

УДК [550.311:551.24] (235.21)

ОСОБЕННОСТИ СЕЙМОТЕКТОНИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ ОСЕВОЙ ЧАСТИ ТАДЖИКСКОЙ ДЕПРЕССИИ

© 2003 г. А. А. Лукк, В. И. Шевченко

Представлено академиком В.Н. Страховым 15.05.2003 г.

Поступило 26.05.2003 г.

Таджикская депрессия располагается между двумя крупнейшими горными сооружениями Центральной Азии – между Памиром и Тянь-Шанем. Эта территория находится в зоне коллизии Индийской и Евразийской литосферных плит, сближающихся со скоростью около 4–5 см/год. Такое сближение в большой степени определяет геологическое строение, сейсмичность и характер сеймотектонического деформирования зоны коллизии. Тем не менее имеются геологические, геодезические и сейсмологические указания на то, что в геодинамике земной коры Таджикской депрессии существенную роль играют локальные, автономные неплейттектонические процессы тектогенеза. По совокупности полученных данных можно утверждать, что в наблюдаемой обстановке напряженного состояния субгоризонтального сжатия происходит центробежное раздвижение материала земной коры депрессии. В качестве причины такого раздвижения предлагается увеличение объема слоистых горных пород за счет привноса в них глубинными флюидами дополнительного минерального материала из низов коры и/или верхов мантии.

Авторами на протяжении ряда лет в процессе полевых геологических и инструментальных сейсмологических наблюдений на Гармском геодинамическом полигоне ИФЗ РАН детально изучались строение и сеймотектоническая обстановка Таджикской депрессии и смежных частей Памира и Тянь-Шаня. Сводная информация о расположении основных разрывных дислокаций, сейсмичности, сеймотектоническом деформировании материала земной коры (СТД) и результатах геодезических измерений горизонтальных смещений [1, 2, 4–7, 9] на сейсмогеологическом профиле, ориентированном вкрест простирания Таджикской депрессии (с юго-юго-востока на северо-северо-запад) в пределах Гармского полигона, приведена на рис. 1.

Согласно результатам совместной интерпретации геологических и сейсмологических данных

определяющую роль в сеймотектоническом деформировании земной коры рассматриваемой территории играет напряженное состояние субгоризонтального сжатия. Под его воздействием верхняя часть земной коры рассматриваемого региона расслаивается на три основные тектонические пластины (I, II, III на рис. 1) [1, 4]. Тектонические срывы – чешуйчатые надвиги разделяют эти пластины. Две верхние пластины, сложенные практически целиком слоистыми породами кайнозоя, мезозоя и палеозоя, образуют в общем синклиналичную структуру, отвечающую Таджикской депрессии. Крутизна срывов-надвигов и разделяемых ими тектонических пластин наибольшая на крыльях депрессии и уменьшается с приближением к ее осевой части до почти субгоризонтальной ориентировки. Фронтальной части нижней пластины соответствует Кабудкрымский массив кристаллических пород фундамента Южного Тянь-Шаня. В южном направлении эта пластина уходит наклонно на глубину до 30–40 км под хр. Петра Первого. К срывам-надвигам, разделяющим тектонические пластины, тяготеют очаги землетрясений, образуя в целом три сейсмогенные дуги (рис.1).

Чешуйчатые надвиги являются определяющим типом тектонических деформаций в рассматриваемом регионе. Исключение составляет близвертикальный Дарвазский (Дарваз-Каракульский) разлом на южном крыле Таджикской депрессии. В пределах рассматриваемой территории по нему происходят левосторонние сдвиговые перемещения [3]. К Дарвазскому сдвигу приурочено плотное скопление очагов землетрясений до глубин 12–13 км. Некоторыми исследователями аналогичный близвертикальный разлом (Гиссаро-Кокшаальский) предполагается на контакте северного крыла Таджикской депрессии с Кабудкрымским массивом Южного Тянь-Шаня. Авторами настоящего сообщения он не был обнаружен ни в процессе многолетних детальных геологических исследований, ни при попытках его трассирования по скоплениям очагов землетрясений.

Реконструкция СТД земной коры вдоль рассматриваемого профиля выполнена на основе определений около 4500 фокальных механизмов для землетрясений с $M \geq 1$, произошедших во вре-

Объединенный институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта
Российской Академии наук, Москва

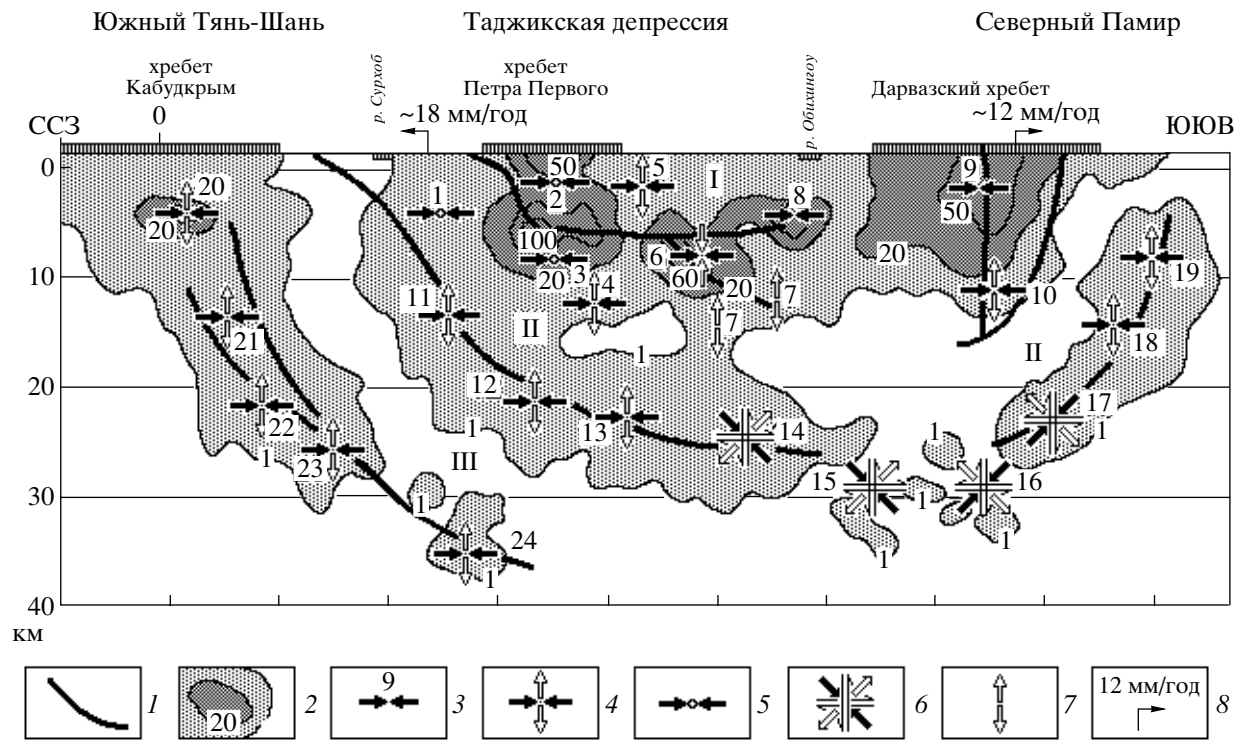


Рис. 1. Элементы тектонической структуры, направление горизонтальных перемещений геодезических пунктов, сейсмичность и схематическое отображение результатов реконструкции сейсмотектонической деформации вдоль сейсмогеологического профиля вкосте простираения Таджикской депрессии и смежных частей Памира и Тянь-Шаня на Гармском полигоне. 1 – основные разрывные нарушения (по [4]); 2 – количество гипоцентров на единицу объема (40 км^3) за период 1973–1986 гг. (по [5]); 3–7 – результаты реконструкции сейсмотектонической деформации (СТД) по совокупностям фокальных механизмов многочисленных слабых землетрясений ($M \geq 1$) (номера от 1 до 24 – соответствующие выборки, по которым выполнена оценка СТД; см. также табл. 1); 3 – одноосное горизонтальное сжатие – ось P горизонтальна, ориентация осей T и B неустойчива в силу близости в этих направлениях величин деформаций; 4 – на-двиговый тип СТД – главная ось P горизонтальна, ось T вертикальна; 5 – сдвиговый тип СТД (главные оси P и T наклонены под углом 45°); 6 – характерный для осевой части Таджикской депрессии срезовой тип СТД – обе главные оси P и T наклонены под углом 45° ; 7 – одноосное вертикальное удлинение (двухосное горизонтальное сжатие) – ось T вертикальна, направление горизонтальных осей P и B неустойчиво в силу близости в этих направлениях величин деформаций; 8 – направления и среднегодовые величины горизонтальных перемещений геодезических пунктов на крыльях Таджикской депрессии (относительно пункта в Кабудкрымском кристаллическом массиве) по геодезическим данным за период 1981–1990 гг. (учтены также результаты измерений 1967–1977 гг.) (по [2]). I, II, III – основные тектонические пластины верхней части земной коры региона.

менном интервале 1973–1986 гг. [5]. Реконструкция осуществлялась в соответствии с методикой, изложенной в [6–8]. Расчеты проводились на восьми горизонтах глубин по естественным скоплениям гипоцентров землетрясений, наблюдаемым в вертикальном сечении пространственной структуры сейсмичности в полосе шириной 30 км вдоль сейсмогеологического профиля. Минимальное количество определений механизмов в каждом отдельном скоплении не опускалось ниже 15, достигая нескольких сотен в верхних горизонтах. Результаты реконструкции СТД представлены на рис. 1 в схематизированном виде. Более полное представление дано в табл. 1. Здесь N – число индивидуальных фокальных механизмов в каждой из 24 выборок, P и T – соответственно главные оси сжатия и растяжения восстановленного тензора девиатора СТД, A_z и α – их азимут и угол отклонения от вертикали, k – коэффициент внутренней сходимости ис-

ходных данных ($0 \leq k \leq 1$), μ_M – коэффициент Лоде–Надаи ($-1 \leq \mu_M \leq +1$), характеризующий вид СТД (-1 – одноосное растяжение, 0 – чистый сдвиг (скол) в механическом смысле, $+1$ – одноосное сжатие). Данные табл. 1 разнесены в три подраздела (верхняя сейсмогенная дуга, средняя сейсмогенная дуга и нижняя сейсмогенная дуга) в соответствии со скоплениями гипоцентров на плоскости вертикального сечения на рис. 1. Следует заметить, что в схематизированных решениях СТД на рис. 1 усредненные наклоны осей P могут отличаться от расчетных не более чем на 15° – 20° (в среднем на 10°), а наклоны осей T – не более чем на 25° – 30° (в среднем на 17°).

Внутренняя сходимость оценок параметров СТД, описываемая коэффициентом k , определяется в подавляющем большинстве случаев величиной $k = 0.47 \pm 0.11$. Это свидетельствует о достаточно высокой устойчивости полученных оценок.

Таблица 1. Параметры тензора сейсмоструктурной деформации для различных сейсмогенных объемов в окрестности сейсмогеологического профиля

Номера выборок	N	P		T		k	μ_M	Тип деформации
		Az	α	Az	α			
Верхняя сейсмогенная дуга								
1	57	334°	71°	072°	66°	0.26	0.29	Сдвиг
2	240	132	82	230	50	0.25	0.36	Сдвиго-надвиг
3	1304	310	90	220	78	0.47	0.40	Сдвиго-сжатие
4	36	333	88	237	23	0.51	0.26	Надвиг
5	230	129	74	243	26	0.30	0.17	Надвиг
6	364	139	84	239	25	0.33	0.01	Надвиг
7	137	154	80	334	10	0.35	-0.40	Двухосное сжатие
8	110	340	88	250	78	0.35	0.42	Сдвиго-сжатие
9	543	337	83	217	15	0.37	0.58	Сжатие
10	98	333	74	174	21	0.32	0.49	Сжатие-надвиг
Средняя сейсмогенная дуга								
11	20	313	83	133	07	0.40	0.50	Сжатие-надвиг
12	44	359	70	211	29	0.52	-0.16	Надвиг
13	31	355	73	177	17	0.62	-0.21	Надвиг
14	101	355	55	175	35	0.67	0.01	Срез
15	34	345	60	172	31	0.61	0.05	Срез
16	16	158	49	338	41	0.62	0.05	Срез
17	59	152	65	360	27	0.60	0.15	Срез
18	15	343	76	142	16	0.29	-0.06	Надвиг
19	19	162	87	024	05	0.56	0.05	Надвиг
Нижняя сейсмогенная дуга								
20	167	137	84	314	06	0.54	0.25	Надвиг
21	35	152	82	41	14	0.42	0.33	Надвиг
22	29	325	89	58	16	0.51	-0.15	Надвиг
23	43	157	75	18	15	0.56	-0.05	Надвиг
24	28	145	81	329	12	0.51	0.15	Надвиг

Примечание. В названиях типов деформации "сжатие" означает одноосное сжатие за единственным исключением для выборки 7.

В целом для рассматриваемого сейсмогеологического профиля (и для всей Таджикской депрессии в районе Гармского полигона в целом) наиболее устойчивой характеристикой реконструируемого тензора СТД является ориентация оси главного сжатия (P). Она в основном близгоризонтальна, а ее азимуты за редкими исключениями заключены в достаточно узком диапазоне $337^\circ(157^\circ) \pm 13^\circ$. Это направление близко к простиранию плоскости рассматриваемого профиля и практически ортогонально к простиранию основных геологических структур (~СВ 70°). Наибольшие значения азимутов оси P отмечаются в основном для структур Северного Памира (выборки 7–10, 12–19 в табл. 1). Ориентация оси растяжения (минимального сжатия) T существенно менее устойчива. Коэффициенты Лодэ–Надаи μ_M , определяющие вид деформированного

состояния, по преимуществу положительные и не превышают значения 0.58. Вид деформированного состояния по преимуществу сколовый, поскольку большинство значений μ_M близко к 0. Учитывая наклоны главных осей сжатия и растяжения соответствующих тензоров по отношению к дневной поверхности, можно от чисто механических представлений о сколах перейти к их геологической интерпретации. В таком случае сколы могут быть разделены на три разновидности, наблюдаемые в пределах полигона: надвиговую, когда ось P близгоризонтальна, а ось T близвертикальна ($\pm 25^\circ$); чисто сдвиговую (в геологическом смысле), определяемую близгоризонтальным положением ($\pm 25^\circ$) обеих главных осей – сжатия (P) и растяжения (T); срезовую (перерезывающую), при которой обе оси P и T наклонены под углом

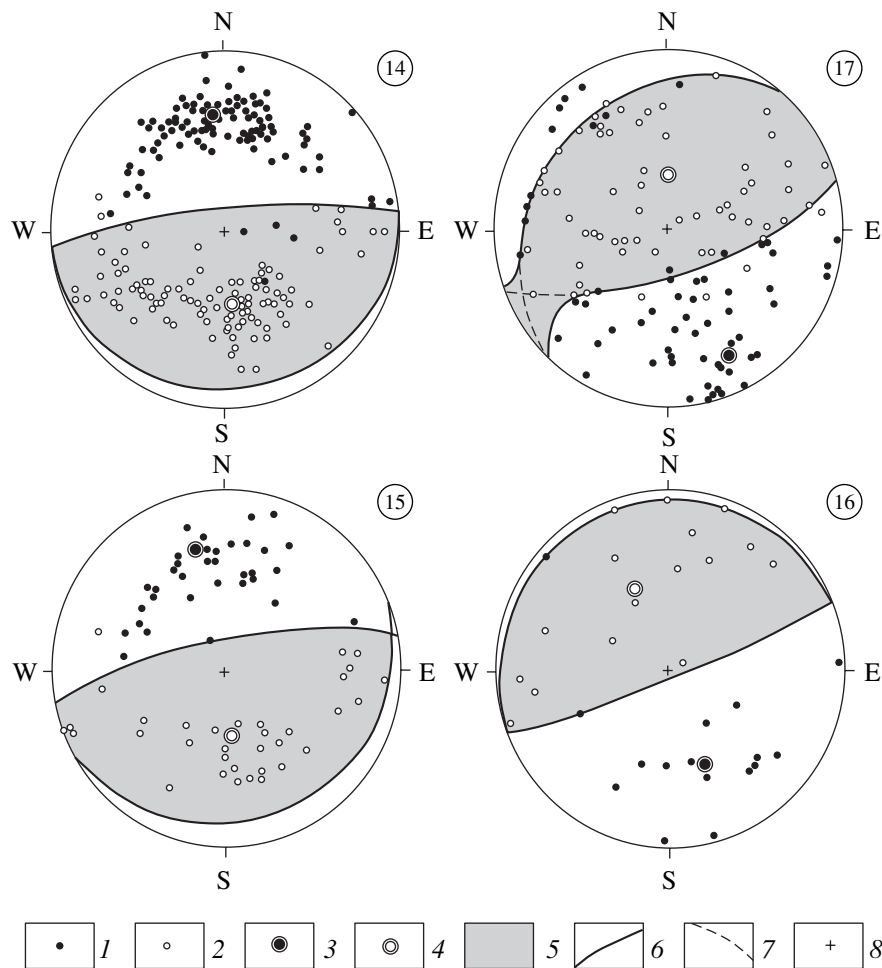


Рис. 2. Стереографические равноплощадные проекции в верхней полусфере тензора сейсмотектонического напряженно-деформированного состояния осевой части Таджикской депрессии (выборки 14–17). 1, 2 – выходы на поверхность сферы осей сжатия (1) и растяжения (2) индивидуальных фокальных механизмов; 3, 4 – выход на поверхность сферы главной оси сжатия (3) и главной оси растяжения (4) полученного решения; 5 – область растяжения (удлинения); 6 – следы пересечения с поверхностью фокальной сферы разделяющих нодальных плоскостей (поверхностей); 7 – следы пересечения с поверхностью фокальной сферы двух взаимно перпендикулярных нодальных плоскостей в случае, когда полученное решение “среднего фокального механизма” существенно лучше интерпретируется нодальной поверхностью гиперболического конуса; 8 – центр равноплощадной стереографической проекции.

$45^\circ \pm 10^\circ$, а возможные плоскости скольжения (среза) могут быть ориентированы субвертикально или субгоризонтально.

При этом преобладающим является надвиговый тип деформирования во всем сейсмогенном объеме в центральной части Таджикской депрессии. На северном крыле депрессии в пределах хр. Петра Первого тип напряженно-деформированного состояния в верхней сейсмогенной дуге изменяется от сдвига-сжатия до сдвига-надвига. Тем самым можно утверждать, что определяющим в сейсмотектоническом деформировании рассматриваемой территории является явное преобладающее субгоризонтальное сжатие. Практически чистое субгоризонтальное сжатие ($\mu_M = 0.58$) наблюдается лишь в пределах Дарвазского сдвига (выборка 9) в верхнем этаже земной коры (0–8 км). На глуби-

нах 8–13 км (выборка 10) роль одноосного сжатия в пределах Дарвазского разлома несколько ослабевает ($\mu_M = 0.49$) и тип сейсмотектонического деформирования определяется в табл. 1 как сжатие-надвиг. Интересно отметить, что на больших глубинах сейсмичность в его окрестности резко прекращается. Это дало нам ранее основание предположить, что обсуждаемый разлом не проникает на эти глубины, а подрезается снизу плоскостью чешуйчатого надвига.

На глубинах 20–35 км под Дарвазским разломом в осевой части Таджикской депрессии вновь появляется рассеянная сейсмичность (участки 14–17). По малочисленным ранее фокальным механизмам землетрясений этой части земной коры региона был установлен не характерный для остальной территории исследуемого региона тип сейсмотек-

тонического деформирования [5, 9]. Для этих участков, статистически слабо представленных в предыдущих исследованиях, мы заново провели оценки параметров СТД по всему временному интервалу (1962–1992 гг.) имеющегося теперь в нашем распоряжении каталога определений фокальных механизмов землетрясений рассматриваемой территории. Соответствующие численные решения СТД для этих участков выделены жирным шрифтом в табл. 1, а их графические представления в равноплощадной стереографической проекции приведены на рис. 2.

Во всех четырех пространственных выборках обе главные оси сжатия и растяжения наклонены к горизонту под углами, близкими к 45° , одна из нодальных плоскостей ориентирована близвертикально, а вторая близгоризонтально. Крайне важно отметить, что одноименные оси наклонены в разные стороны в скоплениях очагов, расположенных севернее (участки 14 и 15) и южнее (участки 16 и 17), по разные стороны от наиболее прогнутой части Таджикской депрессии. Подобное представление характера деформирования материала земной коры на этих глубинах предполагает две альтернативные возможности. В случае субвертикальных плоскостей скольжения материал наиболее погруженной и крайне слабо сейсмичной части средней сейсмогенной дуги должен подниматься вверх в виде единого блока или системы блоков. Однако имеющиеся геологические и геодезические данные не подтверждают такое построение. Предполагаемому поднимающемуся блоку на самом деле отвечает Тавильдаринский прогиб – осевая, наиболее прогнутая часть Таджикской депрессии. Следствием же реализации альтернативных субгоризонтальных плоскостей скольжения будет дивергентное раздвижение материала в стороны от осевой части Тавильдаринского прогиба. Это согласуется с предполагавшейся по геологическим данным кинематикой чешуйчатых надвигов в рассматриваемой части Таджикской депрессии. Центробежное раздвижение материала верхней части земной коры подтверждается также результатами геодезических светодальномерных измерений [2] (рис. 1).

Следует заметить, что такой вид деформированного состояния осевой части Таджикской депрессии никак не укладывается в рамки представлений о роли сближения Индийской и Евразийской литосферных плит в геодинамике региона. Нам представляется, что такое центробежное раздвижение материала земной коры, происходящее в обстановке напряженного состояния субгоризонтального сжатия, может быть непротиворечиво объяснено только тогда, если допустить, что в Таджикской депрессии происходит локальное увеличение объема слоистых горных пород. Су-

ществуют основания, позволяющие предположить, что это может быть связано с привнесом в них глубинными флюидами дополнительного минерального материала из низов коры и/или мантии. При пассивном сопротивлении смежных частей земной коры такому увеличению объема появляются напряжения субгоризонтального сжатия (точнее – субгоризонтального распора), дополнительные к тому, которое связано со сближением Евразийской и Индийской литосферных плит.

Если гипотеза о поступлении дополнительного материала с больших глубин в осевую часть Таджикской депрессии верна, то здесь можно ожидать существенно иного физико-химического состояния и, как следствие, иного упругого состояния материала земной коры. Горные породы на этих глубинах в таком случае могут оказываться существенно более пластичными и менее способными к хрупкому разрушению, сопровождаемому сейсмичностью. Это отсутствие ярко выраженной сейсмичности мы и наблюдаем здесь в действительности. Достаточно указать, что в пределах слабосейсмогенных областей 15 и 16 в наиболее погруженной части средней сейсмогенной дуги за 30-летний период с 1962 по 1991 г. произошло всего лишь 49 землетрясений. Магнитуда сильнейшего из них не превышала $M = 3.5$. Возможно, что с этой же реологической причиной связано отсутствие землетрясений на глубинах более 13 км на протяжении на глубину плоскости Дарвазского разлома. В этом смысле можно говорить о существовании в осевой части Таджикской депрессии некоей глубинной зоны изменения упругих свойств земной коры, а возможно, и верхов мантии.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований 02–05–64713.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусева Т.В., Лукк А.А., Певнев А.К. и др. // Физика Земли. 1983. № 7. С. 10–26.
2. Гусева Т.В., Лукк А.А., Трапезников Ю.А., Шевченко В.И. // Геотектоника. 1993. № 3. С. 47–54.
3. Кучай В.К., Трифонов В.Г. // Геотектоника. 1977. № 3. С. 91–105.
4. Лукк А.А., Шевченко В.И. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. № 7. С. 16–33.
5. Лукк А.А., Шевченко В.И. // ДАН. 1989. Т.306. № 2. С. 317–321.
6. Лукк А.А., Юнга С.Л. Геодинамика и напряженно-деформированное состояние литосферы Средней Азии. Душанбе: Дониш, 1988. 234 с.
7. Лукк А.А., Юнга С.Л. // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 6. С. 14–26.
8. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сейсмоструктурных деформаций. М.: Наука, 1990. 191 с.
9. Lukk A.A., Shevchenko V.I. // J. Geodyn. 1988. V. 9. P. 239–246.