

УДК 550.34+539.3+551.24

СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ДЕФОРМАЦИИ И НОВЕЙШАЯ ТЕКТОНИКА ТЯНЬ-ШАНЯ

© 2008 г. Н. А. Сычева¹, С. Л. Юнга², Л. М. Богомолов¹, В. И. Макаров³

¹Научная станция РАН, г. Бишкек

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

³Институт геоэкологии РАН, г. Москва

Поступила в редакцию 09.04.2007 г.

Для исследования деформационных процессов для территории Тянь-Шаня, ограниченной координатами 38°–44° по широте и 68°–44° по долготе, проведен расчет сейсмостектонических деформаций (СТД) по данным каталога фокальных механизмов очагов землетрясений, составленного в Институте сейсмологии НАН КР (включает более 5000 событий). При построении карт СТД применен современный подход к типизации сейсмостектонической деформации, предусматривающий выделение одиннадцати типичных деформационных обстановок, в том числе четырех основных, двух предельных и пяти переходных. Получено площадное распределение коэффициента Лоде-Надаи, вертикальной компоненты и угла вида напряженного состояния. Проведен контроль полученных результатов с расчетами СТД на базе фокальных механизмов очагов 116 сильных землетрясений из каталога СМТ (Каталог Гарвардского университета), которые произошли на исследуемой территории в 1976–2003 гг.

PACS: 91.30.Ab; 91.45.Bg

ВВЕДЕНИЕ

Отражением современных геодинамических процессов на Тянь-Шане является проявление сейсмичности. Накопление новых сейсмологических данных по механизмам очагов землетрясений, а также новые подходы в решении задачи определения деформационной обстановки позволяют получать новые представления о напряженно-деформированном состоянии земной коры Тянь-Шаня. Параметры фокальных механизмов индивидуальных землетрясений и сейсмостектонические деформации, определяемые по статистической выборке событий, отражают напряженно-деформированное состояние геосреды. Они могут давать информацию об особенностях геодинамического процесса.

Изучению СТД данного региона посвящено достаточное количество работ, в которых отмечены преобладающие направления для оси сжатия; определены распределения коэффициентов Лоде-Надаи; построены карты компонент тензора деформаций. Однако картирование компонент тензора скорости деформации не позволяет представить результаты в целом, и требуется их одновременное рассмотрение, что обычно не вполне удобно для использования специалистами других областей – геодезии, геофизики и геологии.

В работе [Юнга, 1999] были проведены расчеты СТД земной коры для территории Северного Тянь-Шаня на базе данных сети KNET, основанные на новых алгоритмах и программных продук-

тах; при построении карт СТД использованы схемы классификации режимов СТД, позволяющие обеспечить унифицированную форму представления результатов расчетов СТД и картировать их с привязкой к топографической основе. Целью настоящей работы является проведение аналогичных расчетов СТД для территории, включающей весь Тянь-Шань (а не только его северную часть), с привлечением каталога фокальных механизмов, предоставленного Институтом сейсмологии НАН КР.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Исходные данные. Как было отмечено выше, для исследования деформации земной коры Тянь-Шаня был использован каталог фокальных механизмов очагов землетрясений Института сейсмологии НАН КР, в который вошли определения, полученные как сотрудниками этого института, так и определения параметров фокальных механизмов, опубликованные в различных источниках. Составители каталога – сотрудники лаборатории региональной сейсмологии ИС НАН КР Багманова Н.Х., Беленович Т.Я., Слепой В.И. Основная часть определений опубликована в работах [Лопатина, 1975; Лопатина и др., 1978; Беленович, 1982; Захарова и др., 1973; Каталог..., 1981–1988; Каталог..., 1990; Кучай и др., 1984; Широкова, 1961; 1974; 1979; Безродный, 1987].

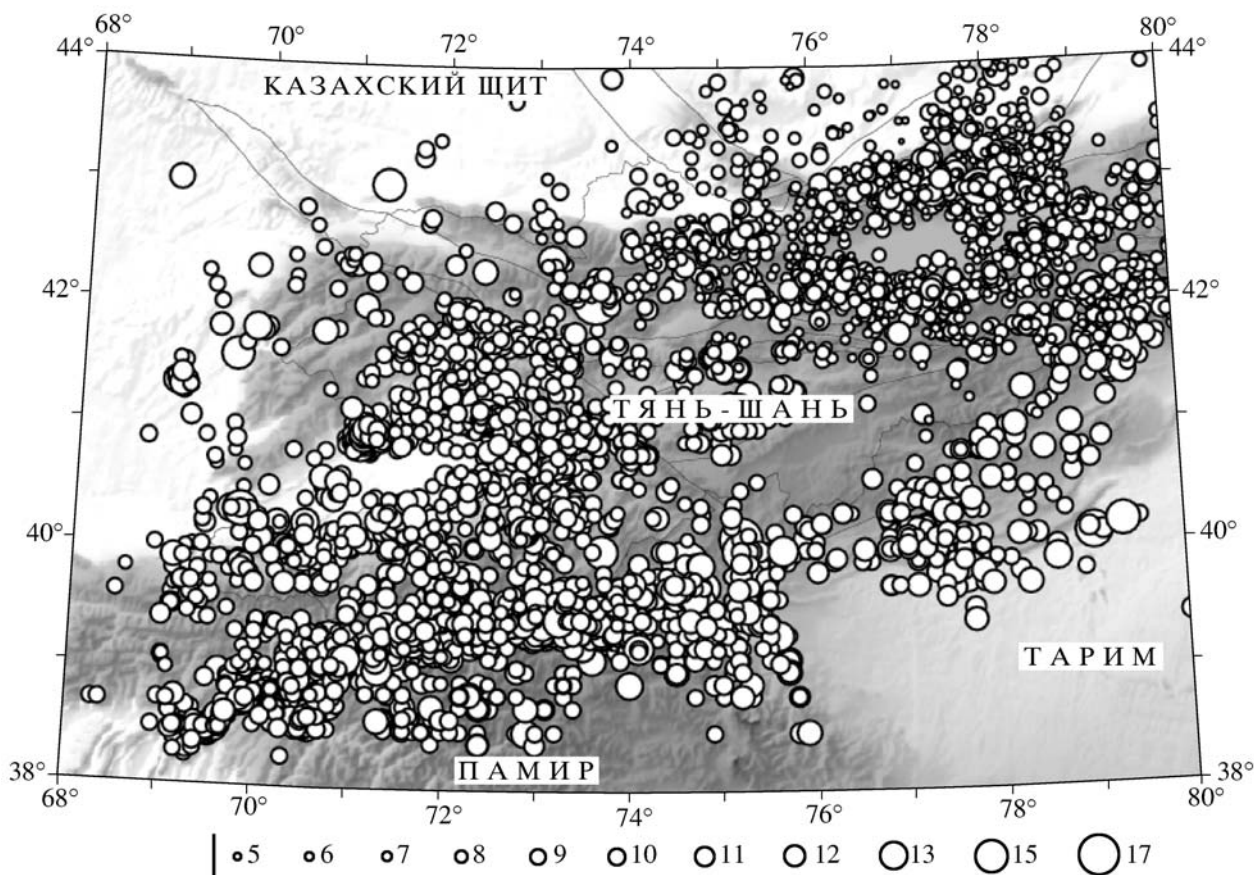


Рис. 1. Карта исследуемых событий.

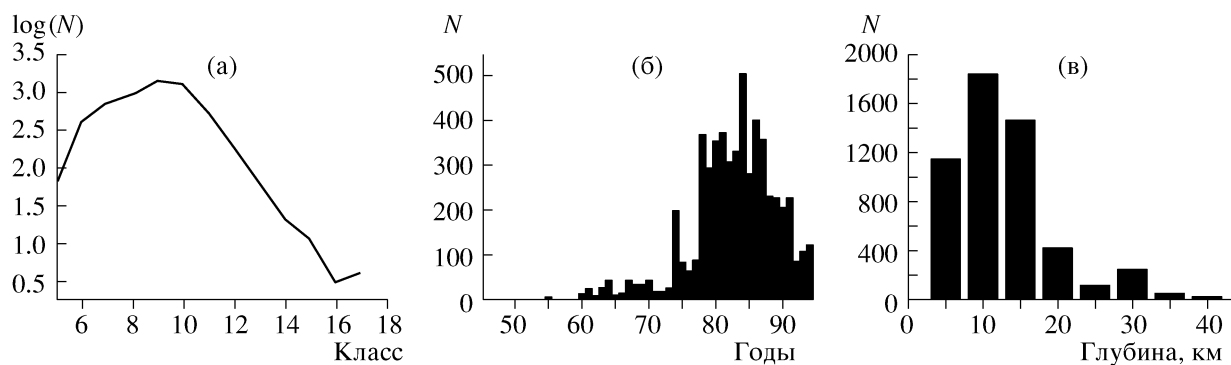


Рис. 2. Статистические характеристики исследуемого каталога (5468 событий): (а) – график повторяемости; (б) – распределение событий по годам; (в) – распределение событий по глубинам.

Каталог включает в себя 5468 сейсмических событий, произошедших на Тянь-Шане в 1946–1994 годах (рис. 1). Кроме параметров гипоцентра и энергетической характеристики каталог содержит данные по механизмам очагов: азимуты и углы погружения (от вертикальной плоскости) главных осей напряжений – сжатия (P) и растяжения (T).

Согласно статистическим характеристикам, представительность исследуемого каталога начинается с событий 10 класса (рис. 2а); основная часть событий приходится на период с 1975 по 1990 гг. (рис. 2б), а очаги событий расположены, главным образом, на глубинах 5–15 км (рис. 2в).

Качество данных. Точность определения параметров механизмов очагов землетрясений зави-

сит от надежности проведения нодальных линий, разделяющих на стереографической проекции полусферы области существования различных знаков первых вступлений упругих волн. В каталогах механизмов очагов землетрясений Средней Азии и Казахстана и каталогах Института сейсмологии НАН КР разброс в определении положения нодальных плоскостей по азимуту, углу падения и углу скольжения составляет соответственно 5°, 15°, 25°.

Методика расчета СТД. Расчеты компонент тензора среднего механизма, значений коэффициента Лоде – Надаи и угла вида напряженного состояния проводились по стандартной методике [Ризниченко, 1976; 1977; Лукк и др., 1979; Костров, 1975; Юнга, 1990]. В качестве подготовительной операции сейсмоактивная территория разбита на частично перекрывающиеся круговые подобласти с центрами в узловых точках. Узловые точки выбирались в наиболее сейсмоактивных районах, а анализ СТД осуществлялся в круговых окрестностях диаметром 1.3°. При расчетах СТД мощность литосферного слоя в указанных круговых окрестностях принималась равной 70 км. Вклад каждого сейсмического события в процедуру расчетов матриц среднего механизма определялся по весовой функции, описанной в работе [Юнга, 1999].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТД

Средний механизм. При расчете среднего механизма контроль результатов на неслучайность осуществлялся определением параметра K (интенсивность результирующей матрицы).

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N K^{(i)}, \quad (1)$$

где $K^{(i)}$ – коэффициент соответствия, который определяется скалярным произведением сравниваемых тензоров: среднего и единичного

$$K^{(n)} = \frac{\langle m_{ij} \rangle : m_{ij}^{(n)}}{\langle m_{ij} \rangle : \langle m_{ij} \rangle} \quad (2)$$

Область значений величины $K^{(n)}$ отвечает отрезку $[-1; 1]$. При больших положительных значениях $K^{(n)}$ индивидуальная матрица $m_{ij}^{(n)}$ соответствует среднему механизму $\langle m_{ij} \rangle$, а при отрицательных значениях $K^{(n)}$ такое соответствие отсутствует.

Параметр K (интенсивность результирующей матрицы) выступает в качестве основной статистики в оценивании сумм единичных по интенсивности матриц. Сравнение полученных значений K со значениями $K_{кр}$ (критическое) (1) показало, что для большинства узловых точек полученное значение K превышает значение $K_{кр}$. При этом на 95% доверительном уровне можно считать иссле-

дуемую выборку неслучайной. Те узловые точки, для которых значение K не превышало $K_{кр}$, не были использованы при расчете СТД.

В таблице приведены отдельные характерные значения этой статистики. Этой информации в целом достаточно, чтобы убедиться в не случайности результатов расчетов, которая практически всегда имеет место в реальных расчетах.

Построение нодальных линий среднего механизма и осей P , T для всех узловых точек, использованных при расчетах СТД, показало, что в западной части исследуемой территории ориентация оси сжатия имеет северо-северо-западное направление, а в восточной части направление оси изменяется от северо-западного до северо-восточного.

На рис. 3 представлены некоторые типы средних механизмов, характерных для рассматриваемой территории. Над каждым средним механизмом помещена диаграмма, указывающая на то, из какого типа подвижек складывается суммарное решение.

Картирование результатов, схема классификации режимов СТД. Для классификации режимов сейсмостектонической деформации применена разработанная в последние годы схема классификации, основанная на параметризации через систему угловых параметров [Юнга, 1990; 1997], которая обеспечивает изометрическое отображение тензорных объектов на сферу. Эта схема, далее используемая при картировании СТД, приведена на рис. 4. Представленная на рисунке 4 система обозначений, с одной стороны, соответствует классификации кинематики очаговых подвижек, применявшейся в предыдущих работах [Юнга, 1990; Сычева, 2005], а с другой стороны отражает возможные проявления напряженного состояния коры в особенностях геологических структур [Sonderson, 1984]. Примером этого могут быть переходные режимы транспрессии и транстензии, к которым было привлечено внимание в работах [Морозов, 2002; Sonderson, 1984].

Для исследуемой территории характерны следующие режимы СТД (рис. 5): TV - от вертикального режима к обстановке сжатия; $T-P$ (Thrust faults, comPression) – сжатие; $ST-PS$ (Strike sleep faults – Thrust faults; TransPressional) – от сдвига к сжатию; $TT-PP$ формируется как бы двумя разрывами типа T ; O – режим косоугольного сдвига. Значительная часть территории Тянь-Шаня характеризуется переходным режимом транспрессии $ST-PS$, что соответствует некоторым геологическим работам [Миколайчук, 2000]. Необходимо отметить, что режимы СТД проявляются не в отдельных точках, а характеризуют определенные зоны.

По результатам расчета СТД ось сжатия на исследуемой территории имеет близкое к субмеридиональному направление: северо-западное – в зоне сочленения Тянь-Шаня и Памира; северо-северо-западное – на площади к западу от Таласо-

Значения параметра интенсивности матриц в каждой узловой точке и критические значения параметра K , соответствующие 95% вероятностям и объему выборки (N)

Номер точки	φ° с.ш.	λ° в.д.	N	K	$K_{кр}$ (95%)	Номер точки	φ° с.ш.	λ° в.д.	N	K	$K_{кр}$ (95%)
1	38.75	69.00	36	0.31	0.247	68	40.50	77.00	51	0.22	0.206
2	38.75	69.50	119	0.18	0.147	69	40.50	77.50	65	0.22	0.181
3	38.75	70.00	263	0.22	0.103	70	40.50	78.00	43	0.27	0.225
4	38.75	70.50	252	0.21	0.103	71	40.50	78.50	24	0.40	0.297
5	38.75	71.00	317	0.24	0.087	72	40.50	79.00	15	0.40	0.377
6	38.75	71.50	166	0.22	0.147	73	41.00	71.00	298	0.47	0.103
7	38.75	72.00	95	0.24	0.146	74	41.00	71.50	323	0.45	0.087
8	38.75	72.50	54	0.32	0.206	75	41.00	72.00	142	0.31	0.147
18	39.25	70.00	131	0.23	0.147	76	41.00	72.50	154	0.38	0.147
19	39.25	70.50	266	0.25	0.103	77	41.00	73.00	192	0.40	0.147
20	39.25	71.00	303	0.24	0.087	78	41.00	73.50	155	0.36	0.147
21	39.25	71.50	286	0.21	0.103	79	41.00	74.00	98	0.33	0.146
22	39.25	72.00	402	0.12	0.078	80	41.00	74.50	62	0.32	0.192
23	39.25	72.50	368	0.12	0.087	82	41.00	75.50	28	0.28	0.289
24	39.25	73.00	351	0.16	0.087	89	41.00	79.00	23	0.32	0.308
25	39.25	73.50	271	0.17	0.103	90	41.50	71.00	34	0.25	0.259
26	39.25	74.00	193	0.17	0.147	91	41.50	71.50	72	0.27	0.174
31	40.00	69.00	29	0.31	0.271	92	41.50	72.00	135	0.29	0.147
32	40.00	69.50	59	0.35	0.199	93	41.50	72.50	165	0.33	0.147
33	40.00	70.00	73	0.38	0.174	94	41.50	73.00	114	0.30	0.147
34	40.00	70.50	84	0.34	0.160	95	41.50	73.50	94	0.24	0.104
35	40.00	71.00	100	0.31	0.147	96	41.50	74.00	43	0.25	0.225
36	40.00	71.50	110	0.22	0.147	97	41.50	74.50	37	0.26	0.242
37	40.00	72.00	122	0.17	0.147	98	41.50	75.00	41	0.32	0.228
38	40.00	72.50	117	0.22	0.147	99	41.50	75.50	50	0.28	0.207
39	40.00	73.00	112	0.25	0.147	100	41.50	76.00	34	0.26	0.259
40	40.00	73.50	107	0.19	0.147	104	41.50	78.00	49	0.29	0.207
41	40.00	74.00	88	0.18	0.158	105	41.50	78.50	61	0.29	0.192
42	40.00	74.50	85	0.24	0.158	106	41.50	79.00	115	0.26	0.147
43	40.00	75.00	83	0.28	0.160	107	41.50	79.50	111	0.19	0.147
44	40.00	75.50	60	0.28	0.192	112	42.00	70.50	17	0.35	0.356
45	40.00	76.00	35	0.28	0.247	113	42.00	71.00	21	0.35	0.322
50	40.00	78.50	19	0.36	0.342	114	42.00	71.50	45	0.24	0.216
54	40.50	70.00	26	0.33	0.288	115	42.00	72.00	68	0.29	0.181
55	40.50	70.50	36	0.39	0.247	116	42.00	72.50	81	0.28	0.160
56	40.50	71.00	296	0.45	0.103	117	42.00	73.00	93	0.26	0.143
57	40.50	71.50	147	0.25	0.147	118	42.00	73.50	88	0.20	0.158
58	40.50	72.00	79	0.28	0.170	119	42.00	74.00	59	0.24	0.199
59	40.50	72.50	110	0.27	0.147	120	42.00	74.50	66	0.24	0.181
60	40.50	73.00	155	0.30	0.147	121	42.00	75.00	87	0.26	0.158
61	40.50	73.50	141	0.30	0.147	122	42.00	75.50	134	0.24	0.147
62	40.50	74.00	80	0.28	0.160	123	42.00	76.00	270	0.31	0.103
63	40.50	74.50	43	0.39	0.225	124	42.00	76.50	303	0.35	0.087
64	40.50	75.00	24	0.37	0.297	125	42.00	77.00	291	0.36	0.103

Таблица. Окончание

Номер точки	φ° с.ш.	λ° в.д.	N	K	$K_{кр}$ (95%)	Номер точки	φ° с.ш.	λ° в.д.	N	K	$K_{кр}$ (95%)
126	42.00	77.50	226	0.30	0.103	155	43.00	75.00	103	0.19	0.147
127	42.00	78.00	194	0.30	0.147	156	43.00	75.50	79	0.20	0.170
128	42.00	78.50	162	0.28	0.147	157	43.00	76.00	108	0.28	0.147
129	42.00	79.00	167	0.25	0.147	158	43.00	76.50	236	0.32	0.103
130	42.00	79.50	145	0.19	0.147	159	43.00	77.00	343	0.32	0.087
133	42.50	70.50	16	0.36	0.368	160	43.00	77.50	534	0.33	0.061
134	42.50	71.00	13	0.47	0.410	161	43.00	78.00	646	0.29	0.059
135	42.50	71.50	13	0.45	0.410	162	43.00	78.50	524	0.26	0.061
137	42.50	72.50	13	0.41	0.410	163	43.00	79.00	246	0.23	0.087
138	42.50	73.00	26	0.51	0.288	167	43.50	74.50	16	0.39	0.368
139	42.50	73.50	51	0.23	0.206	168	43.50	75.00	31	0.33	0.268
140	42.50	74.00	67	0.23	0.181	169	43.50	75.50	37	0.28	0.242
141	42.50	74.50	113	0.17	0.147	170	43.50	76.00	26	0.36	0.288
142	42.50	75.00	154	0.17	0.147	171	43.50	76.50	68	0.32	0.181
143	42.50	75.50	190	0.19	0.147	172	43.50	77.00	134	0.31	0.147
144	42.50	76.00	307	0.29	0.087	173	43.50	77.50	137	0.39	0.147
149	42.50	78.50	359	0.25	0.087	174	43.50	78.00	230	0.33	0.103
150	42.50	79.00	209	0.29	0.103	175	43.50	78.50	213	0.29	0.103
151	42.50	79.50	108	0.21	0.147	176	43.50	79.00	73	0.25	0.174

Ферганского разлома; близкое к северному в районе озера Иссык-Куль и северо-северо-восточное в юго-восточной (китайской) части Центрального Тянь-Шаня. Это, в общем, соответствует суммарной неотектонической структуре Тянь-Шаня и свидетельствует о длительной устойчивости поля напряжений субмеридионального сжатия земной коры Тянь-Шаня [Белоусов и др., 2003; Современная..., 2005]. Обращает на себя внимание то, что в западном секторе Тянь-Шаня доминирующим является режим надвиговых и взбросо-надвиговых деформаций, а восточнее, в центральном его секторе более существенно проявляется сдвиговая компонента сейсмоструктурных деформаций и доминирует надвиго-сдвиговый их режим (см. рис. 5). Это хорошо согласуется с тем, что в структурно-геодинамическом отношении Западный Тянь-Шань вместе с западной частью Северного Тянь-Шаня является дугообразным фронтом Пенджабско-Памирского индентора, испытывая прямое давление со стороны последнего, а Центральный Тянь-Шань испытывает уже косвенное давление с юга, опосредованное через Таримский массив и характеризующееся значительной сдвиговой компонентой [Макаров и др., 1996; Современная..., 2005, главы. I.2 и V.3]. Некоторую автономию здесь представляют окраинные северная (Заилийско-Кунгейская) и южная (Предтаримская) зоны Центрального Тянь-Шаня,

в которых также большую роль приобретают взбросо-надвиговые деформации. Это связано, вероятно, именно с краевым положением указанных зон, граничащих с малодеформированными платформенными массивами (Казахским и Таримским). При этом отметим и некоторое различие в характере (режиме) СТД (надвиговых на севере и взбросовых на юге). Такая диссимметрия связана, вероятно, с известными структурно-формационными различиями на этих границах, а также с различиями геодинамических условий взаимодействия Тянь-Шаньского горного пояса со смежными платформенными массивами: на севере это надвижение горного сооружения на структуры эпипалеозойского Казахского щита, а на юге – пододвижение докембрийского Тарима под Тянь-Шань [Современная..., 2005].

Угол вида напряженного состояния. Как отмечалось выше, схема классификации режимов СТД основана на параметризации угловых параметров, одним из которых является угол вида напряженного состояния ω [Соколовский, 1969]. Площадное распределение значений угла ω представлено на рис. 6а. Минимальное значение этого угла характерно для района Чаткальского хребта, что может свидетельствовать о повышенных напряжениях в горизонтальной плоскости для данной области. По схеме классификации эта зона характеризуется режимом *T-P* (Thrust faults, compres-

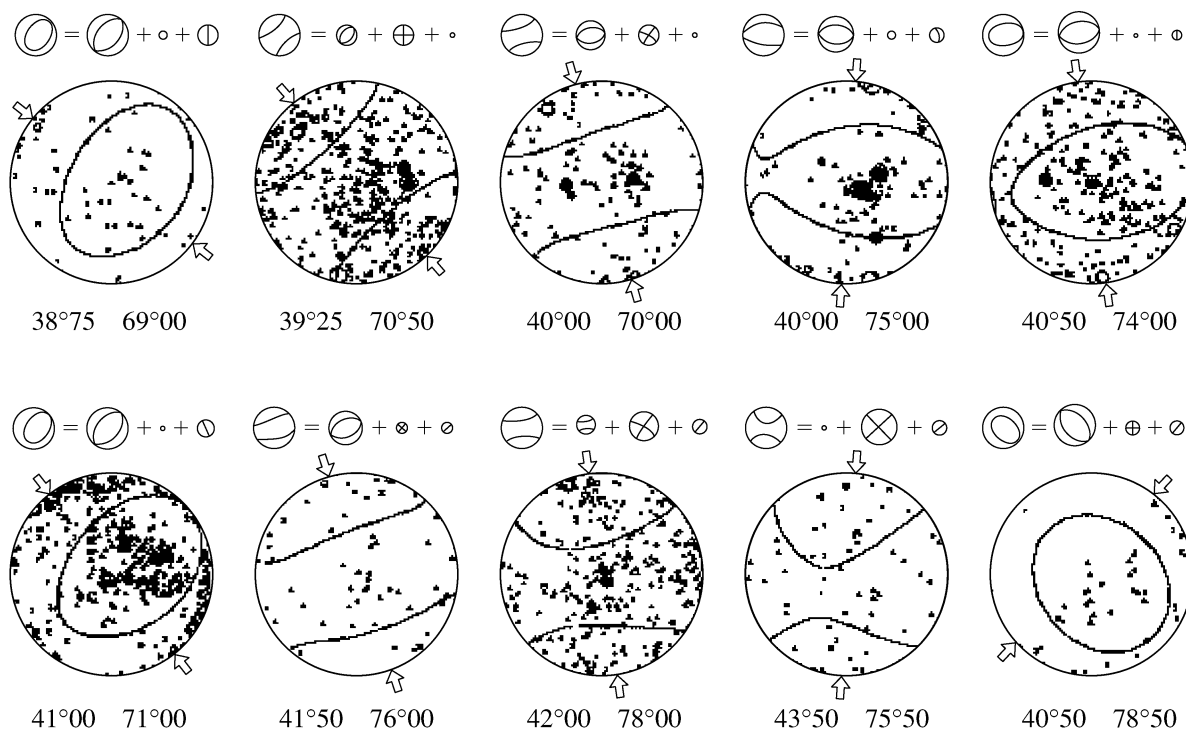


Рис. 3. Нодальные линии и направление оси сжатия средних механизмов для некоторых узловых точек.

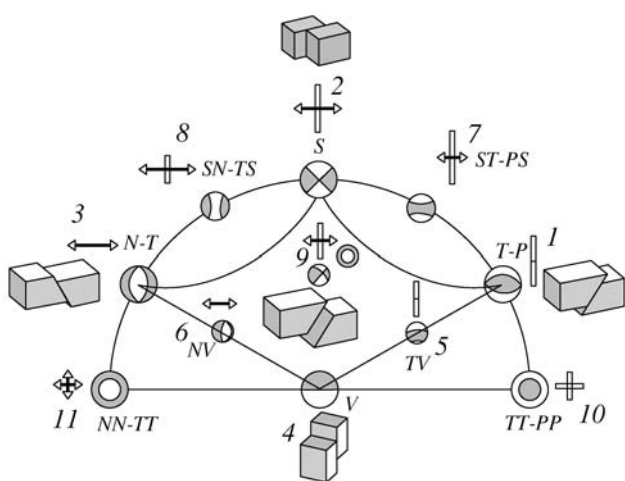


Рис. 4. Схема классификации режимов СТД: 1–4 – основные режимы; 5–9 – переходные; 10–11 – предельные. Первые один или два символа в обозначении режима отвечают кинематической классификации, через тире даны символы, соответствующие стандартным обозначениям напряжений; так, например, взбросовый режим 1, ассоциирующийся с напряжениями сжатия, обозначается как *T-P* (Thrust faults – compression или Pressure); сбросовый режим 3, реализующийся в обстановке растяжения, дается как *N-T* (Normal faults – Tension). Соответственно, режим транспресии 7, являющийся переходным от сдвигового *S* к взбросовому *T-P*, имеет обозначение *ST-PS*. В отдельных случаях удобным представляется обойтись одним символом, отвечающим кинематике подвижки: (*S* – Strike-slip fault; *V* – Vertical fault; *O* – Oblique fault).

tion) и переходным режимом *TV* (см. рис. 4). Наиболее высокими значениями этого угла отмечается зона сочленения Тянь-Шаня и Памира для которой характерны сейсмические события со сдвиговыми механизмами. Сдвиговые дислокации, наряду со взбросами и надвигами, характерны и для неотектонической структуры этой зоны.

Высокими значениями угла вида напряженного состояния выделяется также субмеридиональная зона, секущая горные цепи Северного Тянь-Шаня вдоль 74–75-го меридианов. Эта зона характеризуется “вставкой” сдвиговых и даже, казалось бы, аномальных сбросо-сдвиговых механизмов (см. рис. 5). В неотектонической структуре эта “вставка” пространственно и, смеем полагать, генетически связана с субмеридиональной Каракуль-Балхашской трансорогенной зоной секущих деформаций глубокого заложения, для которой характерны флексурно-разрывные дислокации верхнекорового слоя с локальным проявлением растяжений [Макаров и др., 1982; Современная геодинамика..., 2005, гл. I.2]. Отметим, кстати, что на юге этой секущей зоны, на севере Памира, также определены столь же аномальные сбросо-сдвиговые механизмы (см. рис. 5).

Коэффициент Лоде-Надаи. Для того чтобы получить представление о типе деформации земной коры в целом, используется коэффициент Лоде-Надаи, который не зависит от координатного представления тензора и может рассматриваться как инвариант. Расчеты и построение пло-

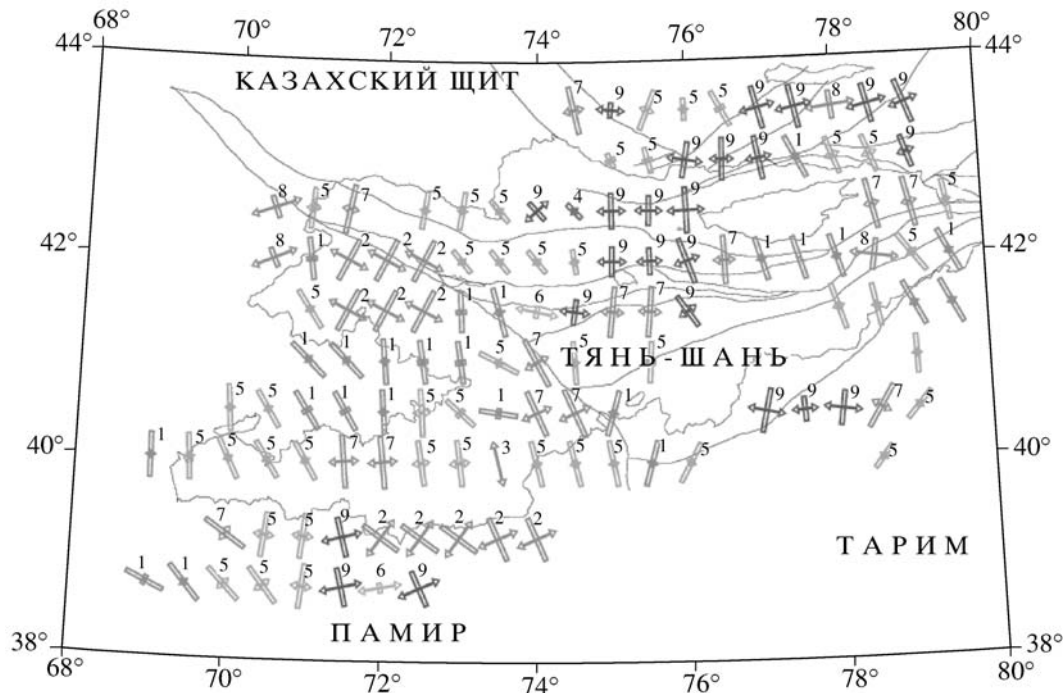


Рис. 5. Карта СТД.

западного распределения значений коэффициента Лодэ-Надаи показали, что основная часть исследуемой территории характеризуется сжатием. Причем полоса сжатия вытянута с юга-запада на северо-восток и имеет две зоны, где сжатие проявляется максимально: это западная часть зоны сочленения Памира и Тянь-Шаня и зона западнее озера Иссык-Куль (рис. 6б). Сжатие максимально проявлено в западной части Гиссаро-Алайской системы поднятий, закономерно отмечаясь проявлением здесь надвиговых и взбросовых механизмов в очагах, а также юго-западнее озера Иссык-Куль, в западной части Терской системы поднятий.

Вертикальная компонента. Согласно распределению вертикальной компоненты (рис. 6в), почти вся исследуемая территория испытывает воздымание, за исключением восточной части зоны сочленения Памира и Тянь-Шаня. Наибольших значений эта величина достигает в районе Чаткальского хребта. В целом структура ее распределения достаточно сходна с распределением значений угла вида напряженного состояния.

СТД на различных глубинах. Многие исследователи новейшей тектоники и сейсмотектоники Памиро-Тянь-Шаньской области (В.И. Макаров, В.Г. Трифонов, Ю.К. Шукин, В.К. Кучай [Макаров и др., 1982], Н.И. Павленкова [Павленкова, 1973], Т.М. Сабитова, Ф.Н. Юдахин [Юдахин, 1991] и др.) отмечали тектоническую расслоенность ее земной коры и указывают на то, что, обладая различными вещественно-структурными и

реологическими свойствами, разновозрастные и разноглубинные слои, структурные этажи и пластины по-разному реагируют на испытываемое ими тектоническое напряжение [Макаров и др., 1982; Тектоническая..., 1990]. Благодаря накоплению объемных каталогов фокальных механизмов и применению нового статистического подхода к расчетам СТД [Сычева и др., 2003а; 2003б, 2005], появилась возможность послойного анализа особенностей СТД в соответствии с концепцией тектонической расслоенности. В предыдущей работе [Сычева, 2005] было установлено, что характер СТД меняется в зависимости от глубины и ось сжатия с глубиной также меняет свое направление с северо-северо-западного на северное (исследовалась площадь 100×300 км). В настоящей работе аналогичные исследования были проведены для диапазонов глубин: 0–5 км (1214 событий), 5–15 км (3334 события) и 15–70 км (924 события); соответствующие им карты СТД представлены на рис. 7.

Зона сочленения Памира и Тянь-Шаня. Для первого интервала глубин в западной части этой зоны проявляются режимы сжатия с надвигообразованием ($T-P$) и сдвигами в комбинации со взбросами ($ST-PS$), а в восточной части – сдвиговый режим (S). Для более глубокого интервала характерны режимы взбросо-сдвиговых деформаций (O) в западной части и сбросо-сдвиговых ($SN-TS$) и сбросовых ($N-T$) деформаций в восточной части. Последние как раз и подтверждают глу-

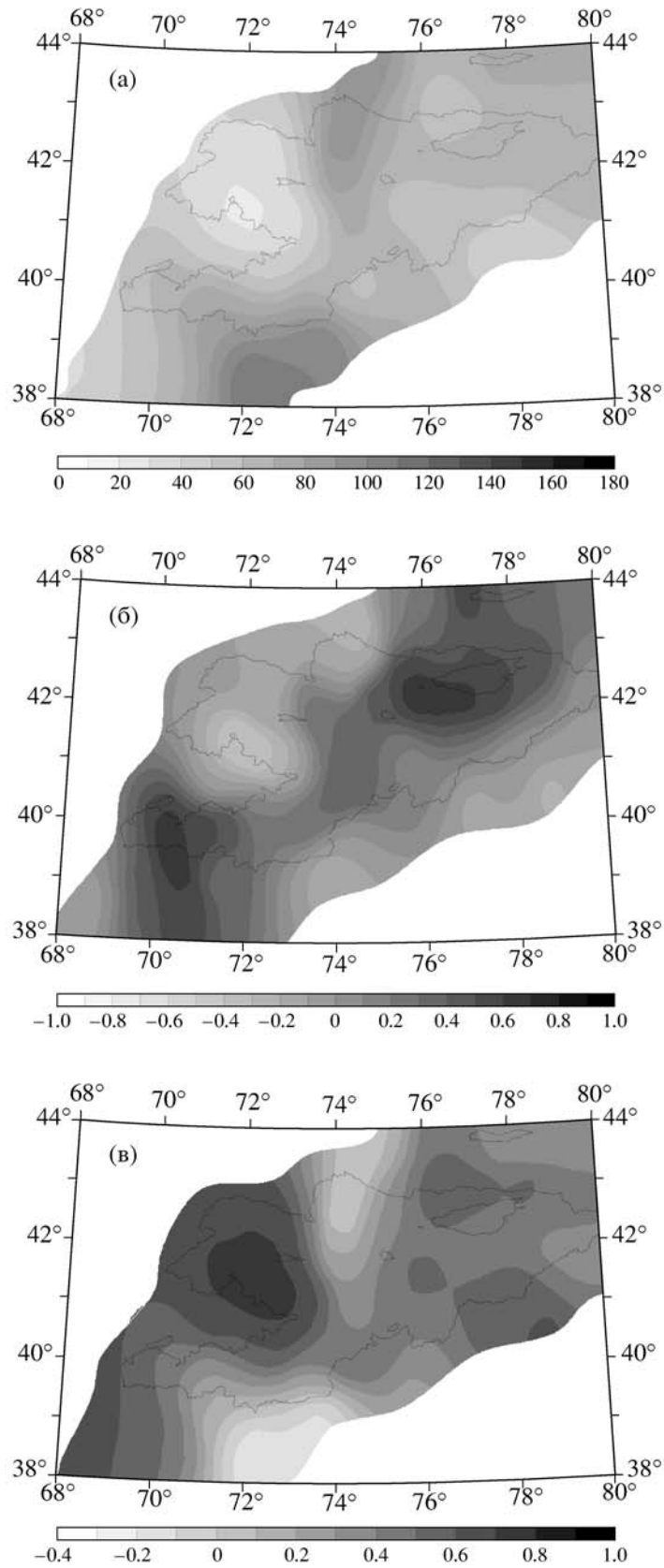


Рис. 6. Площадное распределение параметров STD: (а) – значений угла вида напряженного состояния ω ; (б) – значений коэффициента Лоде-Надаи; (в) – значений вертикальной компоненты.

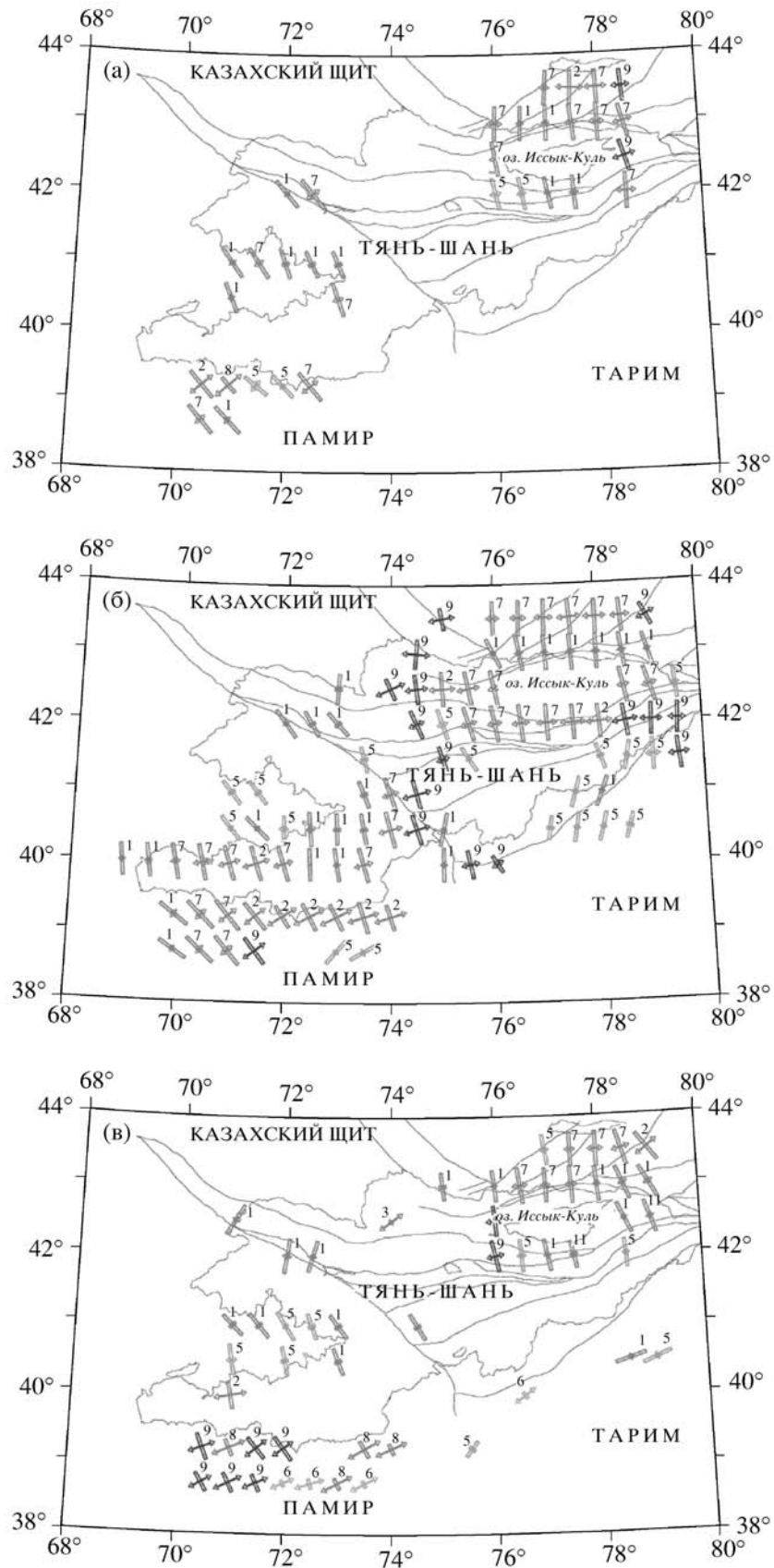


Рис. 7. Карты СТД на различных глубинах: (а) 0–5 км; (б) 5–15 км; (в) более 15 км.

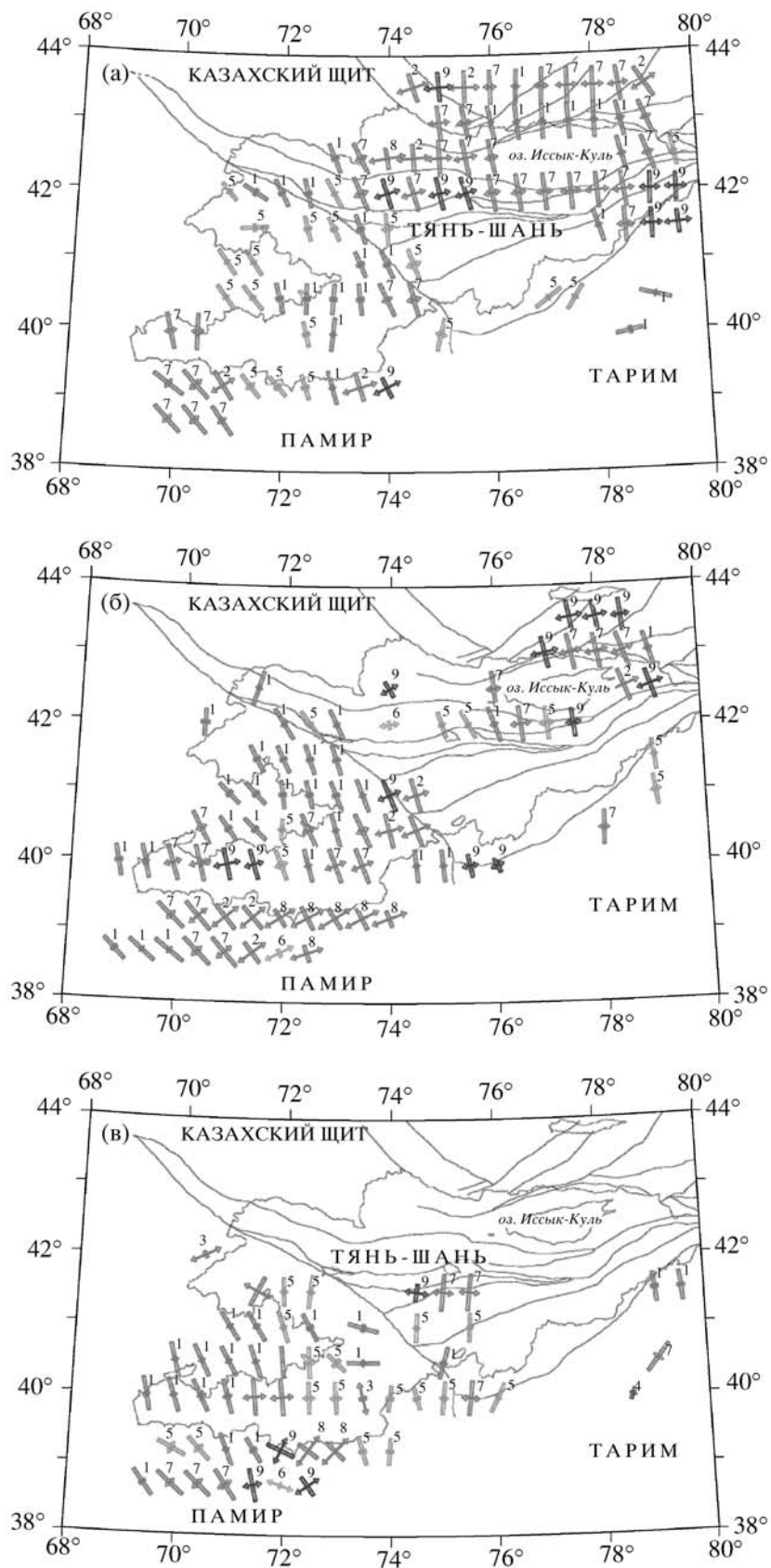


Рис. 8. Карты STD для сейсмических событий с разными энергетическими характеристиками: (а) слабые: 5–9 класса (3385 событий); (б) средние: 10–12 класса (1981 событие); (в) сильные: 13–17 класса (106 событий).

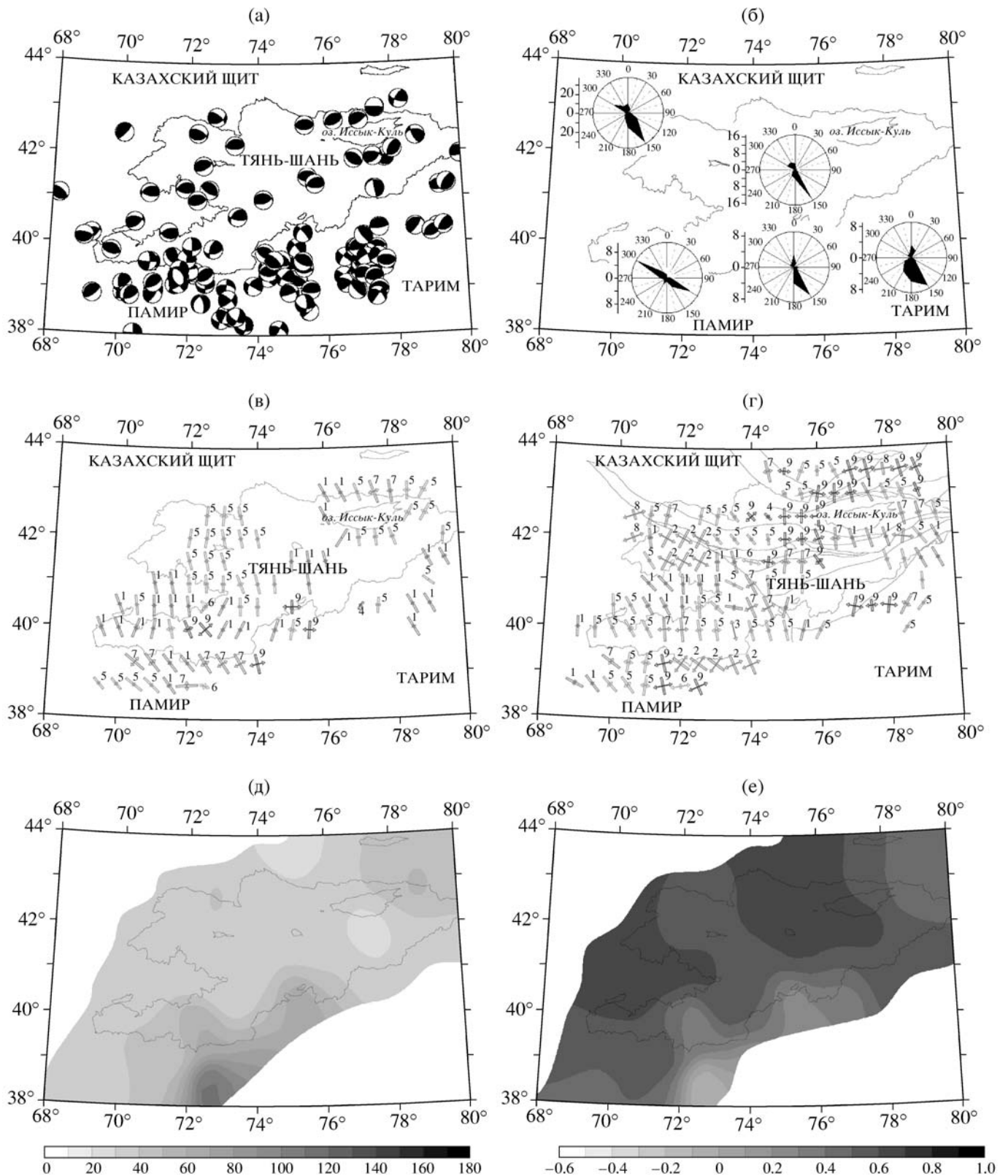


Рис. 9. Результаты расчета STD по данным каталога СМТ: (а) механизмы очагов землетрясений; (б) распределение азимутов осей сжатия сейсмических событий; (в) карта STD по каталогу СМТ; (г) карта STD по каталогу Института сейсмологии; (д) угол напряженно-деформированного состояния; (е) вертикальная компонента.

бинность заложения Каракуль-Балхашской трансформированной зоны дислокаций.

В Иссыккульской зоне режимы СТД практически неизменны на различных глубинных уровнях. Здесь наиболее характерными являются режимы субгоризонтального сжатия со взбросо-сдвигами (*ST-PS* и *O*), надвигами (*T-P*) и взбросо-надвигами (*TV*).

В области Ферганской впадины характерны в общем те же режимы, но они изменяются на разных глубинах земной коры.

Каракуль-Балхашская зона секущих нарушений земной коры. На глубине 15 км эта зона проявляется поперечной полосой, которая характеризуется режимом взбросо-сдвиговых деформаций (*O*). Наблюдаемую в юго-восточной части Прииссыккуля область, характеризующуюся режимом взбросо-сдвиговых деформаций (*O*), по всей видимости, можно связать с проявлением Восточно-Киргизской линеаментной зоны секущих нарушений земной коры на глубине 5–15 км.

СТД на разных энергетических уровнях. Гипотеза подобия СТД на разных энергетических уровнях была проверена построением карт СТД для событий с разными энергетическими характеристиками: для слабых, средних и сильных событий. Это исследование показало, что направление главных осей напряжений не меняется в зависимости от класса событий, и основной вклад в суммарную картину (рис. 8а) вносят многочисленные землетрясения слабой мощности (5–9 класса).

Контроль полученных результатов. Этот этап работы проводился на базе данных каталога СМТ (Гарвардский университет), куда вошли 116 сейсмических событий с $4.8 < M < 6.8$, которые произошли на исследуемой территории в 1976–2003 гг. Решения фокальных механизмов очагов этих событий представлены на рис. 9а. Отмечено, что большинство событий, произошедших на Тянь-Шане – это события взбросового типа; реже встречаются сдвиги и перерезывающий или вертикальный взрзы. Построение направлений азимутов осей сжатия показало, что в целом для региона преобладающим является северо-северо-западное направление. Если рассматривать направление оси сжатия по регионам, то оно меняется от северо-западного на юго-западе исследуемой территории и до северо-восточного – на юго-востоке (рис. 9б).

По данным каталога СМТ была рассчитана и построена карта СТД, представленная на рис. 9в. Согласно полученным результатам, ось сжатия имеет в качестве преобладающего северо-северо-западное направление, и большая часть территории характеризуется режимом сжатия *T-P* и переходным режимом *TV* (от режима Thrust к режиму Vertical), что согласуется с результатами, полученными на основе исследования каталога фокальных механизмов Института сейсмологии НАН

КР (рис. 9г). Некоторые различия можно объяснить через гипотезу подобия, которая опирается на предположение, что суммарные механизмы землетрясений в различных интервалах магнитуд правильно отражают характер СТД.

Сравнение площадного распределения угла вида напряженного состояния ω по данным каталога СМТ и каталога Института сейсмологии НАН КР позволило отметить, что в целом результаты согласуются. В обоих случаях на большей части исследуемой территории значение этого угла изменяется от 30° до 60° ; на юге значения этого угла составляют 80° – 110° (рис. 9д). Проявление на севере зоны со значениями ω 80° – 110° на долготе 74° – 75° (каталог Института сейсмологии НАН КР) можно объяснить отсутствием здесь сильных землетрясений и наличием слабых. Пространственно эта зона совпадает с фрагментом Каракуль-Балхашской линеаментной зоны.

Согласно карте распределения вертикальной компоненты (рис. 9е), воздыманию подвержена вся исследуемая территория, что подтверждается как данными исследования основного каталога (рис. 6в), так и данными каталога СМТ (рис. 9е).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе представлены результаты расчетов сеймотектонических деформаций Тянь-Шаня по данным каталога фокальных механизмов Института сейсмологии НАН КР. Использование новых методик в расчетах средних механизмов СТД (включая алгоритмы и программные продукты для реализации статистического подхода к СТД по весовым коэффициентам) позволило построить более детальные карты сеймотектонических деформаций Тянь-Шаня.

Выделены зоны, характеризующиеся определенным режимом СТД; проанализированы проявления СТД на разных глубинах и энергетических уровнях; получены площадные распределения некоторых параметров, характеризующих СТД данного региона: угла вида напряженного состояния, коэффициента Лодэ-Надаи, вертикальной компоненты. Установлено, что минимальные значения угла вида напряженного состояния характерны для области к западу от Таласо-Ферганского разлома, а наиболее высокие значения – для зоны сочленения Тянь-Шаня и Памира. Площадное распределение коэффициента Лодэ-Надаи указывает на то, что практически вся исследуемая территория подвержена сжатию, причем ориентация осей сжатия в разных частях региона не одинакова и меняется от северо-западного направления к северо-восточному. Характер распределения по площади вертикальной компоненты свидетельствует о том, что значительная часть рассматриваемой территории испытывает поднятие, что особенно заметно в районе Чаткальского хребта.

Сравнение полученных результатов с расчетами СТД на базе каталога СМТ показало хорошую их совместимость как по режимам СТД, так и по площадному распределению значений угла напряженного состояния и коэффициента Луде-Надаи.

Работа частично поддержана проектом РФФИ 07-05-00436а, ISTC-2990 и программой ОНЗ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Безродный Е.М., Туйчиев Х.А.* Механизм очага сильных землетрясений Узбекистана. Ташкент: Фан. 1987. 67 с.
- Беленович Т.Я.* Определение динамики тектонических движений по напряжениям в очагах сильных землетрясений Киргизии. Методы и результаты исследований сейсмоактивных зон Киргизии. Фрунзе: Илим. 1982. С. 67–75.
- Захарова А.И., Матасова Л.Н.* Динамические параметры очагов землетрясений Восточного Узбекистана. Параметры землетрясений и очаговых зон Узбекистана. Ташкент: Фан. 1973. С. 67–84.
- Каталог механизмов очагов землетрясений Северного Тянь-Шаня. Каталог землетрясений Северного Тянь-Шаня и прилегающих территорий. Часть 1. 1975–1982. Часть 2. 1983–1987. Алма-Ата: Наука. 1990. С. 159–199, с. 174–227.
- Каталог механизмов очагов землетрясений Средней Азии и Казахстана, 1979, 1980, 1981, 1982, 1983, 1984, 1985 гг. Душанбе: Дониш. 1981, 1982, 1983, 1984, 1985, 1986, 1988.
- Костров Б.В.* Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука. 1975. 167 с.
- Кучай О.А., Юнга С.Л.* Сейсмическое скольжение по Дарваз-Каракульскому разлому // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1984. № 1. С. 39–48.
- Лопатина Т.А.* Некоторые сведения о механизме очагов землетрясений Чуйской впадины и ее горного обрамления. Опыт комплексного сейсмического районирования на примере Чуйской впадины. Фрунзе: Илим. 1975. С. 73–84.
- Лопатина Т.А., Серебрянская Т.Я.* Механизм очагов слабых землетрясений, произошедших в 1967–1973 гг. в Чуйской впадине и ее горном обрамлении. Строение земной коры и сейсмичность Северного Тянь-Шаня. Фрунзе: Илим. 1978. С. 111–125.
- Лукк А.А., Юнга С.Л.* Сейсмотектоническая деформация Гармского района // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1979. № 10. С. 24–43.
- Макаров В.И., Трифонов В.Г., Шукин Ю.К., Кучай В.К., Кулагин В.К.* Тектоническая расслоенность литосферы новейших подвижных поясов. Труды ГИН АН СССР. Вып. 359. М.: Наука. 1982. 115 с.
- Макаров В.И., Трифонов В.Г.* Аэрокосмические и неотектонические методы изучения тектонической расслоенности литосферы. Тектоническая расслоенность литосферы и региональные геологические исследования. М.: Наука. 1990. С. 130–146.
- Макаров В.И., Трапезников Ю.А., Сковородкин Ю.П., Гусева Т.В., Мишин А.В.* Современные деформации земной коры под влиянием глобальных и региональных процессов. Современные изменения в литосфере под влиянием природных и антропогенных факторов. М.: Недра. 1996. С. 7–50.
- Миколайчук А.В.* Структурная позиция надвигов в новейшем орогене Центрального Тянь-Шаня // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 7. С. 970
- Морозов Ю.А.* Структурообразующая роль транспрессии и транстензии // Геотектоника. 2002. № 6. С. 3–24. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) / Ред. Лаверов Н.П., Макаров В.И. М.: Научный мир. 2005. 400 с.
- Павленкова В.И.* Волновые поля и модели земной коры. Киев: Наукова Думка. 1973. 214 с.
- Ризниченко Ю.В.* Расчет скорости деформаций при сейсмическом течении горных масс // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1977. № 11. С. 34–47.
- Ризниченко Ю.В.* Элементарная теория вертикальных сейсмотектонических движений // Докл. АН СССР. 1976. Т. 226. № 2.
- Соколовский В.В.* Теория пластичности. М.: Высшая школа. 1969. 608 с.
- Сычева Н.А., Аладьев А.В., Мухамадиева В.А., Юнга С.Л.* Изучение фокальных механизмов очагов землетрясений по данным сети КНЕТ. Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов / Отв. ред. Гольдин С.В. и Леонов Ю.Г. Москва–Бишкек. 2003а. С. 241–253.
- Сычева Н.А., Аладьев А.В., Мухамадиева В.А., Юнга С.Л.* Исследование фокальных механизмов очагов и сейсмотектонических деформаций Северного Тянь-Шаня. Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия. Новосибирск: Изд-во СО РАН. 2003б. С. 108–112.
- Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Мухамадиева В.А.* Сейсмотектонические деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети КНЕТ) // Физика Земли. № 11. 2005. С. 62–78.
- Сычева Н.А.* Исследование особенностей механизмов очагов землетрясений и сейсмотектонических деформаций Северного Тянь-Шаня по данным цифровой сейсмической сети КНЕТ. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.: Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 2005. 176 с.
- Широкова Е.И.* Детальное изучение напряжений и разрывов в очагах землетрясений Средней Азии // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1974. № 11. С. 22–36.
- Широкова Е.И.* О напряжениях, действующих в очагах землетрясений Средней Азии // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1961. № 6. С. 876–881.
- Широкова Е.И.* Особенности механизмов очагов землетрясений средней Азии // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1979. № 10. С. 44–57.
- Юдахин Ф.Н., Чедия О.К., Сабитова Т.М. и др.* Современная геодинамика литосферы Тянь-Шаня / Под ред. Лаверова Н.П. М.: Наука. 1991. 192 с.
- Юнга С.Л.* О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу // Докл. РАН. 1997. Т. 352. № 2. С. 253–255.
- Юнга С.Л.* Методы и результаты изучения сейсмотектонических деформаций. М.: Наука. 1990. 191 с.
- Юнга С.Л.* Сравнительный анализ сейсмотектонических деформаций в областях активных геодинамических режимов. Геофизика на рубеже веков. Изд-во ОИФЗ РАН. 1999. С. 253–264.
- Sonderson D.J., Marchini W.R.D.* Transpression // Journal of Structural Geology. 1984. V. 6. № 5. P. 449–458.