага. При построении карт СТД применен современный подход к типизации сеймотектонической деформации, предусматривающий выделение одиннадцати типичных деформационных обстановок, в том числе четырех основных, двух предельных и пяти переходных. Оценена интенсивность сеймотектонического деформационного процесса в Северном Тянь-Шане.

Ключевые слова: землетрясение, плоскость разрыва, фокальный механизм, главные оси, сеймотектоническая деформация, вид напряженно – деформированного состояния.

ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена исследованию особенностей механизмов очагов землетрясений и сеймотектонического деформационного процесса на территории Северного Тянь-Шаня. Данные по параметрам механизмов очагов землетрясений составляют едва ли не основную часть информации о напряженно-деформированном состоянии земных недр на глубинах, недоступных для непосредственного изучения [Ризниченко, 1985; Беленович, 1983; Беленович и др., 1988; 1993; Тычков и др., 2003]. Исследованию деформационных процессов земной коры Тянь-Шаня на основе механизмов очагов были посвящены работы [Беленович, 1983; Беленович и др., 1988; 1993; Лопатина, 1975; Лопатина и др., 1978; Юдахин и др., 1989; Джанузаков и др., 1997]. В настоящее время анализ фокальных механизмов и сеймотектонических деформаций коры Северного Тянь-Шаня сохраняет актуальность, поскольку регион является зоной интенсивных современных деформаций, детальное изучение которых служит основой оценки природных и техногенных опасностей, связанных с геологическими и геодинамическими процесса-

ми. Развитие региональной сети сейсмических станций KNET, внедрение унифицированных методов обработки данных наблюдений открывают все новые возможности для исследования как собственно сеймотектонических деформаций, так и взаимосвязи между сейсмичностью и современной геодинамикой региона. При этом становится возможным использование данных по фокальным механизмам очагов многочисленных землетрясений и проведение на базе их статистического анализа исследования сеймотектонического деформирования сейсмоактивных объемов земной коры. В то же время развитие представлений о фундаментальной роли неоднородности и гетерогенности геологической среды, ее иерархически-блочном строении и проявлениях эффектов самоорганизации (self-organizing criticality – SOC), указывает на важность получения усредненной картины сеймотектонического деформационного процесса. Фактически эта задача решается при переходе от вычисления отдельных фокальных механизмов к расчету СТД по определенной выборке сейсмических событий [Юнга, 1990]. Накопление данных о механизмах землетрясений на исследуемой территории не только дает возмож-

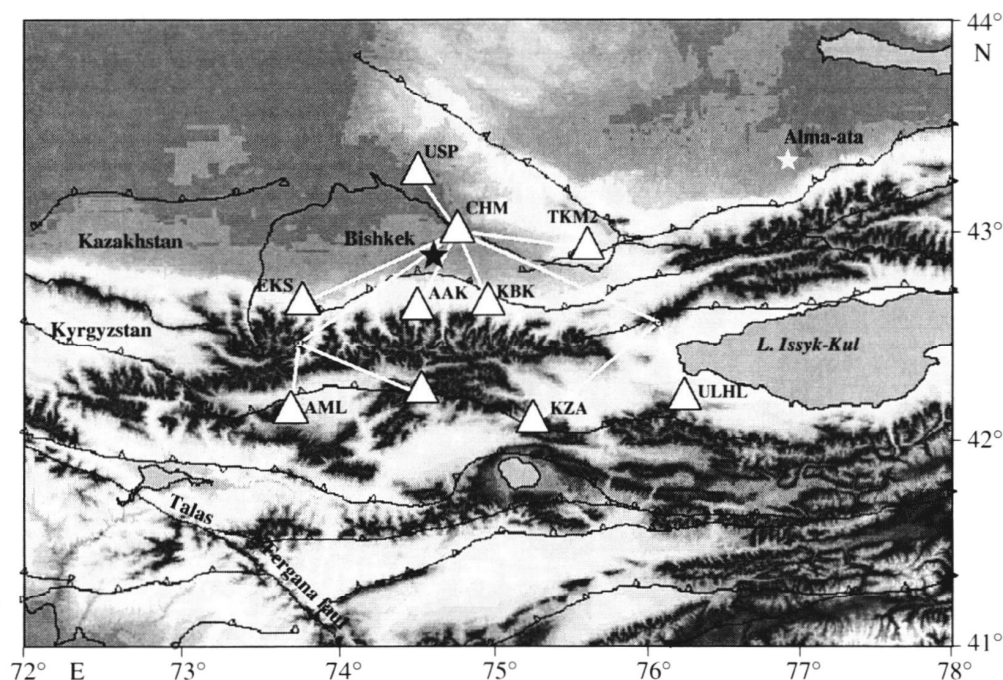


Рис. 1. Киргизская сейсмическая сеть KNET: Δ – местоположение станций.

ность все более подробного описания сейсмотектонического процесса в терминах СТД, но и позволяет решить принципиальный вопрос о классификации деформационных обстановок.

С другой стороны, методами космической геодезии (GPS) надежно установлено продолжающееся в настоящее время меридиональное сжатие и субширотное растяжение Тянь-Шаня с некоторым преобладанием сжатия [Зубович и др., 2005]. Весьма существенным представляются открывающиеся возможности сопоставления деформационных картин, полученных разными методами.

ДАННЫЕ И ИХ ОБРАБОТКА

В основу исследований легли данные, полученные сейсмологической сетью KNET, которая включает в себя 10 станций, расположенных на севере Киргизии (рис. 1).

В результате эксплуатации KNET было установлено, что данная система позволяет хорошо регистрировать не только локальную сейсмичность, но и удаленные большие сейсмические события, а также промышленные взрывы. Результаты обработки удаленных сейсмических событий, зарегистрированных этой системой, хорошо согласуются с данными мировой сейсмической сети. В этом смысле сейсмическая сеть KNET является уникальным инструментом для проведения сейсмологических исследований. Данные KNET о локальной сейсмичности являются представи-

тельными для Центрального сегмента Северо-Тянь-Шаньской сейсмогенерирующей зоны как области сочленения Тянь-Шаньского орогена и Казахской плиты [Сычева и др., 2003; Сычева и др., 2004].

Для определения параметров гипоцентра используются программа HYPOCENTER [Lienert, 1986] и скоростная модель литосферы Стива Реккера [Реккер, 2001]. Погрешность в определении времен вступления фронтов P -волн в среднем составляет 0.2–0.3 с, что соответствует неопределенности координат гипоцентров 1200–1800 м.

За все время работы сетью KNET зарегистрировано более 4000 локальных событий (рис. 2). При анализе графика повторяемости представительными оказались выборки, начиная с событий 7 класса.

Одним из условий надежного определения фокального механизма сейсмического события является полное окружение эпицентра пунктами наблюдений. По этой причине, в качестве исследуемой территории была выбрана область площадью $\sim 100 \times 300$ км, ограниченная координатами расположения крайних станций сети: 42° – 43° по широте и 73.75° – 76° по долготе, в пределах которой в 1994–2003 гг. произошло около 1400 сейсмических событий.

Подавляющий объем накопленной в современной сейсмологии экспериментальной информации по механизмам очагов землетрясений получен на основе данных по полярности вступле-

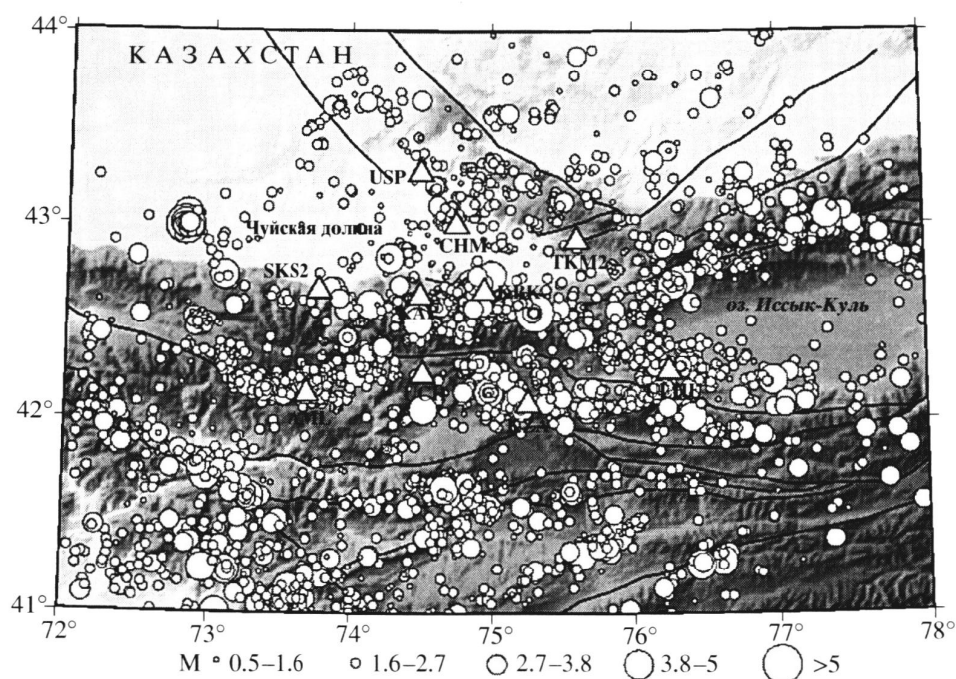


Рис. 2. Карта локальных сейсмических событий, зарегистрированных сетью KNET в 1994–2003 гг.

ний сейсмических волн. И в настоящее время, в условиях оснащенности все большего числа сейсмических станций цифровой аппаратурой, этот источник продолжает оставаться важнейшим. Определения основных параметров механизма очага выполнены по методике А.В. Введенской [Введенская, 1969].

Расчет фокальных механизмов очагов проводился с использованием программы FPFIT П. Ресенберга и Д. Опенхеймера [Reasenberg и др., 1985]. Для расчета фокальных механизмов очагов использовались лишь те события, которые были зарегистрированы семью и более станциями, так что в итоге решения были получены для 765 событий из 1400. Разброс в определении положения нодальных плоскостей в среднем составил по азимуту простирания 10° , углу падения и скольжения примерно 15° – 20° .

В результате проведенных расчетов был получен каталог фокальных механизмов, который кроме параметров гипоцентра включает в себя параметры, характеризующие положение нодальных плоскостей и главных осей напряжений: азимут и угол погружения.

Из этого каталога была организована “качественная” выборка (289 событий), которая включила в себя только те события, по которым решения фокальных механизмов получены по 9–10 станциям. По этой выборке в дальнейшем проводился

контроль тех результатов, которые были получены по генеральной совокупности (765 событий).

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Статистический метод, используемый при расчете сейсмотектонических деформаций, предполагает большой массив данных по фокальным механизмам, индивидуальный анализ которых достаточно трудоемок. Для определения некоторых закономерностей в решениях фокальных механизмов очагов использовался статистический подход при анализе азимутов и углов погружения осей сжатия и растяжения.

Для того чтобы составить первые представления о полученных решениях фокальных механизмов, была построена карта фокальных механизмов. Отмечено, что в рассматриваемом регионе формируются, в основном, три группы очагов землетрясений, различающихся характером происходящих в них подвижек: взбросы, сбросы и взбросо-сдвиги.

Анализ карт проекций осей сжатия и растяжения на горизонтальную плоскость (рис. 3) позволил выявить определенную тенденцию в направлениях главных осей: значительная часть осей сжатия (P) имеет северо-северо-западную направ-

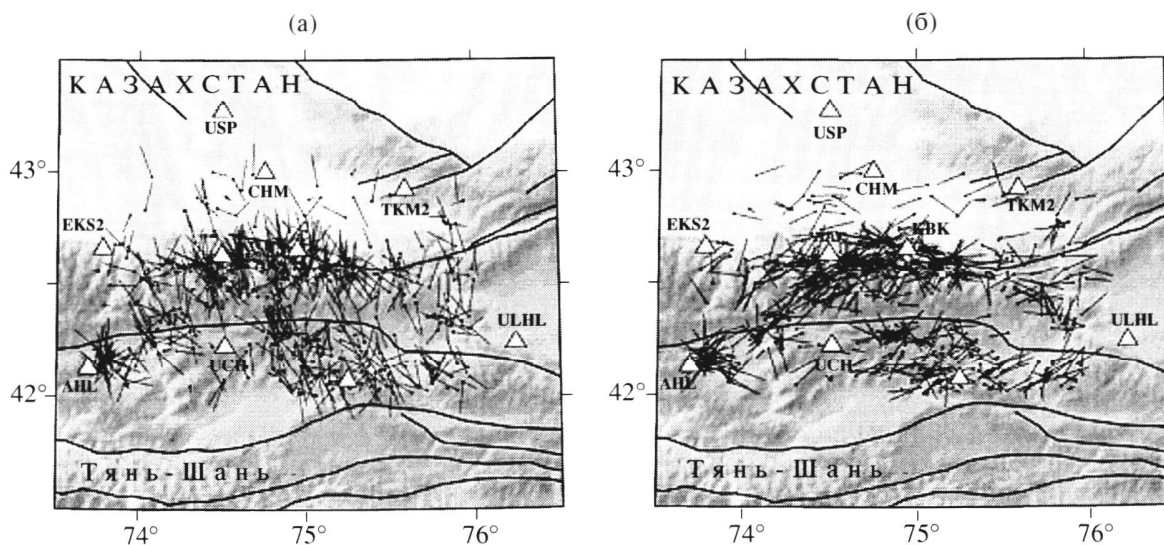


Рис. 3. Проекция главных осей напряжений на горизонтальную поверхность: оси P (а); оси T (б).

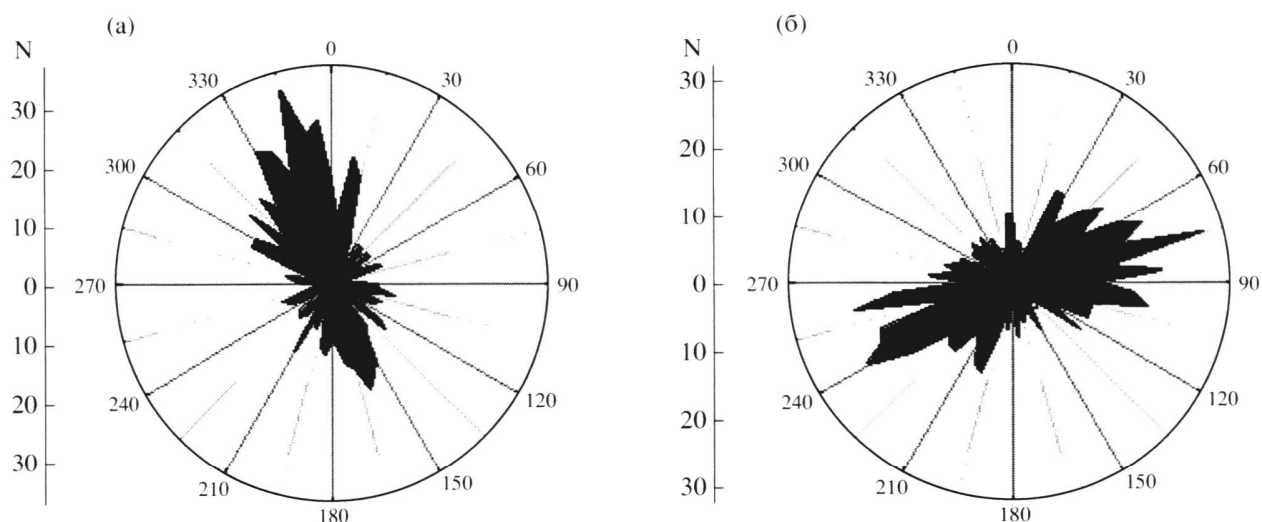


Рис. 4. Диаграммы распределения азимутов углов осей P (а) и T (б) для всего сейсмогенерирующего слоя (0–30 км для Северного Тянь-Шаня).

ленность (рис. 3а), и большая часть осей растяжения (T) – восточно-северо-восточную (рис. 3б).

Для подтверждения визуального наблюдения были построены диаграммы распределения азимутов осей P и T (рис. 4), где каждому значению азимута, который меняется от 0° до 360° с шагом 5° , отвечает количество событий (N), имеющих соответствующее значение азимута в этом диапазоне. Полученные результаты позволили выделить те направления, которые визуальным образом наблюдаются на рис. 3: для оси P преобладающим направлением является северо-северо-западное, а для оси T – восточно-северо-восточное. Аналогичные направления были определены и по “качественной” вы-

борке, что можно считать свидетельством устойчивости полученного результата.

Многие исследователи Тянь-Шаня [Макаров и др., 1982; Юдахин и др., 1991; Булин, 1974; Павленкова, 1973] отмечают тектоническую расслоенность земной коры и указывают на то, что, обладая различными физическими и реологическими свойствами, слои земной коры Тянь-Шаня по-разному реагируют на испытываемое ими тектоническое напряжение. И было логичным исследовать изменение азимутов главных осей напряжений в зависимости от глубины расположения очагов сейсмических событий (рис. 5). Диапазон исследуемых глубин был выбран близко к тем

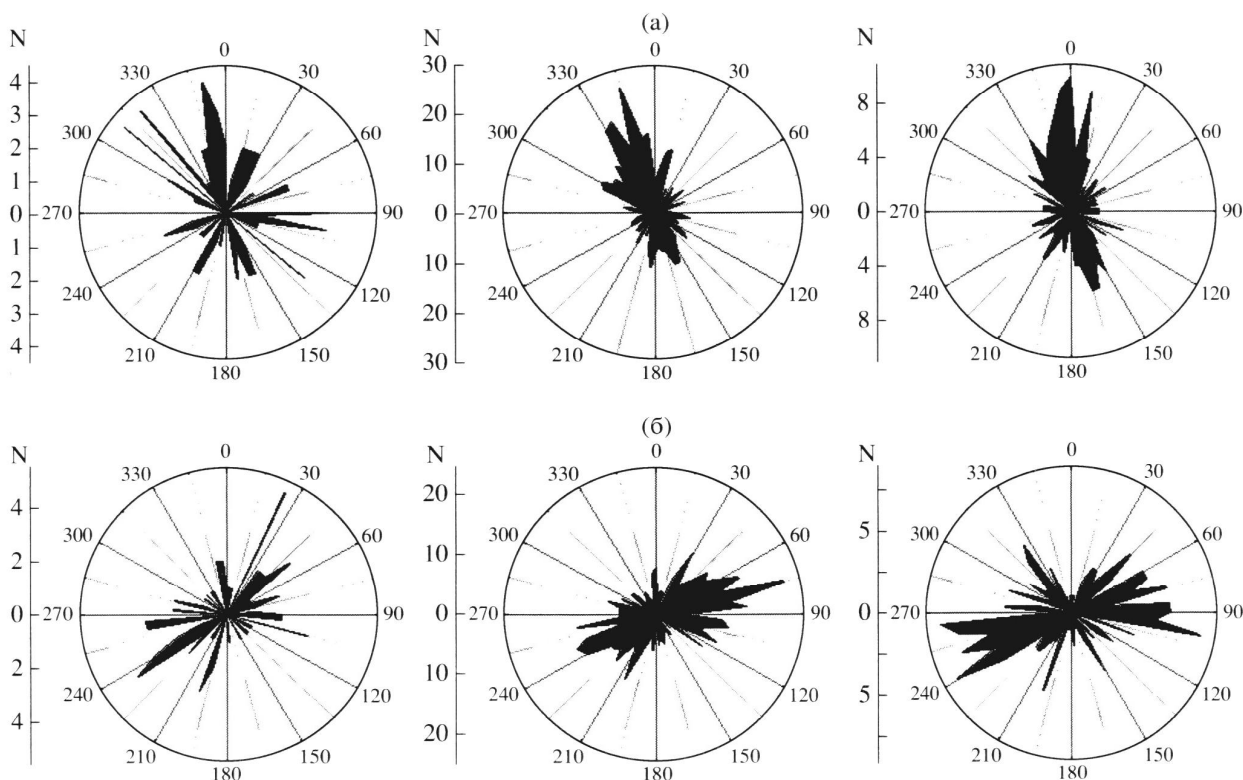


Рис. 5. Диаграммы распределения азимутов осей P (а) и T (б) в зависимости от глубины. Слева направо: 1 колонка: 0–5 км; 2 колонка: 5–15 км; 3 колонка: 15–25 км.

глубинам (0–5 км, 5–15 км, 15–25 км), которые заложены в скоростной модели земной коры, используемой при расчете параметров гипоцентра. Было отмечено, что для верхнего слоя земной коры не проявляется какая-либо закономерность в распределении азимутов главных осей напряжений, что можно связать с раздробленностью исследуемого региона разрывными нарушениями и проявлением локальных особенностей тектонических процессов.

На глубинах 5–15 км отчетливо проявляется северо-северо-западное направление для оси сжатия и восточно-северо-восточное – для оси растяжения. С увеличением глубины от 15 до 25 км направления, определенные выше, меняются таким образом, что ось сжатия больше характеризуется северным направлением, а направление оси растяжения имеет несколько максимумов, которые меняются от северо-восточного направления до восточного. Это может свидетельствовать как об изменении свойств земной коры на этой глубине, так и об изменении характера напряжений.

Для анализа распределения направлений главных осей во времени были использованы данные за 1999–2003 годы, по каждому из которых имеется примерно одинаковое количество событий (от

90 до 110 событий). При этом было отмечено, что преимущественные направления для главных осей напряжений, определенные выше, проявляются для всех рассматриваемых периодов, но в разные периоды времени эти направления могут меняться от северо-западного до северного – для оси P и от северо-восточного до восточного – для оси T . По всей видимости, чтобы зарегистрировать устойчивые изменения во времени, необходим более длительный период наблюдений.

Отметив проявление преимущественного направления азимутов осей P и T как по глубине, так и во времени, было проанализировано распределение азимутов этих осей по площади. Для этого вся территория была разбита на четыре области, и по каждой из них были получены распределения азимутов осей сжатия. Оказалось, что во всех областях наблюдается преобладающее северо-северо-западное направление.

Исследованию деформационных процессов земной коры Северного Тянь-Шаня, на основе механизмов очагов посвящены работы [Беленович, 1983; Беленович и др., 1988; 1993; Юнга, 1990], в которых так же отмечается северо-северо-западное направление для оси сжатия и восточно-северо-восточное – для оси растяжения. Аналогич-

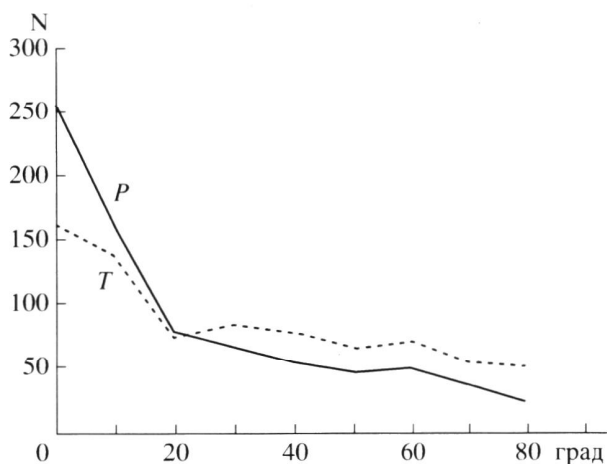


Рис. 6. Распределение углов погружения осей P и T .

ные направления для Северного Тянь-Шаня были определены и при анализе трещиноватости горных пород в работе [Крестников и др., 1987].

График распределения углов наклона к горизонту (угол погружения) осей главных напряжений представлен на рис. 6. Можно отметить, что ось сжатия для большей части событий близгоризонтальна (0° – 20°), и меньшее число событий имеет близгоризонтальную ось растяжения, но для этой оси проявляются максимумы на 30° и 60° (в этом случае одна из нодальных плоскостей близгоризонтальна, другая близвертикальна). На всех исследуемых глубинах, в основном, наблюдается та же зависимость, за исключением глубины 0–5 км, где проявляются некоторые отличительные особенности. Согласно графику, на глубинах 0–5 км

максимум приходится на события, ось сжатия которых имеет с горизонтальной плоскостью угол в 30° .

Особый интерес представляют события взбросового и сбросового типов. Для таких событий были построены карты распределения их по площади, и оказалось, что на исследуемой территории встречаются события и взбросового (рис. 7а), и сбросового (рис. 8а) типов, причем сбросы встречаются реже и как бы “разбросаны” по рассматриваемой территории; большая их часть приходится на предгорья Киргизского хребта, и события такого типа не характерны для района Джумгальского хребта. Взбросы концентрируются в более узких областях и располагаются вдоль Киргизского и Джумгальского хребтов. Диаграмма распределения азимутов этих осей сжатия (рис. 7б) имеет два преобладающих направления: одно – северное, другое – северо-северо-западное, а для сбросов ось растяжения (рис. 8б) имеет несколько направлений, которые меняются от северо-восточного до юго-восточного.

ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Основным фактическим материалом для расчета СТД послужили данные по механизмам очагов землетрясений, полученные на предыдущем этапе исследований.

При изучении очаговых механизмов и СТД на основе статистического подхода принята во внимание следующая специфика деформаций, связанных с землетрясениями. Возникая в некото-

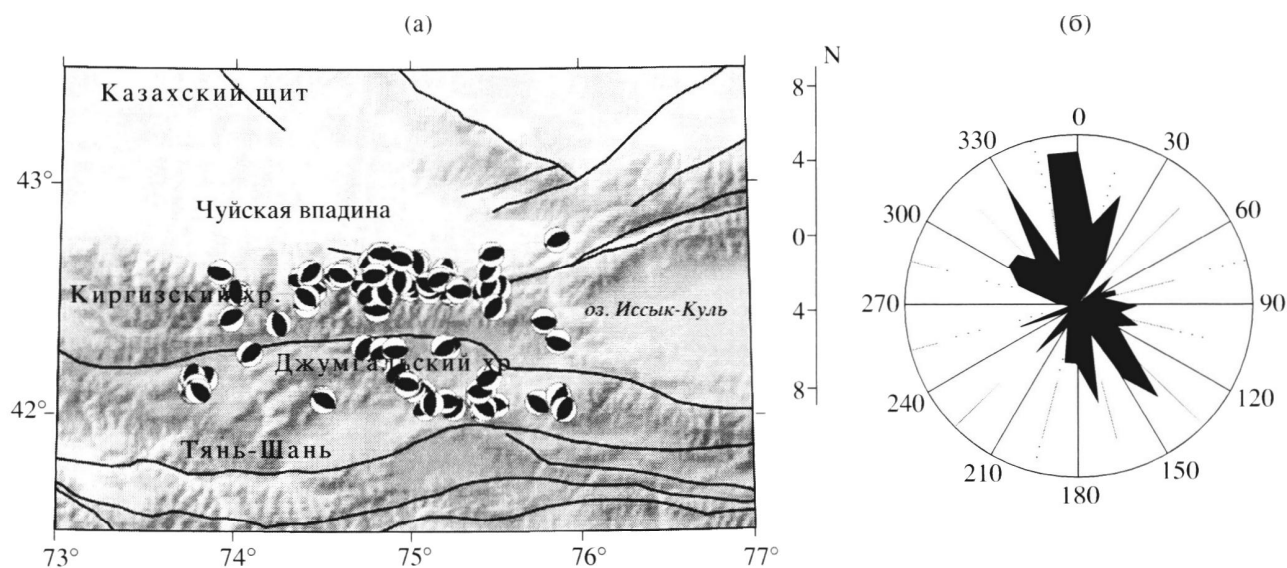


Рис. 7. Карта событий взбросового типа (а) и диаграмма распределения азимутов осей P для этих событий (б).

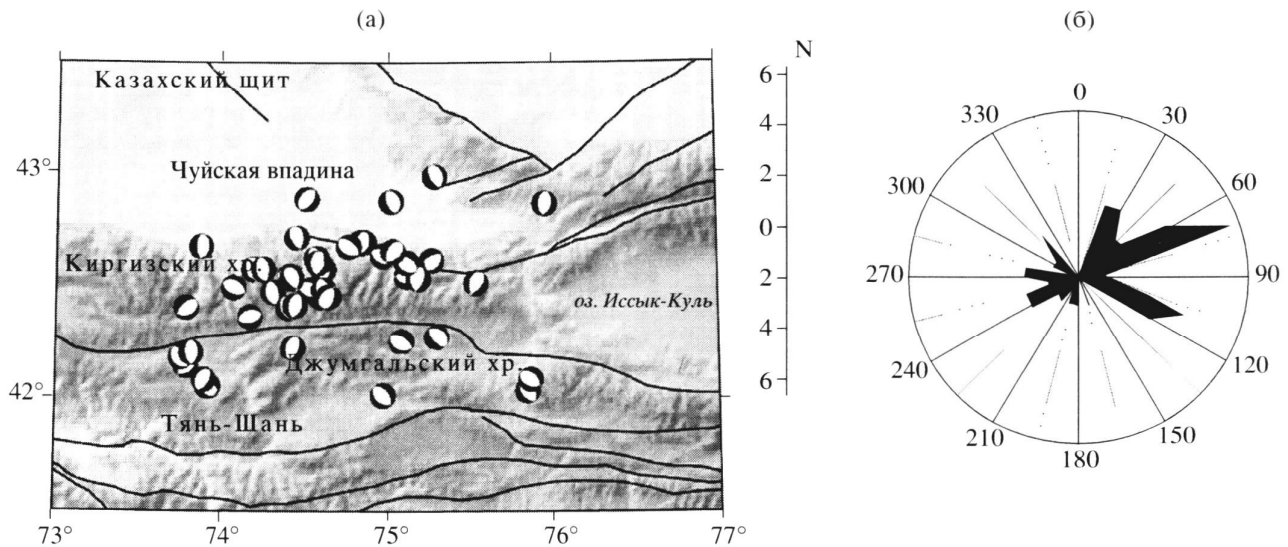


Рис. 8. Карта событий сбросового типа (а) и диаграмма распределения азимутов осей T для этих событий (б).

ром объеме земной коры, землетрясения несут информацию о необратимых сейсмотектонических деформаций, связанных с общим числом подвижек в очагах [Костров, 1975]. Поскольку параметры фокального механизма связаны с единичным (нормированным) направляющим тензором сейсмического момента, то для отражения кинематики деформационного процесса по совокупным данным о механизмах очагов землетрясений используется понятие сейсмотектонической деформации, рассматриваемой в виде суммы тензоров сейсмических моментов землетрясений, деленной на модуль сдвига и объем [Юнга, 1979]. Вклад каждого сейсмического события в общее сейсмотектоническое деформирование определяется его сейсмическим моментом. К рассматриваемым параметрам СТД относятся главные оси сжатия P , растяжения T , коэффициент Лодэ-Надаи, а также интенсивность среднего механизма, отражающая степень соответствия результирующего тензора и тензора индивидуального механизма. Возможно также и другое параметрическое представление, открывающее возможность отнесения данной деформационной обстановки к тому или иному типу или режиму [Юнга, 1991; 1997].

Выражение для тензора скорости сейсмотектонической деформации $\langle \epsilon_{ij} \rangle$ [Юнга, 1990] определяется суммой тензоров сейсмических моментов, нормированных на время, объем и модуль сдвига:

$$\langle \epsilon_{ij} \rangle = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)} m_{ij}^{(\alpha)}, \quad (1)$$

где μ – модуль сдвига; V – элементарный объем; T – период исследования; $M_0^{(\alpha)}$ – сейсмический мо-

мент землетрясения с номером (α) ($\alpha = 1, 2, \dots, N$); $m_{ij}^{(\alpha)}$ – направляющий тензор механизма.

Используя предположение о подобии СТД на разных масштабных уровнях это выражение можно преобразовать к виду [Юнга, 1990]

$$\langle \epsilon_{ij} \rangle = I_{\Sigma} \sum_{\alpha=1}^N w^{(\alpha)} m_{ij}^{(\alpha)} / \sum_{\alpha=1}^N w^{(\alpha)}, \quad (2)$$

где $w = w^{(\alpha)}$ – весовая функция, и I_{Σ} определяется выражением

$$I_{\Sigma} = \frac{1}{\mu VT} \sum_{\alpha=1}^N M_0^{(\alpha)}. \quad (3)$$

Весовая функция. Выбор весовой функции в процедуре расчетов матриц среднего механизма является весьма существенным моментом для расчетов СТД. При использовании значения сейсмического момента в качестве весового коэффициента процедура становится в вычислительном смысле неустойчивой [Юнга, 1990]. Вместе с тем, гипотеза о подобии сейсмотектонического деформационного процесса в достаточно широком диапазоне магнитуд позволяет формально использовать любую произвольно выбранную весовую функцию, обеспечивающую устойчивость результатов расчетов.

Методика определения весовой функции на основе анализа мировых данных по фокальным механизмам из каталога СМТ (каталог Гарвардского университета) была предложена в работе [Юнга, 1999]. Позже эта методика применялась для определения региональной весовой функции

[Сычева и др., 2004]. Получена весовая функция вида:

$$w = (M - M_c) / (M_{\max} - M_c) = 0.147(M - 0.5), \quad (4)$$

где M – магнитуа сейсмического события, для которой определяется вес w ; $M_{\max} = 7.3$ – магнитуа Суусамырского землетрясения – последнего сильного землетрясения на исследуемой территории, рассматриваемого в качестве максимального события, которому приписывается единичный вес $w = 1$; $M_c = 0.5$ – некоторая условная магнитуа, при которой процесс становится хаотичным, так что событиям с $M \leq M_c$ приписывается нулевой вес $w = 0$. Поясним вкратце процедуру выбора магнитуды M_c . Для оценки параметров весовой функции проводились расчеты упорядоченности фокальных механизмов в различных диапазонах магнитуд. Оказалось, что упорядоченность примерно линейно уменьшается в сторону слабых магнитуд, что позволяет найти магнитуа, отвечающую нулевой упорядоченности, т.е. определить магнитуа M_c . Эта региональная весовая функция использовалась нами при расчете СТД на Северном Тянь-Шане и, по мере накопления новых данных по фокальным механизмам, может уточняться.

В целом, расчеты компонент тензора среднего механизма, значений коэффициента Лодэ-Надаи и скорости сейсмотектонической деформации проводились по известной методике [Юнга, 1979; 1991]. В качестве подготовительной операции проведено разбиение сейсмоактивной территории Северного Тянь-Шаня на частично перекрывающиеся круговые подобласти с центрами в заданных определенным образом узловых точках. С этой целью использован набор узловых точек GPS-наблюдений. Анализ осуществлялся в той или иной мере перекрывающихся круговых окрестностях диаметром 1.3° . Расчеты СТД проводились в пределах литосферного слоя мощностью 30 км в указанных круговых окрестностях каждой узловой точки, относящейся к сформированному набору. Результаты расчета компонент среднего механизма и количество событий по каждой узловой точке представлены в табл. 1.

Среднегодовая скорость сейсмотектонической деформации или интенсивность СТД. В данной работе двумя способами реализованы вычисления абсолютной величины среднегодовой скорости сейсмотектонической деформации, результаты которых согласуются друг с другом.

Для того чтобы найти величину интенсивности I_Σ тензора $\langle \epsilon_{ij} \rangle$ можно выполнить непосредственное суммирование сейсмических моментов или же, наподобие [Ризниченко, 1976], прибегнуть к оценке I_Σ на основе закона повторяемости землетрясений. Использовались оба эти подхода, которые дали в целом близкие результаты. Оста-

новимся подробнее лишь на результатах, полученных первым способом.

Как было отмечено выше, исследуемая территория ограничена координатами краевых станций сети KNET. Для более надежной оценки интенсивности использовались все события, произошедшие на исследуемой территории за 1994–2003 гг. (рис. 1). Известное эмпирическое выражение связывает скалярный сейсмический момент M_0 в единицах дин см с магнитудой землетрясения M : $\lg(M_0) = 15.4 + 1.6M$ [Ризниченко, 1976]. Для расчета скорости СТД с использованием этой формулы была определена сумма сейсмических моментов всех землетрясений, которые попали на исследуемую территорию за 1994–2003 годы. Толщина сейсмоактивного слоя h , в соответствии с глубинами очагов на территории Киргизии, принята равной 30 км, модуль сдвига $\mu = 3 \times 10^{11}$ дин/см² [Ризниченко и др., 1976]. Подставляя эти значения в формулу (3), получаем оценочное значение $I_\Sigma \sim 6 \times 10^{-10}$ год⁻¹.

Расчет интенсивности для каждой узловой точки (область вокруг узловой точки с радиусом 0.5°) позволил отметить, что хотя исследуемая территория занимает небольшую площадь, значение интенсивности меняется от 0.8×10^{-10} в западной ее части до 7.5×10^{-10} в восточной (табл. 1). По данным GPS, в восточной части этой территории также выделена область, имеющая повышенные значения поля среднегодовых горизонтальных деформаций поверхности земной коры [Зубович и др., 2001].

Средний механизм. В данной работе получены нодальные линии среднего механизма и оси P , T для всех узловых точек, использованных при расчетах СТД. Анализ осей сжатия средних механизмов показал, что ориентация сжатия имеет северо-северо-западное направление, которое и было определено как преобладающее при анализе фокальных механизмов очагов. На рис. 9 и 10 представлены два средних механизма. В первом случае средний механизм получен для Суусамырского землетрясения (само землетрясение и его афтершоки, 1992 г.) [Юнга и др., 2000], во втором – по данным сети KNET для элементарной области в районе Суусамырской впадины (события 1994–2003 гг.). Можно отметить, что в первом случае ось сжатия имеет направление, близкое к северному, а во втором оно близко к северо-северо-западному, но в целом оба эти результата удовлетворительно согласуются и не противоречат друг другу. Это также можно объяснить через гипотезу самоподобия, которая в данном случае сводится к предположению, что суммарные механизмы землетрясений в различных интервалах магнитуд в пределах погрешности вычислений примерно одинаково отражают характер СТД.

Таблица 1. Данные вычисления компонент среднего механизма, среднегодовой скорости СТД и угла напряженного состояния для каждой узловой точки

№ точки	Широта, °S	Долгота, °E	N	ZZ	YZ	ZX	YY	XY	$I_{\Sigma} (10^{-10})$	ω	ρ	μ_M
1	42.70	74.77	421	0.268	-0.197	0.065	-0.682	0.310	7.54	69.74	17.17	0.69
2	42.35	75.83	161	0.440	-0.071	0.025	-0.670	0.393	6.78	57.45	6.08	0.84
3	42.82	75.79	104	0.352	-0.009	0.038	-0.779	0.265	6.55	65.15	3.05	0.85
4	42.75	75.72	144	0.387	-0.023	-0.001	-0.770	0.254	6.55	61.96	1.82	0.96
5	42.96	75.65	78	0.274	-0.017	0.009	-0.752	0.282	6.11	70.69	1.52	0.64
6	42.11	75.64	178	0.457	-0.039	0.005	-0.670	0.392	0.47	56.17	3.18	0.80
7	42.30	75.44	346	0.519	-0.073	0.065	-0.727	0.265	6.34	50.06	7.94	0.60
8	42.26	75.15	405	0.485	-0.108	0.038	-0.732	0.262	6.51	52.90	9.32	0.73
9	42.09	75.13	249	0.548	-0.088	0.019	-0.710	0.277	7.09	47.43	7.31	0.53
10	42.35	75.08	464	0.370	-0.122	0.073	-0.725	0.294	6.82	62.44	11.58	0.86
11	42.62	75.05	443	0.326	-0.164	0.052	-0.719	0.279	6.72	65.62	14.11	0.81
12	42.22	75.00	436	0.392	-0.129	0.059	-0.722	0.294	7.37	60.58	11.58	0.92
13	42.06	74.79	199	0.350	-0.124	0.027	-0.642	0.412	1.25	64.02	10.40	0.84
14	42.04	74.55	204	0.196	-0.124	0.021	-0.583	0.464	1.98	75.80	10.26	0.45
15	42.30	74.38	417	0.186	-0.188	0.065	-0.569	0.454	2.72	76.24	16.39	0.50
16	42.62	74.22	321	0.006	-0.173	0.073	-0.471	0.494	1.92	89.59	15.39	0.11
17	42.05	74.15	149	0.099	-0.057	0.026	-0.554	0.483	1.58	83.02	5.09	0.22
18	42.20	74.07	239	0.005	-0.199	0.039	-0.397	0.551	2.75	89.63	16.71	0.11
19	42.64	73.90	215	-0.048	-0.150	0.070	-0.394	0.544	1.86	93.87	14.19	-0.01
20	42.32	73.82	181	-0.031	-0.068	0.080	-0.423	0.545	1.67	92.79	9.57	-0.04
21	42.42	73.80	210	0.079	-0.148	0.031	-0.472	0.534	1.68	84.75	13.07	0.22
22	42.17	73.76	134	0.117	-0.126	0.046	-0.474	0.547	0.83	81.62	10.94	0.29
23	42.21	73.56	115	0.229	-0.139	-0.054	-0.516	0.526	0.84	74.24	13.22	0.45
24	42-43	73.75-76	1400	Для всей исследуемой территории					5.42	-	-	-

Картирование результатов, схема классификации режимов СТД. Для классификации режимов сейсмотектонической деформации нами применена разработанная в последние годы схема классификации, основанная на их параметризации через систему угловых параметров [Юнга, 1990; 1997], обеспечивающую изометрическое отображение тензорных объектов на сферу. Схема классификации, а также используемая при картировании СТД-система обозначений приведены далее на рис. 11. На схеме выделяются четыре основных режима: сжатия Т (от англ. Thrust fault), растяжения N (от англ. Normal fault), сдвиговый S (от англ. Strike-slip fault), перерезывающий или вертикальный взрез/срез V (от англ. Vertical fault); два режима могут характеризоваться как предельные: двустороннего сжатия ТТ (формируется как бы двумя разрывами типа взбросов – Thrust fault) или растяжения NN (формируется как бы двумя разрывами типа сбросов – Normal fault); одна деформационная обстановка, отвечающая режиму косого сдвига О (от англ. Oblique fault);

четыре других переходных режима – два переходных от вертикального режима к обстановке сжатия TV или растяжения NV (англ. undertensional) и два переходных режима от сдвига к сжатию ST (в английской терминологии – transpressional) или растяжению SN (в английской терминологии – transtensional). Здесь основные режимы выделены одним символом, предельные – двумя повторяющимися, а переходные – двумя неповторяющимися.

С учетом свойства изометричности алгоритм выбора режима сейсмотектонической деформации является очевидным. Для каждой рассчитанной средней матрицы определяются четыре независимых угловых параметра ρ , ω , ϕ , ψ . Затем для классификации используются только два из них – угол вида напряженного состояния ω и дополнительный параметр ρ .

Режимы определяются следующими значениями этих параметров (табл. 2).

В табл. 1 представлены значения рассчитанного угла вида напряженного состояния ω , получен-

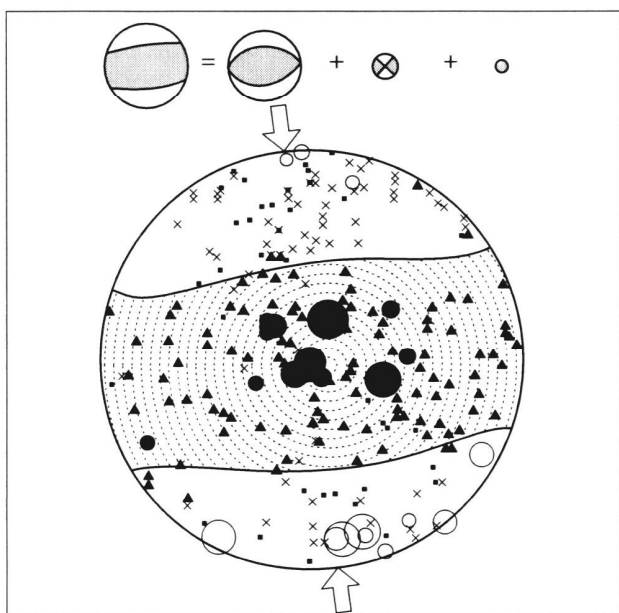


Рис. 9. Нодальные линии среднего механизма и оси P , T фокальных механизмов в окрестности очага Суусамырского землетрясения (по [Юнга, 2000]).

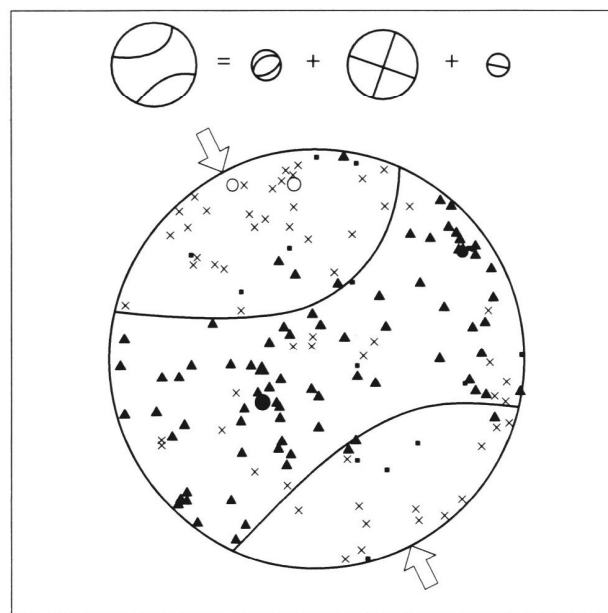


Рис. 10. Нодальные линии среднего механизма и оси P , T фокальных механизмов в районе Суусамырской впадины по данным KNET за 1994–2003 гг.

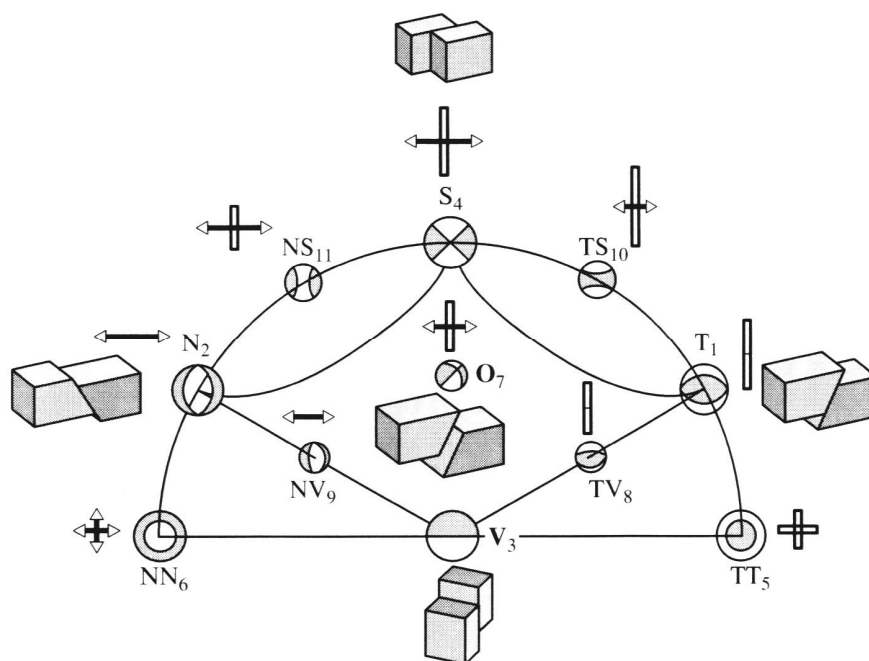


Рис. 11. Классификации режимов СТД по [Юнга, 1997].

ные для каждой узловой точки. Можно отметить, что более низкие значения этого параметра характерны для восточной части исследуемой территории и минимальное значение (близко к режиму Trust – сжатие) отмечается на юго-востоке исследуемой территории.

Согласно схеме, для исследуемой территории характерны два режима деформации: для западной части – сдвиговый режим, для восточной – переходный режим от сдвига к сжатию (режим транспрессии) (рис. 12). При этом оси сжатия средних механизмов имеют северо-северо-западное на-

Таблица 2. Параметры режимов сейсмотектонической деформации в зависимости от ω и ρ

№	Название	Режим СТД	ω , ° (угол вида напря- женного состояния)	ρ , ° (угол интенсив- ности)
1	Trust 2	TT	0	0
2	Trust	T	30	0
3	Transpressional	TS	60	0
4	Strike-slip	S	90	0
5	Transtensional	NS	120	0
6	Normal 2	N	150	0
7	Normal	NN	180	0
8	Undertensional	TV	30	45
9	Oblique	O	90	45
10	Undertensional	NV	150	45
11	Vertical	V	0	90

правление, а оси растяжения – восточно-северо-восточное. Аналогичные результаты были получены по “качественной” выборке (289 событий), что является подтверждением устойчивости полученных результатов.

С целью обнаружения каких-либо особенностей СТД в зависимости от глубины были построены карты СТД для различных глубин: 0–5 км, 5–15 км и 15–25 км (рис. 13).

Оказалось, что на глубинах 0–5 км для западной части преобладающим является сдвиговый режим, а для восточной характерны переходные

режимы: от сдвига к растяжению, от вертикального режима к обстановке растяжения, режим ко-сого сдвига. Увеличение количества режимов может свидетельствовать о сложности деформационных процессов в поверхностных слоях земной коры, связанных с ее блоковым строением и локальным характером тектонических процессов. Средние глубины – 5–15 км, на которых происходит максимальное количество землетрясений в данном регионе, вносят основной вклад в решение СТД, и характер распределения типов деформаций на этой глубине совпадает с результатами СТД, полученными для всего сейсмогенерирующего слоя земной коры (0–25 км). На глубинах 15–25 км проявляются три типа режима сейсмотектонической деформации: сдвиговый режим в западной части, переходный от сдвига к сжатию в центральной и северо-восточной частях и режим сжатия в юго-восточной части исследуемой территории (районы Джумгалского хребта и Кочкорской впадины). Полученные результаты свидетельствуют о разной деформационной обстановке на различных глубинах. Отмечается также, что с глубиной изменяется направление осей сжатия от северо-северо-западного к северному.

Особый интерес вызывает вертикальная компонента, которая визуальнo не отражается на картах СТД. Полученные величины вертикальной компоненты (ZZ) имеют положительное значение на всей исследуемой территории за исключением нескольких точек (табл. 1). Это говорит о том, что практически во всем районе исследования земная кора испытывает воздымание, кроме зоны Суусамырской впадины, где значение компоненты отрицательно или близко к нулю (рис. 14).

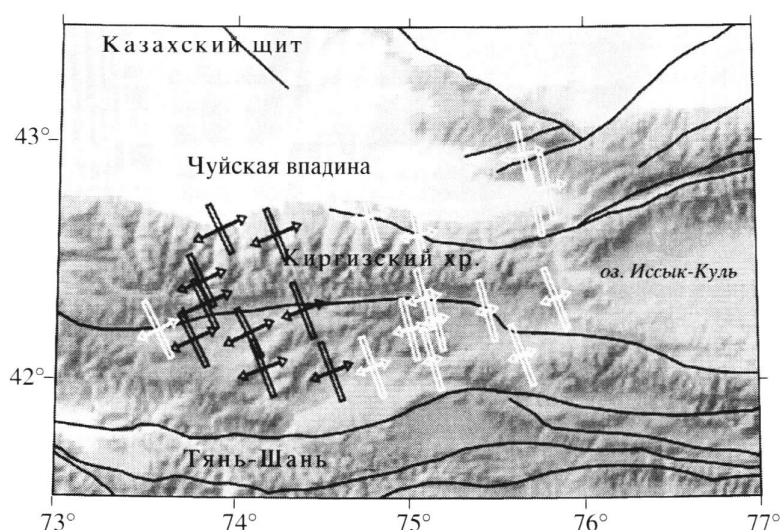


Рис. 12. Карта горизонтальных проекций главных осей сжатия и растяжения сейсмотектонических деформаций. Цвет осей зависит от типа режима сейсмотектонической деформации: светлый – режим TS (transpressional); темный – режим S (strike-slip).

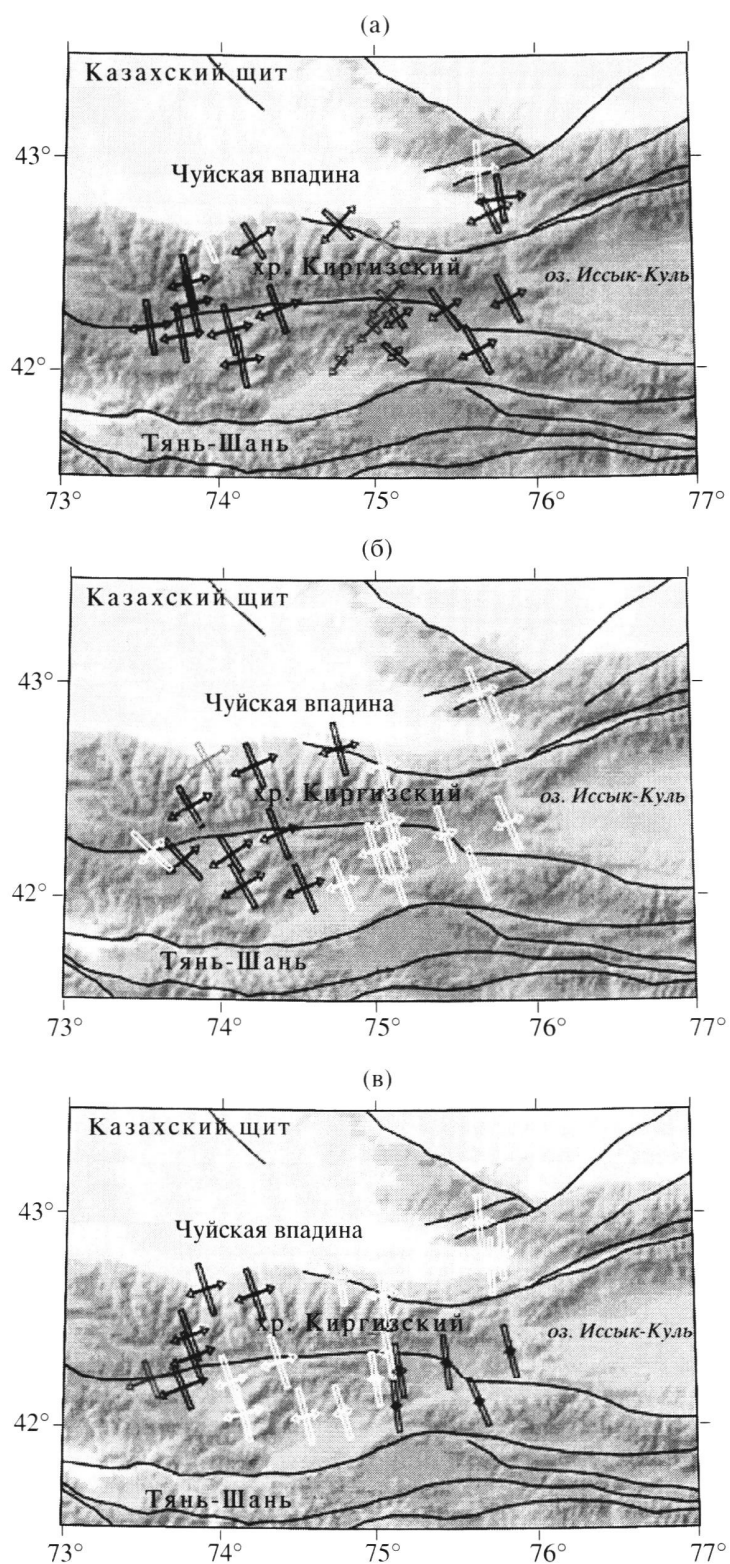


Рис. 13. Карты СТД для различных глубин: 0–5 км (а); 5–15 км (б); 15–25 км (в).

Знаки: светлый – режим TS (transpressional); темный – режим S (strike-slip); темно-серый – O (oblique); серый – NV (undertransinal); светло-серый – NS (transtensional).

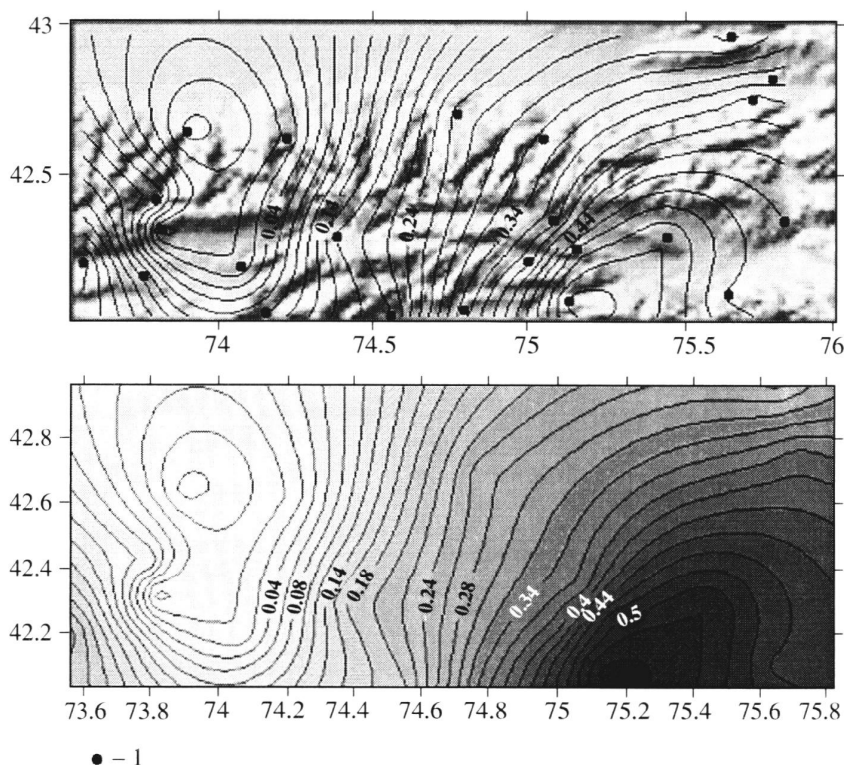


Рис. 14. Вертикальная компонента тензора сейсмотектонической деформации: I – узловые точки.

Для того чтобы получить представление о деформации земной коры в целом, а не по отдельным направлениям, используется коэффициент Лоде-Надаи (μ_M) являющийся инвариантом тензора деформаций (табл. 1). Анализ этого коэффициента показал, что значительная часть исследуемой территории характеризуется деформацией сжатия ($\mu_M > 0.2$) и только незначительная часть земной коры находится в условиях сдвига ($-0.2 < \mu_M < 0.2$) – это район Суусамырской впадины (рис. 15).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные выше расчет и картирование сейсмотектонических деформаций на территории Северного Тянь-Шаня выявили неоднородность их распределения. Это может быть связано как с неоднородностью глубинного строения земной коры, так и с различием темпа асейсмических тектонических подвижек в разных зонах (т.е. унаследованностью геодеформационных процессов). Вместе с тем, здесь можно провести параллели с подходом физической мезомеханики разрушения [Панин, 1998], где принципиальное значение придается возникновению в ходе деформационного процесса мезоструктур, т.е. неоднородностей промежу-

точных масштабов, меньших глобальных размеров задачи, но превосходящих размеры отдельных разрывных нарушений (дефектов). Согласно представлениям физической мезомеханики, до макро-разрушения (ему условно можно сопоставить крупнейшее землетрясение) различие в направленности движений в образующихся мезоскопических блоках компенсируется за счет неупругих деформаций в зонах их контактов. Для небольших образцов в лабораторных экспериментах установлено, что в граничных зонах, между мезоблоками, локализуются пластические деформации [Панин, Гриняев, 2003]. На характерных для сейсмологии масштабах аналогичную роль, по всей видимости, играют сейсмотектонические деформации либо сейсмотектонические течения (понимание терминов согласно [Нерсесов и др., 1982]), усредняющие подвижки в очагах (т.е. скачки смещений). Существенно при этом, что сами мезоблоки остаются в области квазиупругих деформаций и дополнительно могут разворачиваться друг относительно друга. При этом весьма незначительные отличия в направленности смещений внутри разных блоков могут дать значительный разброс их разностей на разных межблоковых границах. По так называемой теории упругой отдачи, накапливаемые таким образом упругие напря-

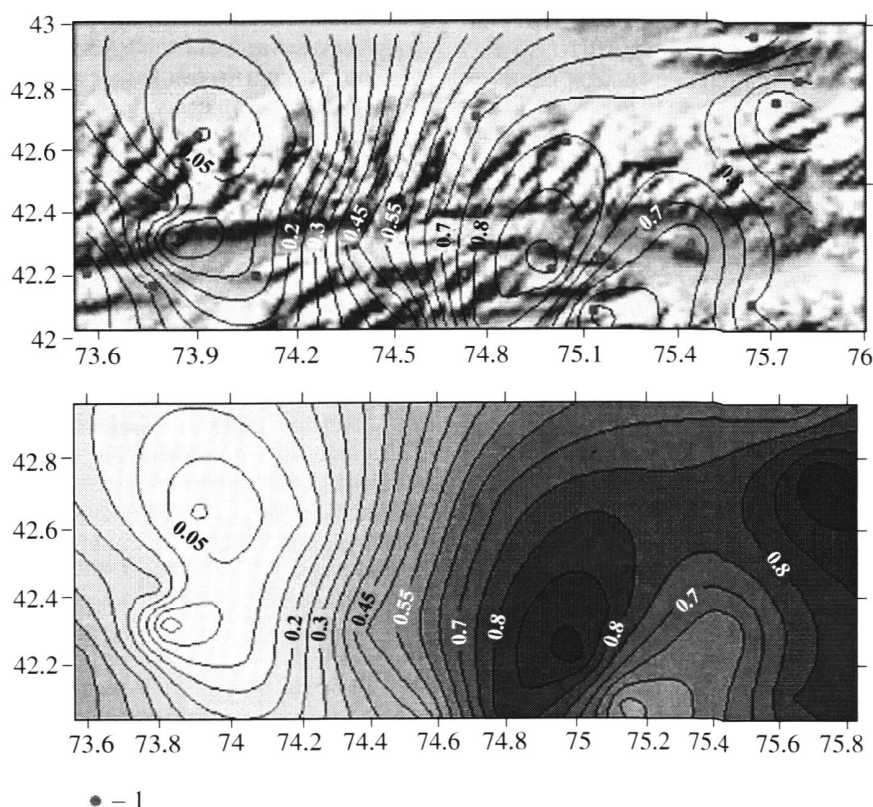


Рис. 15. Распределение коэффициента Лоде-Надаи по площади: 1 – узловые точки.

жения во многом определяют характер механизмов очагов. Следовательно, неоднородность распределения СТД даже на относительно небольшой площади не удивительна.

Тем не менее, для исследуемой территории по данным фокальных механизмов можно выделить преобладающее направление осей сжатия (северо-северо-запад). При этом для большего числа событий эта ось близгоризонтальна. Статистический подход при расчете СТД подтвердил, что большая часть территории характеризуется деформацией простого сжатия (по коэффициенту Лоде-Надаи). На первый взгляд, все это может свидетельствовать о проявлении действия тектоники литосферных плит, а конкретно – о влиянии давления Индостанской плиты при ее меридиональном движении на север. Во многих работах коллизия Индостана с Казахским щитом рассматривается как источник тектонических напряжений, которыми, в конечном счете, обусловлена сейсмичность Тянь-Шаня. При более внимательном рассмотрении, вовлекающем различие направленности главных осей сжатия на различных глубинах, недостаточность этого фактора и необходимость учета тектонической расслоенности коры Тянь-Шаня оказываются очевидными. Известная по геологическим [Макаров и др., 1982] и

сейсмотомографическим [Сабитова и др., 2001] данным тектоническая расслоенность является предпосылкой того, что, во-первых, с глубиной меняются физические и реологические свойства вещества коры, и, во-вторых, напряженно-деформированное состояние слоев различно. Последнее различие включает не просто рост среднего давления и температуры, а и вариации сдвиговых компонент тензора напряжений, с которыми связаны стресс-метаморфизм. Смена режима сейсмотектонических деформаций соответствует изменению направления действия сил из-за структурно-реологических неоднородностей, т.е. регионального фактора. Такой удаленный источник, как меридиональный дрейф Индостанской плиты, по всей видимости, не может быть ответственным за проявление деформационных неоднородностей на относительно небольшом масштабе длин.

Поскольку распространена точка зрения, что результаты изучения современных движений Тянь-Шаня методами космической геодезии (GPS) подтверждают теорию коллизии Индостана и Казахского щита как основного фактора, определяющего напряженно-деформированное состояние коры Тянь-Шаня, остановимся на соответствии материалов по фокальным механизмам и СТД и