

## ИЗУЧЕНИЕ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ ЧАТКАЛЬСКОЙ ГОРНОЙ ЗОНЫ ЗАПАДНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

Освещены результаты изучения напряженно-деформированного состояния земной коры Чаткальской горной зоны западного Тянь-Шаня. В первом приближении оценены основные и палеонапряжения для отдельных участков региона. Для анализа напряжений использованы методы математического моделирования, тектонофизический метод реконструкции полей напряжений и метод восстановления напряжений по механизмам землетрясений. Проведены сравнения с результатами сейсмотектонических исследований, с компонентами напряжений, измеренными в горных выработках в местах разработок полезных ископаемых, а также с результатами лабораторных измерений деформаций пород при высоких давлениях.

**Ключевые слова:** напряженно-деформированное состояние; земная кора; Чаткальская горная зона; западный Тянь-Шань; математическое моделирование; тектонофизический метод; механизмы землетрясений.

### *Введение*

Основной целью статьи является освещение исследований по изучению напряженно-деформированного состояния земной коры на территории перехода от Туранской платформы в Тянь-Шаньскую орогенную зону Центральной Азии. Выделение отдельным образом участков западного Тянь-Шаня для целей изучения напряжений является весьма условными, так как изменение локального силового поля выбранного участка обусловлено известными регионально-континентальными силами. Их механическое действие и влияние на исследуемый участок нами выбрано условно линейным.

### *Физико-географический очерк территории*

Территория западного Тянь-Шаньского орогена Центральной Азии в сейсмотектоническом отношении является достаточно сложной. В этой зоне расположено большое количество сейсмоактивных разломов, по которым и в настоящее время идут медленные криповые движения со скоростью от 4 мм/год до 10 мм/год. Средняя толщина земной коры в регионе – от 35 до 40 км. В течении последних 100 лет в этой зоне и вблизи нее произошли 6 землетрясений с  $M > 6$  (Коканд, 1823,  $M=6,5$ ; Ташкент, 1868,  $M=6,5$ ; Чаткал, 1896,  $M=6,6$ ; Андижан, 1902,  $M=6,4$ ; Наманган, 1927,  $M=6,0$ ; Чаткал, 1946,  $M=7,5$ ; Суусамир, 1992,  $M=7,5$ ) с интенсивностью в эпицентральной зоне  $J=6-8$  баллов по шкале Рихтера, полностью разрушившие эти поселения. Здесь же произошли более 15 землетрясений с  $M > 5$ , причинившие разрушения и нанесшие ущерб для экономики, основные из которых – Ташкентские (1886, 1924, 1938, 1966, 2008 гг.) Бурчумуллинское (1959 г.), Таваксайское (1977 г.), Назарбекское (1980 г.).

### *Постановка задачи*

Определение внутренних сил, генерирующих сейсмотектонические процессы, является основ-

ной задачей для тектонофизики. В настоящей работе в первом приближении оценены как действующие, так и палеонапряжения для отдельных участков западного Тянь-Шаня, используя методы математического моделирования, тектонофизический метод реконструкции напряжений и восстановления истинных напряжений по механизмам землетрясений. Сравнения проведены с результатами сейсмотектонических исследований, с измеренными в горных выработках и местах разработки полезных ископаемых компонентами напряжений и с результатами измерения деформаций в лабораторных условиях при высоких давлениях.

Для проведения геомеханического анализа напряжений выбран участок Чаткальских гор и примыкающая к нему территория из западного Тянь-Шаня, для которой были получены надежные данные о современных движениях, точные данные о физико-механических свойствах горных пород, геофизические и др. параметры.

### *Методика исследований*

К настоящему времени разработаны разные методы определения напряжений в земной коре. Среди них наиболее развитыми являются: тектонофизический [Гзовский, 1975; Николаев, 1992], сейсмотектонический [Губин, 1987], фотоупругое моделирование [Физические..., 1980], геологоструктурный метод [Шерман, 1985], сейсмологический [Введенская, 1969; Юнга, 1990], математическое моделирование [Кондауров, Никитин, 1990], натурное измерение в горных выработках [Шемякин, 1987].

В данной работе для определения полей напряжений использованы следующие методы: тектонофизический, сейсмотектонический и математическое моделирование.

### *Тектонофизический метод*

Этот метод основан на реконструкции полей напряжений и определении палеонапряжений, ос-

новываясь на полевых тектонофизических съемках. На основе измерений и определений уровней трещиноватости, углов падения и азимутов каждой площадки разрыва в каждом обнажении по простиранию горных хребтов или разломов восстанавливается характер и уровень действовавших напряжений для разных периодов тектонического развития региона. Также строятся локальные и генеральные карты направлений главных напряжений и выделяются отдельно палео- и современные напряжения [Хамидов, 1987].

Выделяются основные направления главных напряжений и реконструируется качественная картина распределения напряжений для каждого возрастного уровня. Выделяются направления сжатия и растяжения (механизм) для каждого обнажения по возрастам пород, образование трещиноватости (с определением основных тектонических фаз – (каледонской, герцинской и т.д., до новейшего этапа)). Трудоемкость проведения таких работ очевидна.

**Математическое моделирование**

При математической формализации путем численного моделирования решается квазистатическая задача о концентрации напряжений в изотропной среде, для полупространства с внутренними произвольно расположенными кусковатыми неоднородностями (включения, трещины и др.) в поле действующих упругих (сжимающих или сдвигающих) сил.

Этот метод основан на математических моделях, численно реализующих краевую задачу теории упругости [Хамидов, 1988; Хамидов, Алимова, 1989].

Полупространство, поверхность которого свободна от нагрузок, подвержено горизонтальному сжатию (или сдвигу). Внутри полупространства имеются цилиндрические концентраторы напряжений типа:

а) трещины сдвига (большой протяженности, на бортах – условия трения покоя Кулона, непрерывность смещений по нормали к поверхности трещины, расположены под углом к поверхности полупространства, выбраны как аналог активного разлома или разломной зоны);

б) включения (большой протяженности, жесткие или мягкие, на границе условия жесткого сцепления, расположены субвертикально, возможность варьирования модуля сдвига внутри включения, выбраны как аналог неактивных разломов и как кусковатая неоднородность);

в) физические щели (средней протяженности, с большим участком сдвигового контакта, не кон-

тактирующиеся участки имеют мягкий заполнитель, где модуль сдвига достаточно уменьшен).

Полагаем, что жесткое упругое полупространство с напластованными сверху более мягкими плоскопараллельными слоями ослаблено несколькими неортогональными (в частном случае ортогональными) цилиндрическими неоднородностями большой протяженности типа (а), (б) и (в), испытывает на всем протяжении продольный сдвиг, а также сжатие на бесконечности, задаваемое в виде однородной деформации.

Пусть полупространство, имеющее внутренние цилиндрические концентраторы напряжений, находится в плоско деформированном состоянии. Тогда, выбрав центр прямоугольных координат так, чтобы одна ось была направлена по оси концентратора, а остальные – по условию выбора правой системы, придем к статической задаче для уравнения равновесия Ламе:

$$(\lambda + \mu)\text{grad}(\text{div}W) + (\lambda + 2\mu)\nabla^2 W = 0; \quad (1)$$

где  $W\{u, v, w\}$ :  $u=u(x, y, z)$ ;  $v=v(x, y, z)$ ;  $w=w(x, y, z)$  компоненты перемещений;  $\lambda, \mu$  – упругие постоянные Ламе с условиями на границе:

$$\begin{aligned} \sigma_{nn}^{(i)} &= \sigma_{nn}^{(i+1)}; W_1^i = W_2^i; \\ \sigma_{ns}^{(i)} &= \sigma_{ns}^{(i+1)}; \end{aligned} \quad (2)$$

– для сочетания (б) и участков (в) групп концентраторов;

$$\sigma_{nn}^{(i)} = \sigma_{nn}^{(i+1)}; W_1^i = W_2^i; \sigma_{nn}^{(i)} = k\sigma_{ns}^{(i)}; \quad (3)$$

– для сочетания (а) и участков (в) групп концентраторов. Здесь  $\sigma_{ij}^{(i)}$  –  $ij$ -тые компоненты напряжений в  $i$ -том концентраторе;  $k$  – коэффициент Кулона (трение покоя).

$$\sigma_{nn} = 0; \sigma_{ns} = 0; \quad (4)$$

– на свободной поверхности.

$$\varepsilon_{xx/x \rightarrow \infty} = \varepsilon_0; \quad (5)$$

Основным напряженным состоянием будет область без концентратора, тогда дополнительные (местные) напряжения появляются за счет наличия нескольких разрывов:

$$\sigma_{pq} = \sigma_{pq}^0 + \sigma_{pq}^* + \sigma_{pq}^{**}; p \sim q \sim (1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

Решение уравнений равновесия Ламе (1) при указанных выше граничных условиях реализовано методом источников и стоков.

Выражения (2) и (3) сформулированы по отношению к выбранной системе, которую назовем местной, а уравнение (1), условия (4) и (5) – по отношению к исходной системе координат, центр которой расположен на свободной поверхности над центром первого концентратора. Пользуясь законом Гука и формулами Коши, а также используя аффинное преобразование, условия на границе запишем в деформациях:

$$\begin{aligned} & [(\lambda_1 + 2\mu_1 \cos^2 \alpha) \mathbf{I}_1^2 + (\lambda_1 + 2\mu_1 \sin^2 \alpha) m^2 - \mu_1 \mathbf{I}_1^\pm m^\pm \sin 2\alpha] \varepsilon_{xx}^{(1)} - [(\lambda_2 + 2\mu_2 \cos^2 \alpha) \mathbf{I}_1^2 + (\lambda_2 + 2\mu_2 \sin^2 \alpha) m^2 - \mu_2 \mathbf{I}_1^m m^m \times \\ & \times \sin 2\alpha] \varepsilon_{xx}^{(2)} + [(\lambda_1 + 2\mu_1 \cos^2 \alpha) \mathbf{I}_1^2 + (\lambda_1 + 2\mu_1 \sin^2 \alpha) m^2 - \mu_1 \mathbf{I}_1^\pm m^\pm \sin 2\alpha] \varepsilon_{yy}^{(1)} - [(\lambda_2 + 2\mu_2 \cos^2 \alpha) \mathbf{I}_1^2 + (\lambda_2 + 2\mu_2 \sin^2 \alpha) m^2 - \\ & - \mu_2 \mathbf{I}_1^m m^m \sin 2\alpha] \varepsilon_{yy}^{(2)} + 2\mu_1 [(\mathbf{I}_1^2 + m^2) \sin^2 \alpha + \mathbf{I}_1^\pm m^\pm \cos 2\alpha] \varepsilon_{xy}^{(1)} - 2\mu_2 [(\mathbf{I}_1^2 + m^2) \sin^2 \alpha + \mathbf{I}_1^m m^m \cos 2\alpha] \varepsilon_{xy}^{(2)} = \end{aligned}$$

$$= \varepsilon_0 [2\mu_1 \mathbf{I}_1^\pm m_1^\pm \sin 2\alpha - (\lambda_1 + 2\mu_1 \cos^2 \alpha) \mathbf{I}_1^\pm + (\lambda_1 + 2\mu_1 \sin^2 \alpha) m_1^2];$$

$$2\mu_1 [\mathbf{I}_1^\pm m_1^\pm \cos 2\alpha - (\mathbf{I}_1^2 + m_1^2) \sin 2\alpha] \varepsilon_{xx}^{(1)} - 2\mu_2 [\mathbf{I}_1^m m_1^m \cos 2\alpha - (\mathbf{I}_1^2 + m_1^2) \sin 2\alpha] \varepsilon_{xx}^{(2)} + 2\mu_1 [(\mathbf{I}_1^2 + m_1^2) \sin 2\alpha - \mathbf{I}_1^\pm m_1^\pm \times \\ \times \cos 2\alpha] \varepsilon_{yy}^{(1)} - 2\mu_2 [(\mathbf{I}_1^2 + m_1^2) \sin 2\alpha - \mathbf{I}_1^m m_1^m \cos 2\alpha] \varepsilon_{yy}^{(2)} + 2\mu_1 [(\mathbf{I}_1^2 + m_1^2) \cos 2\alpha - 2\mathbf{I}_1^\pm m_1^\pm \sin 2\alpha] \varepsilon_{xy}^{(1)} - 2\mu_2 [(\mathbf{I}_1^2 + m_1^2) \times \\ \times \cos 2\alpha - 2\mathbf{I}_1^m m_1^m \sin 2\alpha] \varepsilon_{xy}^{(2)} + k_s \{ [(\lambda_1 + 2\mu_1 \cos^2 \alpha) \mathbf{I}_1^\pm + (\lambda_1 + 2\mu_1 \sin^2 \alpha) m_1^2 - 2\mu_1 \mathbf{I}_1^\pm m_1^\pm \sin 2\alpha] \varepsilon_{xx}^{(1)} + [(\lambda_1 + 2\mu_1 \sin^2 \alpha) \mathbf{I}_1^\pm + \\ + (\lambda_1 + 2\mu_1 \cos^2 \alpha) m_1^2 - 2\mu_1 \mathbf{I}_1^\pm m_1^\pm \sin 2\alpha] \varepsilon_{yy}^{(1)} + 2\mu_1 [(\mathbf{I}_1^2 + m_1^2) \sin^2 \alpha + \mathbf{I}_1^\pm m_1^\pm \cos 2\alpha] \varepsilon_{xy}^{(1)} \} = 2\varepsilon_0 \{ \mu_1 [(\mathbf{I}_1^2 + m_1^2) \sin 2\alpha - \\ - \mathbf{I}_1^\pm m_1^\pm \cos 2\alpha] + k_s \mathbf{I}_1^\pm m_1^\pm \sin 2\alpha - (\lambda_1 + 2\mu_1 \cos^2 \alpha) \mathbf{I}_1^\pm - (\lambda_1 + 2\mu_1 \sin^2 \alpha) m_1^2 \};$$

$$(u^{(1)} \mathbf{I}_1^\pm - u^{(2)} \mathbf{I}_1^m - v^{(1)} m_1^m + v^{(2)} m_1^m) \cos \alpha + (v^{(1)} \mathbf{I}_1^m - v^{(2)} \mathbf{I}_1^\pm - u^{(1)} m_1^\pm + u^{(2)} m_1^m) \sin \alpha = -\varepsilon_0 [(x \cos^2 \alpha + y \sin^2 \alpha) \mathbf{I}_1^\pm - 2(x+y) \times \\ \times m_1^m \sin 2\alpha];$$

$$(v^{(1)} \mathbf{I}_1^m - v^{(2)} \mathbf{I}_1^\pm - u^{(1)} m_1^\pm + u^{(2)} m_1^m) \cos \alpha - (u^{(1)} \mathbf{I}_1^\pm - u^{(2)} \mathbf{I}_1^m + v^{(1)} m_1^m + v^{(2)} m_1^\pm) \sin \alpha = -\varepsilon_0 [2(x-y) \mathbf{I}_1^\pm \sin 2\alpha - (x \cos^2 \alpha - y \sin^2 \alpha) \times \\ \times m_1^m];$$

$$[(\lambda_1 + 2\mu_1) \varepsilon_{xx}^{(1)} + \lambda_1 \varepsilon_{yy}^{(1)}] \mathbf{I}_2^2 + [(\lambda_1 + 2\mu_1) \varepsilon_{yy}^{(1)} + \lambda_1 \varepsilon_{xx}^{(1)}] m_2^2 + 2\mu_1 \varepsilon_{xy}^{(1)} \mathbf{I}_2^\pm m_2^m = -\varepsilon_0 [(\lambda_1 + 2\mu_1) (\mathbf{I}_2^2 \cos \alpha + m_2^2 \sin \alpha) + \lambda_1 \times \\ \times (\mathbf{I}_2^2 \sin \alpha + m_2^2 \cos \alpha)];$$

$$\mu_1 \varepsilon_{xy}^{(1)} (\mathbf{I}_2^2 + m_2^2) + 2\mu_1 \mathbf{I}_2^\pm m_2^m (\varepsilon_{yy}^{(1)} - \varepsilon_{xx}^{(1)}) = 2\varepsilon_0 \mu_1 (\sin \alpha + \cos \alpha) \mathbf{I}_2^\pm m_2^m; \quad (7)$$

$$\text{где: } \mathbf{I}_i^\pm = \frac{r_x}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}}; \quad m_i^\pm = \frac{r_y}{\sqrt{r_x^2 + r_y^2}}; \quad r = \{r_x[f_i(x)], r_y[f_i(x)]\};$$

Все уравнения и граничные условия сведены к безразмерному виду. В качестве тензора фундаментальных решений использованы: для плоскодеформированного состояния – решение Кельвина, для полупространства – решение Миндлина.

Решения представлены в смещениях, например для полупространства:

$$u_{11}^c = K_d \left[ \frac{8(1-n)^2 - (3-4n)}{R} + \frac{(3-4n)R_1^2 - 2c\bar{x}}{R^3} + \frac{6c\bar{x}R_1^2}{R^5} \right];$$

$$u_{12}^c = \frac{r_1}{r_2} u_{21}^c;$$

$$u_{21}^c = K_d r_2 \left[ \frac{(3-4n)}{R^3} + \frac{4(1-n)(1-2n)}{R(R+R_1)} - \frac{6c\bar{x}R_1}{R^5} \right];$$

$$u_{22}^c = K_d \left[ \frac{1}{R} + \frac{(3-4n)r_2^2}{R^3} + \frac{2c\bar{x}}{R^3} \left( 1 - \frac{3r_2^2}{R^2} \right) + \frac{4(1-n)(1-2n)}{R+R_1} \left( 1 - \frac{r_2^2}{R(R+R_1)} \right) \right];$$

$$u_{23}^c = K_d r_2 r_3 \left[ \frac{3-4n}{R^3} - \frac{4(1-n)(1-2n)}{R(R+R_1)^2} - \frac{6c\bar{x}}{R^5} \right];$$

$$u_{31}^c = \frac{r_3}{r_2} u_{21}^c; \quad u_{32}^c = u_{23}^c;$$

$$u_{33}^c = K_d \left[ \frac{1}{R} + \frac{(3-4n)r_3^2}{R^3} + \frac{2c\bar{x}}{R^3} \left( 1 - \frac{3r_3^2}{R^2} \right) + \frac{4(1-n)(1-2n)}{R+R_1} \left( 1 - \frac{r_3^2}{R(R+R_1)} \right) \right];$$

где  $i = 1, 2, 3; R = (R_i R_1)^{1/2}; r_i = x_i(x) - x_i(x);$

$$R_i = x_i(x) - x_i(x''); \quad c = x_1(x) \geq 0;$$

$$\bar{x} = x_1(x) \geq 0; \quad K_d = \frac{1}{16p(1-n)G}. \quad (8)$$

Решения записаны как сумма для двух или трех задач о действии вертикальной и горизонтальной

сосредоточенной силы в полупространстве

$$U_i = \int_{\Delta_{u_i}} \{ G_{i1}^+(x, y, x_0^+) Q'(x_0^+) + G_{i2}^+(x, y, x_0^+) P'(x_0^+) \} dS_{\Delta_{u_i}} + \\ + \int_{\Delta_{u_i}} \{ G_{i1}^-(x, y, x_0^-) Q'(x_0^-) + G_{i2}^-(x, y, x_0^-) P'(x_0^-) \} dS_{\Delta_{u_i}} + e_0 x;$$

и

$$Q = \frac{dQ}{dx_0}; \quad P' = \frac{dP}{dx_0}. \quad (9)$$

Здесь искомыми величинами являются мощности источников (мощности потенциала простого слоя для каждой точки наложения сосредоточенной силы).

При этом расстояние между центрами концентраторов равно:

$$r(\Gamma_i, \Gamma_{i+1}) = l(q_{\Delta_i}, q_{\Delta_{i+1}}, x_{\Delta_i}, y_{\Delta_{i+1}})$$

Полученные решения в смещениях тождественно удовлетворяют систему уравнений равновесия Ламе, независимо от плотности потенциалов простого слоя. Мощности источников определяются из граничных условий, которые сводятся к системам интегральных уравнений I-рода Фредгольмовского типа. Эти мощности полностью зависят от условий распределения источников (сосредоточенных сил) на границе, где заданы условия задачи, т.е. при непрерывном распределении или точном решении полученных систем интегральных уравнений получим аналитическое решение задачи. Однако в данном случае серьезные проблемы создают условия сингулярности ядер интегральных уравнений. Поэтому нами введено условие дискретной реализации решения систем интегральных уравнений, пользуясь переходом от интегралов к конечным суммам. При этом система интегральных уравнений сведена к решению не-

однородной системы линейных алгебраических уравнений [Хамидов, Зиявитдинов, 1993]. Граница распределения сосредоточенных сил сдвинута на малое расстояние  $\{x_0, y_0\} \supset (\Delta\xi + \xi) \in \Gamma_i$ , которое является в ходе получения решения задач искомой величиной. Этот подход избавляет нас от особенностей, появляющихся на узловых точках наложения сосредоточенных сил, но сводит основную матрицу к плохо обусловленной. Для решения этих систем уравнений применен метод регуляризации. Нами математически определены пределы параметра регуляризации для подобных случаев [Хамидов, 1975]. В результате решения получим возможность расчета всех компонент напряжений, деформаций и смещений в любой точке пространства в реальной системе координат.

Исходными данными являются:

- 1.) геометрические параметры (длина – а, глубина – h, малая ширина – b, угол наклона разломов –  $(\alpha, \beta, \dots)$ , количество кусков – m, узлов – n и географическое их расположение –  $(\lambda^0, \varphi^0$ , можно в палетке), масштабы представления –  $r(\Gamma_i, \Gamma_{i+1})$ ;
- 2.) уровень максимальных деформаций в год –  $\Delta\epsilon_0$ , геодезические данные о современном вертикальном движении области –  $V_{0j}$ , максимальное количество землетрясений в этой области –  $N_{\max}$ , количество сбросов напряжений –  $\Delta\sigma_j$ .
- 3.) осредненные значения плотности –  $\rho_{cp}$ , коэффициента Пуассона –  $\gamma_{cp}$  и модуля сдвига или упругости – E (в определенных случаях оценка этих величин проводится с использованием записи продольных и поперечных волн или данных экспериментальных определений при высоких давлениях и температурах).

Из (9), подставив соответствующие выражения решения для математической модели произвольного внутреннего концентратора и вычитая решение для области без концентратора, получим разницу двух состояний. Таким способом в [Бакиев, Хамидов, 2001] определены соответствующие связи деформации и напряжения с магнитудой землетрясения, которому отвечает сброс (или вариация двух напряженных состояний), даны оценки силы в приразломных зонах:

$$S_{xy} = \sum_{u=1}^2 \left\{ -\frac{3V_i \Delta S_i}{2pr^3} [G(x, y, r)] \right\},$$

где

$$G(x, y, r) = \frac{3r^2 - H^2}{2r^2} - \frac{15x^2 y^2}{r^4} + \frac{1-2n}{2(r+H)^2} G_2(r);$$

$$G_2(r) = 6r^2 - 4H^2 + \frac{4x^2 y^2 (5r + 2H)^2}{r(r+H)} + \frac{(r^4 + x^4 + y^4 - H^4)(5r + 2H)}{r^2(r+H)};$$

и  $V_i$  – объем очаговой зоны,

$V_i = 10^{1.24M_i - 4.47}$  км<sup>2</sup> (по Ризниченко [Ризниченко, 1985]),

$\Delta S_1 = k_{s1} I e_0$  – сброшенное напряжение (разница двух упругих состояний при наличии первого разрыва),

где  $k_{s1} \sim \text{tg } a$ ,

$\Delta S_2 = k_{s2} I e_0$  – сброшенное напряжение при наличии второго разрыва,

где  $k_{s1} \sim \text{tg } b_{s2}$ .

Пользуясь выражением [Уломов, 1979]:

$$e_0 = \frac{\sqrt{2V_0}}{\sqrt{mV_i}};$$

запишем:  $V_0 = 10^{8+1.1M}$  и:  $\lg \Delta S = +0,19M + 0,36$ ;

подставив эти выражения вместо  $\Delta S_{xy}$ ,  $\Delta S$  и  $e_0$ , с учетом

$$m = \frac{E}{2(1+n)}; E = V_p^2 P \frac{1-n}{(1+n)(1-2n)},$$

а также при осредненных значениях:  $n = 0,25$ ,  $\rho = 2,6 \text{ g/cm}^3$ ,  $a/b = 35$ ,  $c/d = 25$  получим для магнитуды выражение, связывающее M с деформацией в очаге  $e_0$  и сброшенным напряжением  $\Delta S_0$ :

$$M = 11,4 + 2,37 \lg e_0 + 1,54 \lg \Delta S_0 \quad (10)$$

Используя данную формулу, можно рассчитать как магнитуду в зависимости от деформаций в очаге и сброшенных напряжений, так и наоборот. Например, при  $\lg e_0 = 0,157M - 4,512$ , имеем

$$\lg \Delta S = 0,649M - 7,4 - 1,539 \lg e_0$$

### Сейсмотектонический метод

Это известный метод сейсмотектоники, когда по объемным волнам зарегистрированных на стационарных станциях землетрясений восстанавливаются (по выбранным методикам) площадки разрыва при разрушении или развитии готового разрыва в очагах землетрясений, построив при этом линейный механизм образованных площадок, выделяя азимуты их падения и направления сжатия-растяжения [Юнга, 1990; Безродный, Туйчиев, 1987]. При наличии большого количества механизмов очагов, полученных по одной разломной зоне или прилегающим к ней участкам, можно определить направление основных напряжений структуры на современном этапе.

### Условия проведения тектонофизических исследований

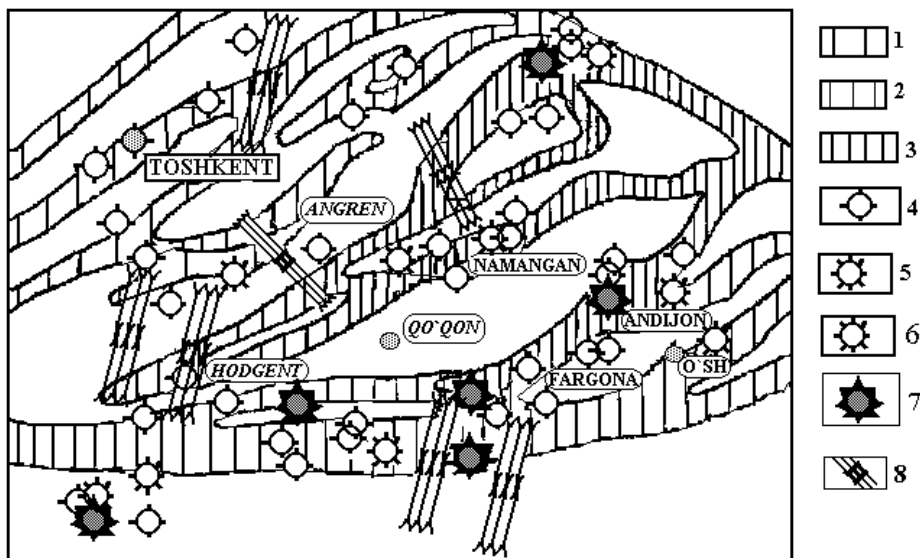
Выбранный нами регион исследований представляет собой многоугольник, ограниченный с юго-востока Ферганским разломом, с северо-запада – Предчирчикентским разломом, с северо-востока

– Таласским разломом, а на юго-западе погружается под Ташкент-Голодностепскую впадину. На рис. 1. представлена схематическая карта региона с привязкой фактических материалов, на которую заносилась вся информация о распределении напряжений. На рис. 1. также показано расположение активных в новейшее время сейсмогенных зон.

Число активных разрывных зон с разной морфологией составляет более 30 нарушений. Эти разрывы при введении в расчетные программы разделены по длине и кускам на 84 элементные базы. Например (усл. обозн. рис. 1. и 2.): 1-й тип зон – на два элемента, оба взбросы или сбросы, расположение вертикальное; 2-й тип зон – на два элемента, оба взбросы (сбросы), сдвиги, и на три элемента, взброс (сброс) сдвиги; 3-й тип зон – один элемент сброс-сдвиг и три элемента – один надвиг и два взброс-сдвиг и т.д.

По границам для удовлетворения граничным условиям выбраны 84 элемента и 84 узла (на рисунке 2 они представлены как слияние двух и бо-

лее прямолинейных зон). По данным экспериментов [Бакиев, 1989] модуль Юнга и коэффициент Пуассона усреднены по всей площади. По всем элементам определяется значение смещений, включая данные современных движений и результатов геодезических измерений вертикальных смещений по реперам (на каждый элемент одно осредненное значение). Для каждого разрыва рассчитаны коэффициенты трения покоя  $k_{sj}$ , всего 30 значений. В конце расчета определены компоненты напряжений в виде четырехугольной матрицы и матрицы-столбца, где находятся значения смещений узлов  $W_i^{TP}$  и внутренних точек  $W_i^{BH}$ . Используя формулу Коши и геометрическую связь между деформацией и напряжением, заносим рассчитанные значения в сетку схематической карты и определяем поле напряжений без снятия сейсмических сбросов. Далее, постепенно снимая сейсмические сбросы, строим поля от события к событию. Этот анализ до конца нами еще не завершен.



**Рис. 1.** Схематическая карта Чаткал-Кураминской зоны западного Тянь-Шаня

1, 2, 3 – сейсмогенные зоны [Ибрагимов, 1978], в пределах которых могут возникнуть землетрясения с максимальной силой (1 – 7 баллов; 2 – 8 баллов; 3 – 9 баллов и более); 4, 5, 6, 7 – эпицентры сильных землетрясений и их механизмы [Безродный, Туйчиев, 1987], светлая середина кружка – растяжение, темная – сжатие (4 –  $M=4,0-5,0$ ; 5 –  $M=5,1-6,0$ ; 6 –  $M=6,1-7,0$ ; 7 –  $M=7,1-8,0$ ); 8 – преобладающие направления действующих сжимающих напряжений и их градиенты по глубине [Бакиев, 1989; Хамидов, Иноятов, 1994] согласно измерениям разных авторов (с нормальным гравитационным полем напряжений; с градиентом горизонтальных напряжений  $0,03 \text{ МПа} \leq \text{grad}\sigma \leq 0,07 \text{ МПа}$ ; с градиентом горизонтальных напряжений  $0,07 \text{ МПа} \leq \text{grad}\sigma \leq 0,13 \text{ МПа}$ ).

### Результаты исследований

Чаткал-Кураминский регион является одним из самых сейсмоактивных участков Узбекистана. Кумбель-Угамская зона разломов и Каржанауская флексура разрывная зона, пересекающая ее и находящийся в северной части активный разлом – важная дизъюнктивная структура региона. В средне-верхнепалеозойское время она отделяла

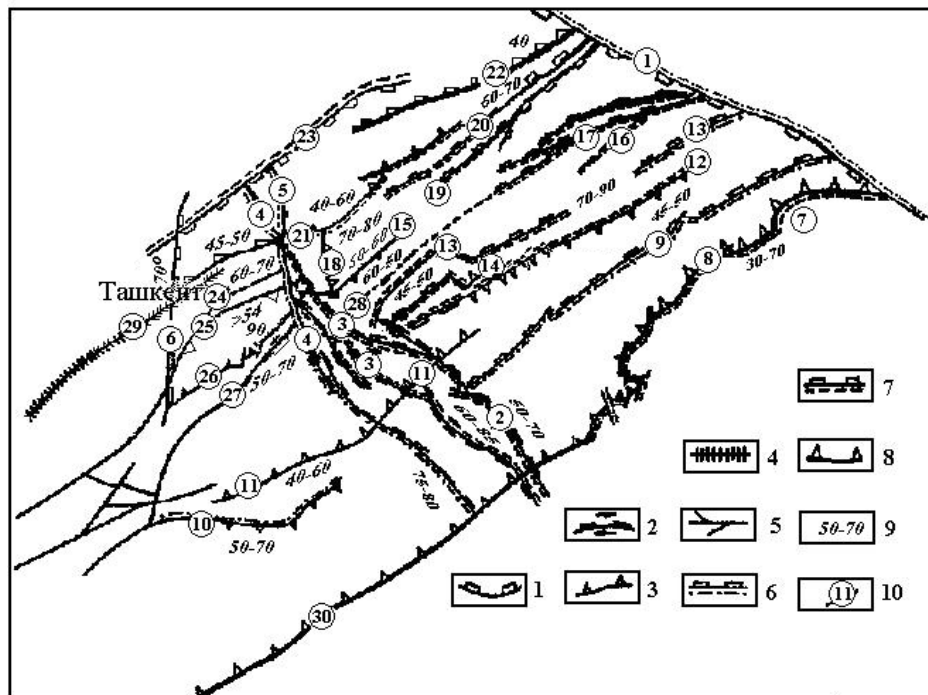
Чаткальскую структурно-фациальную подзону от Кураминской [Ходжаев, 1985; Ярмухамедов, 1988]. Зону разломов составляют Кумбельский, Арашанский, Кенкольский и Угамские разломы, протягивающиеся с юго-востока на северо-запад более чем на 150 км. Строение зоны разломов кулисообразное (рис. 2). Основные разломы сопровождаются многочисленными мелкими опе-

ряющими и сопутствующими разрывами. Поэтому для каждого разлома измерены свои геометрические параметры. Например, Кумбельский разлом – это сложный сброс-сдвиг, падение сместителя на северо-восток под углами  $60^{\circ}$ - $90^{\circ}$ , юго-западное крыло приподнято. В новейшее время по нему происходили сдвиговые перемещения с амплитудой до 5 км. (рис. 2). Зона хорошо прослеживается на аэрофотоснимках и топографических картах по вытянутым депрессиям, по цепочке седловин и родников.

Максимальная ширина зоны влияния Кумбель-Угамских разломов достигает 25 км. Уровень деформации от  $2,3 \times 10^{-8}$  до  $3,7 \times 10^{-7}$ . Мнения исследователей о возрасте разлома противоречивы. Одни считают, что зона разломов заложена до начала накопления верхнепалеозойских отложений. Другие же допускают ее активную деятельность в раннепалеозойское время, продолжавшуюся в последующем этапе тектогенеза. По имею-

щимся данным [Ярмухамедов, 1988] зона разломов приблизительно образовалась в периоды соответствующих релаксаций предельных напряжений, так как прослеживаются следы крупных остаточных деформаций, особенно в центральной части. Повторные подвижки по ним начались с мелового времени [Ходжаев, 1985]. Современная напряженность этой зоны подтверждается активным проявлением в его пределах физико-геологических процессов, а также приуроченностью землетрясений (рис. 2). Здесь располагаются и палеосейсмоструктуры “Карабузук”, “Алмашах”, “Кальтакол”, образовавшиеся при палеоземлетрясениях силой не менее 9 баллов [Ходжаев, 1985; Бакиев и др., 2001].

Блоковые поднятие Пскемского и Угамского хребтов, находящиеся в области влияния Кумбель-Угамской разломной зоны, обладают максимальными величинами градиентов средних скоростей

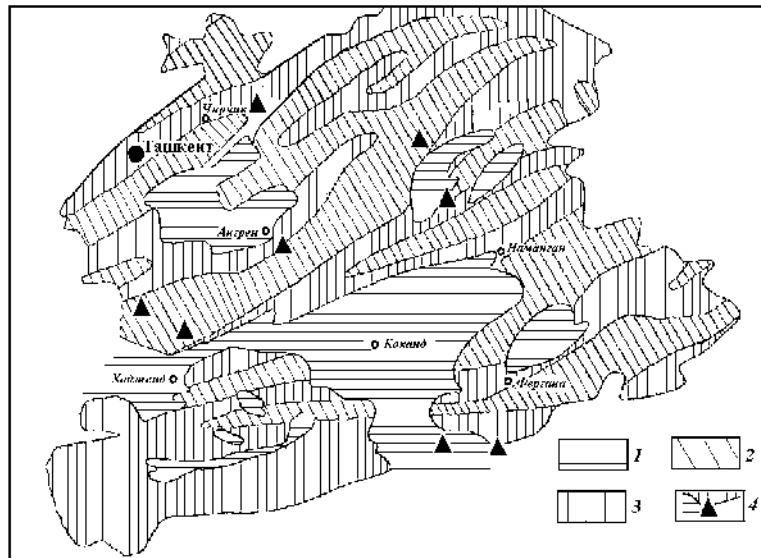


**Рис. 2.** Карта активных в новейшее время разрывных нарушений Чаткал-Кураминской зоны западного Тянь-Шаня [Ходжаев, 1985; Бакиев и др., 2001].

1 – взбросы или сбросы; 2 – взбросо- (сбросо-) сдвиги; 3 – надвиги; 4 – флексурно-разрывные зоны; 5 – разрывные нарушения, выявленные по геофизическим данным. Активные в новейшее время разрывные нарушения: 6 – каледонские; 7 – герцинские; 8 – альпийские; 9 – амплитуда перемещений по разломам в новейшее время (метры): – горизонтальная, без индекса – вертикальная; 10 – номер и наименование разрывных нарушений: 1 – Таласский, 2 – Арашанский, 3 – Кенкольский, 4 – Кумбельский, 5 – Угамский, 6 – Меридиональный, 7 – Западно-Карасийский, 8 – Чаткал-Атойнакский, 9 – Ашуторский, 10 – Шаугазский, 11 – Актау-Северо-Ангренский, 12 – Чаткальский, 13 – Зилай-Баркрак-Западно-Чаткальский, 14 – Актерекский, 15 – Кашкасуьский, 16 – Сандалашский, 17 – Таялмыш-Кашкасуьский, 18 – Пскем-Буручмуллинский, 19 – Гостартауский, 20 – Пскемский, 21 – Каржантауский, 22 – Ойгангский, 23 – Боганалинский, 24 – Северо-Чирчикский, 25 – Южно-Чирчикский, 26 – Майгашкан-Сюренъатинский, 27 – Паркент-Нурекатинский, 28 – Минтукумский, 29 – Ташкентская флексурно-разрывная зона, 30 – Северо-Ферганский.

новейших вертикальных тектонических движений  $0,4-0,7 \times 10^{-1}$  1/год. Сложно построенный Чаткальский блок, простирающийся в западном направлении за указанной выше зоной, отличается мозаичным распределением участков с градиентами средних скоростей новейших вертикальных движений, наибольшие значения которых достигают  $0,3-0,9 \times 10^{-1}$  1/год (рис. 1, 2.). Однако анализ истории развития этих разломов показал, что они были активны в кайнозойское время. Детальные сейсмогеологические и геодинамические исследования свидетельствуют об активизации современных тектонических движений этой зоны [Бакиев и др., 2001]. Результаты оценки распределения на-

пряжений и районирование западного Тянь-Шаня с прилегающей территорией по избыточным касательным напряжениям, рассчитанным математическим моделированием, в сравнении с данными инструментальных измерений в глубоких скважинах показано на рис. 3. Используя палеосейсмологические данные, были получены более точные сведения с плейстоценовых, а возможно, и с эпицентральных зон сильных землетрясений и выявлен наивысший уровень сейсмической опасности Кумбель-Угамской зоны разрывных нарушений [Турдикулов и др., 2001]. Помимо этого, в зоне разломов нами отмечены сейсмические события до двенадцатого энергетического класса.



**Рис. 3.** Районирование западного Тянь-Шаня и прилегающих территорий по избыточным касательным напряжениям [Бакиев и др., 2001].

1 – район с минимальной вариацией напряжений ( $\tau_{изб.} < 1$  МПа); 2 – район со средней вариацией напряжений ( $1 \text{ МПа} \leq \tau_{изб.} \leq 2$  МПа); 3 – район с наивысшей величиной избыточных касательных напряжений ( $2 \text{ МПа} \leq \tau_{изб.}$ ); 4 – объекты исследования, где проведено сравнение по измерениям в горном массиве и результатам тектонофизических съемок.

В табл. 1. представлены результаты расчета сброшенных напряжений при сильных землетрясениях для области влияния Каржантауской флексуры Чаткальской горной зоны. Эти результаты основаны на сейсмических данных по сбросам напряжений и рассчитаны согласно эмпирическим формулам разных авторов с учетом активности разломов в современную эпоху. Поэтому расчетные данные, в пределах реализуемости модели, на практике отображают усредненные современные поля напряжений данного региона.

#### **Механический анализ напряжений и условий их оценки**

В табл. 2. показано сравнение расчетных значений напряжений с инструментальными и эмпирическими данными. Видно, что когда ориентация действующих напряжений в регионе находится

под определенным углом к северу, тогда в большинстве случаев наблюдается совпадение измеренных данных с расчетными, и поэтому только ориентация движения в северо-западном направлении, как указано в [Безродный, Туйчиев, 1987; Ходжаев, 1985], является недостаточной (рис. 2, 3, табл. 2.). Анализ тенденции показывает, что когда векторно суперпозируется ориентация регионального главного напряжения (которое направлено на северо-запад) по каждому обнажению, тогда можно получить более точные расчетные значения генерального направления. В данном случае получается, что ориентация главного напряжения, влияющего на исследуемый район, является север – северо-западной. Это также подтверждается сейсмогеодинамическими исследованиями [Турдикулов и др., 2001] и данными геодинамических исследований [Ярмухамедов, 1988].

Таблица 1.

Расчет сброшенных напряжений при сильных землетрясениях для области влияния Каржантауской флексуры Чаткальской горной зоны

Формулы, по которым проведены расчеты	Буручмулла 1959 г. M= 5,8; H= 15 км.;	Ташкент 1966 г. M= 5,3; H= 8 км.;	Таваксай 1977 г. M= 5,0; H= 15 км.;	Назарбекское 1980 г. M=5,2; H= 10 км.;	Ташкент 2008 г. M= 4,8; H= 8 км.;
Aki : $\Delta S = c \left( \frac{M_0}{R^{3/2}} \right)$	$\epsilon_0 = 4,6 \times 10^{-4}$ 31 бар	$\epsilon_0 = 1,9 \times 10^{-4}$ 28 бар	$\epsilon_0 = 1,1 \times 10^{-4}$ 26 бар	$\epsilon_0 = 1,9 \times 10^{-4}$ 27 бар	$\epsilon_0 = 0,6 \times 10^{-4}$ 22 бар
Randal: $\Delta S = \frac{7}{54} \left( \frac{M_0}{R^3} \right)$	$\epsilon_0 = 4,6 \times 10^{-4}$ 38 бар	$\epsilon_0 = 1,9 \times 10^{-4}$ 35 бар	$\epsilon_0 = 1,1 \times 10^{-4}$ 32 бар	$\epsilon_0 = 1,9 \times 10^{-4}$ 34 бар	$\epsilon_0 = 0,6 \times 10^{-4}$ 26 бар
Костров: $\Delta S = \frac{2mE_p}{M_0}$	$\epsilon_0 = 4,6 \times 10^{-4}$ 6,6 бар	$\epsilon_0 = 1,9 \times 10^{-4}$ 6,1 бар	$\epsilon_0 = 1,1 \times 10^{-4}$ 5,7 бар	$\epsilon_0 = 1,9 \times 10^{-4}$ 5,9 бар	$\epsilon_0 = 0,6 \times 10^{-4}$ 4,5 бар
Ризниченко: $\Delta S = \frac{mD}{S}$	$\epsilon_0 = 4,6 \times 10^{-4}$ 23,2 бар	$\epsilon_0 = 1,9 \times 10^{-4}$ 21,2 бар	$\epsilon_0 = 1,1 \times 10^{-4}$ 20,0 бар	$\epsilon_0 = 1,9 \times 10^{-4}$ 20,8 бар	$\epsilon_0 = 0,6 \times 10^{-4}$ 16,5 бар
Уломов: $\lg \Delta \sigma = 0,19M + 0,360$	$\epsilon_0 = 4,6 \times 10^{-4}$ 29,0 бар	$\epsilon_0 = 1,9 \times 10^{-4}$ 23 бар	$\epsilon_0 = 1,1 \times 10^{-4}$ 20,4 бар	$\epsilon_0 = 1,9 \times 10^{-4}$ 22,3 бар	$\epsilon_0 = 0,6 \times 10^{-4}$ 18 бар
Yamashita: $\Delta S = \frac{2m\Delta W}{3tV}$	$\epsilon_0 = 4,6 \times 10^{-4}$ 68,0 МПа	$\epsilon_0 = 1,9 \times 10^{-4}$ 44 МПа	$\epsilon_0 = 1,1 \times 10^{-4}$ 31,3 МПа	$\epsilon_0 = 1,9 \times 10^{-4}$ 37,0 МПа	$\epsilon_0 = 0,6 \times 10^{-4}$ 26,5 МПа
Хамидов: $\lg \Delta \sigma = 0,649M - 7,4 - 1,539 \lg \epsilon_0$	$\epsilon_0 = 4,6 \times 10^{-4}$ 87,1 МПа	$\epsilon_0 = 1,9 \times 10^{-4}$ 50,5 МПа	$\epsilon_0 = 1,1 \times 10^{-4}$ 38,5 МПа	$\epsilon_0 = 1,9 \times 10^{-4}$ 45,95 МПа	$\epsilon_0 = 0,6 \times 10^{-4}$ 31,3 МПа

Источники информации:

Aki [Aki, 1976]:  $c=45,56-5,56$ ;  $\lg M_0=16,0+1,5M$ ;  $\lg R=0,42M-1,67$ ;

Randal [Randal, 1971]:  $\lg M_0=15,0+1,4M$ ;

Костров [Костров, 1975]:  $E_0(\text{дж})=4+1,8M$ ;

Ризниченко [Ризниченко, 1985]:  $\lg D(\text{см})=-3,2+0,76M$ ;  $\lg S(\text{см})=-3,15+0,91M$ ;

Уломов [Уломов, 1979];

Yamashita [Yamashita, 1975]:  $\lg \Delta W(\text{дн.см})=6+1,6M$ ;  $\tau=33 \times 10^{-5}h+330 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ ;  $\lg V=-5,01+1,26M \text{ (km}^2\text{)}$ ;

Хамидов [Бакиев и др., 2001]:  $\lg \epsilon_0=0,157M-4,512$ .

Таблица 2.

Сравнение расчетных значений напряжений и их направлений с инструментальными и эмпирическими данными

№	Наименование разломов	Модельно расчетные значения в МПа	Осреднение эмпирическими формулами по разлому, в МПа	Механизм по простиранью	Направление главных напряжений
1	Кумбельский	68	53	Сброс-сдвиг: → С	северо-запад (СЗ)
2	Угамский	76	59	Сброс-сдвиг: → СЗ	северо-запад (СЗ)
3	Чаткальский	106	87	надвиг: → ЮВ	юг (Ю)
4	Каржантауский	61	52	надвиг: → С	северо-запад (СЗ)
5	Пскемский	95	77	взбросы: → СЗ	северо-запад (СЗ)
6	Ташкентская ФРЗ	63	42	надвиг: → СЗ	север (С)

Вблизи области слияния сейсмогенных зон (внутри которых простираются сейсмоактивные разломы) наблюдаются большие изменения ориентации и значений главных напряжений. Они аналогичны крестообразным концентраторам, на краях которых ввиду математической сингулярности оценка значений напряжений затруднена. Они отличаются большой амплитудой изменений расчетных параметров перемещений с нечетко выраженной закономерностью. Ориентация

максимального касательного напряжения в зоне Каржантауского разлома и западной Чаткальской группы разломов почти северная, в районе к западу от Угамского разлома – северо-западная и даже частично почти западная (рис. 2, 3). Можно считать, что в этих районах преобладающей ориентацией главного напряжения является северо-западное. Поэтому ориентация главных напряжений в различных местах района и ориентация главного напряжения, влияющего на регион, не



всегда совпадает и наблюдаются случаи большего их расхождения. Это свидетельствует о том, что направления главных напряжений в локальных участках одной сейсмогенной зоны не могут в точности совпадать с ориентацией возбуждающей силы для всего данного региона. Раньше исследователи придерживались иной точки зрения ([Ходжаев, 1985; Ярмухамедов, 1988] и др.). При изменении ориентации главного напряжения для региона наблюдается неодинаковая тенденция изменения величины среднего значения касательных напряжений, а также вариации их амплитуд по разным направлениям сливающихся участков сейсмогенных зон (рис. 1 и 3, по участкам слияния разрывов). Среднее значение напряжений сдвига выражает частное, т.е. полученное делением на число дискретных значений суммы нескольких модельно рассчитанных значений напряжений сдвига.

### Выводы

Таким образом, выявлено, что когда ориентация главных напряжений в регионе Чаткальских гор западного Тянь-Шаня северо-западная, тогда средние значения напряжений сдвига (вблизи областей слияния сейсмогенных зон), как правило, получаются несколько завышенными, и увеличение числа сходящихся разломов не является причиной возрастания среднего значения напряжений сдвига. Например, вблизи Кумбельского, Угамского разломов и Каржантауской флексуры среднее значение напряжений сдвига в месте слияния трех групп разрывов составляет только 80 % величины основных напряжений сдвига (рис. 2, 3).

При изменении ориентации внешней силы в одном и том же районе также наблюдается существенное изменение напряжений сдвига. Когда ориентация главного напряжения в регионе является определенной, тогда имеет место весьма значительное изменение ориентации главного напряжения вблизи места слияния сейсмогенных зон с различным уровнем интенсивности. Участки сейсмических разгрузок (т.е. гипоцентры очагов землетрясений) в большинстве случаев находятся на краях или внутри современных и активных в неогеновый период сейсмогенных зон (см. рис. 1-3 и табл. 1). В этом регионе сосредоточено большое количество пересечений активных разрывов, концентрирующих избыточные напряжения и отличающихся высокой частотой землетрясений, среди которых преобладают слабые, и средние землетрясения, сила сотрясений которых обычно не превышает 5–7 баллов (ср. рис. 1-3, и данные табл. 1 и 2). Это подтверждается нормальным распределением средних напряжений сдвига, особенно на участках сброса и сбросо-сдвига [Безродный, Туйчиев, 1987; Yamashita, 1975].

### Литература

- Аманкулов Т.К. Очаги сильных землетрясений Средней Азии. – Бишкек: Илим, 1991. – 248 с.
- Бакиев М.Х. Физические свойства горных пород сейсмоактивных зон Узбекистана при высоких давлениях и температурах. – Ташкент: Фан, 1989. – 288 с.
- Бакиев М.Х., Хамидов Л.А., Ибрагимов А.Х. Концентрация напряжений вблизи локальных неоднородностей земной коры // *Inland Earthquake. China*. – 2001. – Vol. 15, № 4 – С. 376–384.
- Бакиев М.Х., Хамидов Л.А. Изменение перемещений на поверхности эпицентральной зоны // *Inland Earthquake. China*. – 2001. – Vol. 15, № 3 – С. 259–267.
- Безродный Е.М., Туйчиев Х.А. Механизмы очагов сильных землетрясений Узбекистана. – Ташкент: Фан, 1987. – 143 с.
- Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. – М.: Наука, 1969. – 216 с.
- Гзовский М.В. Основы тектонофизики. – М.: Наука, 1975. – 536 с.
- Губин И.Е. Сейсмогенные тектонические процессы. – М.: Наука. – 1987. – 234 с.
- Ибрагимов Р.Н. Сейсмогенные зоны срединного Тянь-Шаня. – Ташкент: Фан, 1978. – 144 с.
- Кондауров В.И., Никитин Л.В. Теоретические основы реологии геоматериалов – М.: Наука, 1990. – 206 с.
- Костров В.Н. Механика очага тектонического землетрясения. – М.: Наука. – 1975. – 176 с.
- Николаев П.Н. Методика тектонодинамического анализа. – М.: Недра, 1992. – 295 с.
- Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. – М.: Наука, 1985. – 408 с.
- Турдикулов А.Т., Зияудинов Ф.Ф., Хамидов Л.А. Особенности сейсмической опасности срединного Тянь-Шаня и механический анализ напряжений в зонах разломов // *Известия Национальной Академии Наук Кыргызской Республики*. – 2001. – № 3-4. – С. 63–67.
- Уломов В.И. Физическая модель очаговой области Газлийских землетрясений 8 апреля и 17 мая 1976 года // *Сейсмологические исследования в Узбекистане* – Ташкент: Фан. – 1979. – С. 53–63.
- Физические процессы в очагах землетрясений. – М.: Наука. – 1980. – 187 с.
- Хамидов Л.А. Краевая задача для исследования полей перемещений и напряжений вблизи разных типов внутренних концентраторов // *Известия АН УзССР. Серия технические науки*. – 1988. – № 5. – С. 32–36.
- Хамидов Л.А. Об одной особенности метода “источников” и “стоков” // *Доклады АН Узбекистана*. – 1975. – № 10. – С. 15–16.

- Хамидов Л.А., Алимова М.М. Напряженно-деформированное состояние вблизи сейсмогенной структуры // *Узбекский геологический журнал*. – 1989. – № 6. – С. 13–20.
- Хамидов Л.А., Зиявитдинов К.Ф. Математическая модель одной тектонофизической задачи // *Проблемы механики*. – 1993. – № 2. – С. 15-19.
- Хамидов Л.А., Инояттов М.Ф. Районирование Восточного Узбекистана и прилегающих территорий по расчетам полей касательных напряжений // *Прогноз сейсмической опасности*. – Ташкент: Фан. – 1994. – Т. 1. – С. 124-131.
- Хамидов Л.А. и др. К исследованию трещинообразования в Центральных Кызылкумах // *Узбекский геологический журнал*. – 1987. – № 1 – С. 19–29.
- Ходжаев А.К. Палеосейсмогеология Чаткало-Кураминского региона. – Ташкент: Фан, 1985. – 136 с.
- Шемякин Е.И. (под редакцией) Методические рекомендации по изучению напряженно-деформированного состояния горных пород. – М.: Изд. ВНИИ Геоинформсистем, 1987. – 250 с.
- Шерман С.И., Днепрпетровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы изучения. – Новосибирск: Наука, 1989. – 255 с.
- Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сеймотектонических деформаций. – М.: Наука, 1990. – 192 с.
- Ярмухамедов А.Р. Морфоструктура срединного Тянь-Шаня и ее связь с сейсмичностью. – Ташкент: Фан, 1988. – 163 с.
- Aki K. Earthquakes mechanism. – In: *The upper mantle developments in geotectonics* // Amsterdam, etc; Elsevier. – 1972. – Vol. 4. – P. 423–446.
- Randal M.J. Elastic multiple theory and seismic moment // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* – 1971. – V. 61. – № 5. – P. 1321–1326.
- Yamashita T. Energy of fault motion and radiated seismic and seismic efficiency of Shallow earthquakes // *J. Phys. Earth.* – 1975. – V. 27. – P. 171–176.

## ВИВЧЕННЯ ПОЛІВ НАПРУЖЕНЬ ЧАТКАЛЬСЬКОЇ ГІРСЬКОЇ ЗОНИ ЗАХІДНОГО ТЯНЬ-ШАНЮ

Л.А. Хамідов

Висвітлено результати вивчення напружено-деформованого стану земної кори в Чаткальській гірській зоні західного Тянь-Шаню. У першому наближенні оцінено основні та палеонапруження для окремих ділянок регіону. Для аналізу напружень використано методи математичного моделювання, тектонофізичний метод реконструкції полів напружень і метод відновлення напружень за механізмами землетрусів. Порівняно з результатами сеймотектонічних досліджень, з компонентами напружень, вимірними в гірських виробках у місцях розробок корисних копалин, а також з результатами лабораторних досліджень деформацій порід при високих тисках.

**Ключові слова:** напружено-деформований стан; земна кора; Чаткальська гірська зона; західний Тянь-Шань; математичне моделювання; тектонофізичний метод; механізми землетрусів.

## STUDY OF STRESSES FIELDS OF CHATKAL'S MOUNTAIN ZONE OF WEST TAN-SHAN

L.A. Khamidov

In the article the results of studies of stress-strained state of the crust in Chatkal's mountain zone of west Tan-Shan are shown. In the first approximation the main and paleo-stresses for separate area of the region's are estimated. For analysis of the stresses the methods of mathematical modeling and tectonophysical methods of stresses fields reconstructions and method of recovering of stresses by earthquakes mechanisms are used. The comparison with result of seismic-tectonic studies, with component of stresses which are measured in open casts and mines and also with results of laboratory experimental studies of rocks deformations under high pressure influence is taken.

**Key words:** stress-strained state; earth crust; Chatkal's mountain zone; west Tan-Shan; mathematical modeling; tectonophysical method; earthquakes mechanisms.