

УДК 550.34+539.3 +551.24 (575.2) (04)

**ФИЗИЧЕСКИЕ И ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ФОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ  
ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

*Н.А. Сычева* – науч. сотр,  
*Л.М. Богомолов* – канд. физ.-мат. наук,  
*Н.Ю. Краснокутская* – инженер,  
*Т.Л. Гайдук* – магистр

---

The results of investigations of weak earthquakes focal mechanisms using KNET seismic network focal catalog have been described. Multiple mechanisms (kind of slip on plane of fracture) have been revealed: reverse faults, normal faults and oblique reverses prevailing. Statistical analysis of focal mechanisms demonstrates that the orientation of horizontal stress main axis is North-West. Relationships between slippage and fracture criteria are discussed.

**Введение.** Центральная проблема очаговой сейсмологии, без решения которой невозможен прогноз землетрясений, – причина возникновения землетрясений и механизм их очагов. В настоящее время существует много работ, описывающих качественные модели землетрясений, но нет такой модели, которая была бы принята большинством сейсмологов и могла описывать взаимосвязь неустойчивых подвижек в очаге с параметрами напряженно деформированного состояния геосреды. Академик М.А. Садовский писал, что “одной из задач ближайшего будущего должно быть теоретическое освоение огромного материала, накопленного ... при изучении макросейсмических явлений” [1]. Изучение очагов сейсмических событий остается одной из важных задач сейсмологии и геомеханики.

В рассматриваемом регионе в настоящее время развернута сеть высокочувствительных цифровых сейсмических станций, позволяющая регистрировать все землетрясения с магнитудой  $M > 1.0$  в пределах Северного Тянь-Шаня. Обширные фактические материалы, полученные по данным этой сети, позволили разрабатывать многие актуальные вопросы сейсмологии, в том числе новые связи с дру-

гими явлениями. Получаемые данные по механизму очагов землетрясений дают возможность целенаправленного все более детального изучения закономерностей современного сейсмотектонического деформационного процесса в литосфере Тянь-Шаня. Сеть KNET расположена в северной части Кыргызстана и охватывает сравнительно небольшую территорию, лежащую в пределах Центрального сегмента Северной Тянь-Шанской сейсмической зоны. Вследствие этого факта данные KNET характеризуют сейсмотектонические процессы в зоны сочленения Тянь-Шанского орогена и Казахской плиты. В результате проведенных исследований составлен сводный каталог фокальных механизмов для исследуемой территории, построены распределения главных осей выхода по простиранию и по углу к горизонту. Эти материалы представлены в первой части работы, во второй приведены возможности перехода от чисто кинематического к геомеханическому (с позиций физики прочности) подходу к очаговым механизмам.

**Методика и основные результаты.** Для исследования был использован каталог сейсмических событий за 1994–2003 гг., полученный по данным сейсмологической сети KNET.

На рис. 1 представлено расположение 1353 событий, которые попали внутрь исследуемой области и расположение 732 событий, для которых были получены решения фокальных механизмов (b). Результаты исследования этого каталога по глубине, энергетическому классу К показали, что наибольшее количество событий произошло на глубине 5–10 км, чаще всего имеют место события с энергией  $10^7 - 10^8$  Дж (7–8 класса). Полученные нами решения для фокальных механизмов позволили построить карты проекций осей сжатия и растяжения на горизонтальную плоскость (рис. 2).

При внимательном рассмотрении рис. 2 можно отметить как тенденцию, что основная масса главных осей сжатия P имеет северо-западную направленность (рис. 2a), а оси растяжения T – северо-восточную (рис. 2b), что согласуется с направлениями, отмеченными другими авторами [2]. Для подтверждения это-

го визуального наблюдения были построены графики распределения азимутальных углов ориентированных осей P и T (рис. 3).

На рис. 3 каждому значению луча азимута, который изменяется от 0 до  $360^\circ$  с шагом  $10^\circ$  (с учетом направления смещения верхнего блока), соответствуют события, число которых подсчитывается за текущие  $10^\circ$  (например, число событий с азимутальным углом от 0 до  $10^\circ$  ставится в соответствие  $0^\circ$  по оси абсцисс и т.д.). Полученные результаты позволили выделить два максимума для лучей простираения оси P – юго-восточное ( $160^\circ$ ) и северо-западное ( $330^\circ$ ) и два максимума для луча T – северо-восточное ( $60^\circ$ ) и юго-западное ( $240^\circ$ ). Естественно, эти максимумы отличаются друг от друга на  $180^\circ$ , так как определяются одними и теми же направлениями действия сжатия и растяжения соответственно. Отмечено [3, 4],

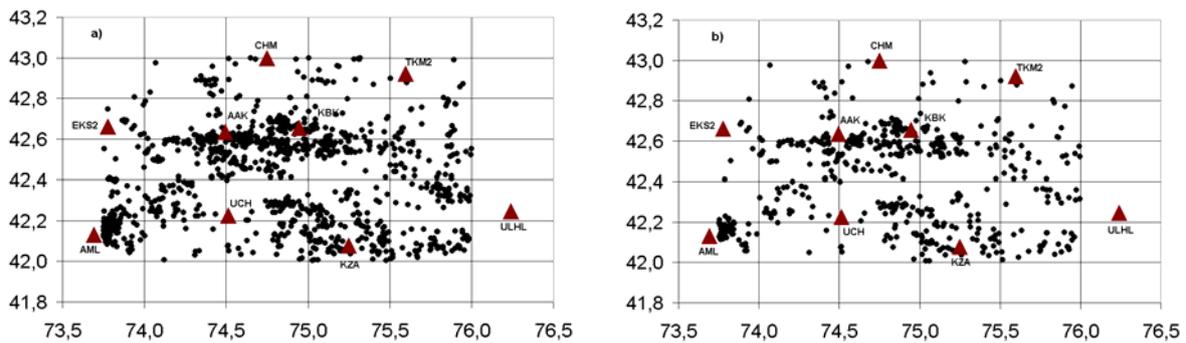


Рис. 1. Сейсмические события внутри сети KNET:

a – исследуемые события, b – события, для которых были получены решения фокальных механизмов.

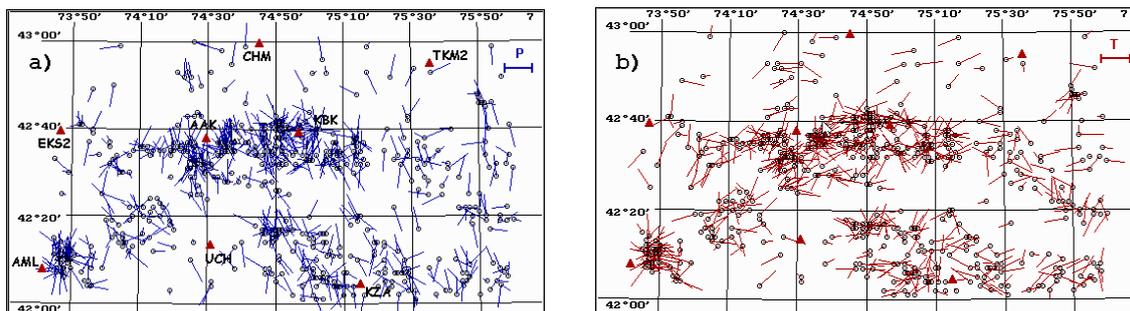


Рис. 2. Проекция осей сжатия (a) и растяжения (b) фокальных решений на горизонтальную поверхность.

## ГЕОФИЗИКА

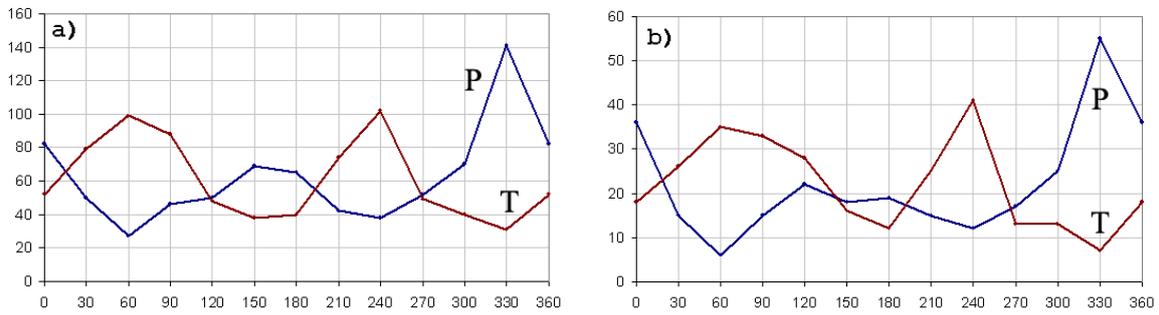


Рис. 3. Распределение углов простирания осей P и T для исследуемых событий:  
а – по расширенному каталогу (732 события); б – по ограниченному каталогу (255 событий).

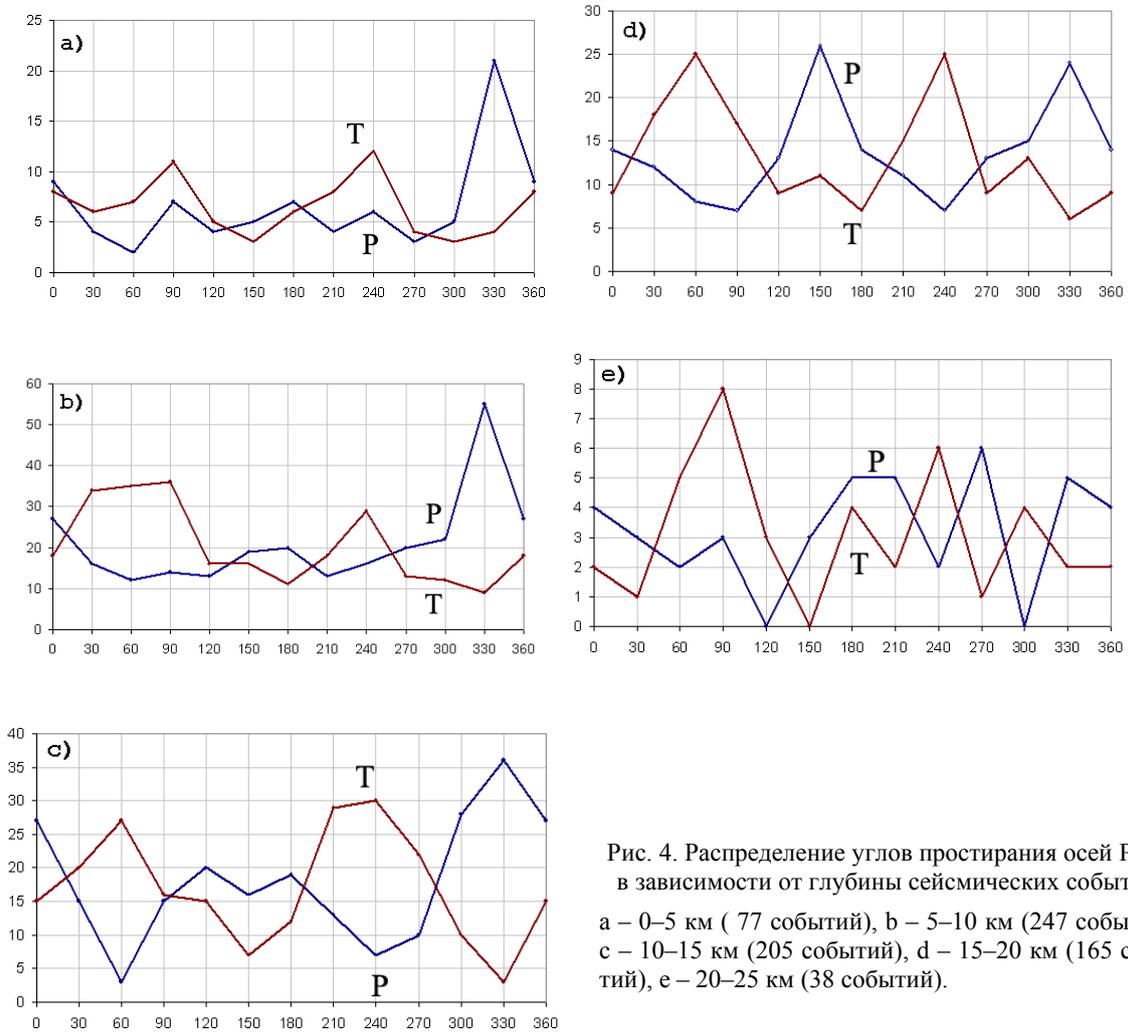


Рис. 4. Распределение углов простирания осей P и T в зависимости от глубины сейсмических событий:  
а – 0–5 км ( 77 событий), б – 5–10 км (247 событий),  
с – 10–15 км (205 событий), д – 15–20 км (165 событий), е – 20–25 км (38 событий).

что слои земной коры Тянь-Шаня, обладая различающимися реологическими свойствами, по-разному реагируют на испытываемое ими тектоническое сжатие, причиной которого является столкновение Индийской и Евразийской литосферных плит. Было логичным исследовать изменение углов простираения (азимутов) в зависимости от глубины расположения очагов сейсмических событий. На рис. 4 представлено распределение углов простираения главных осей для различных интервалов глубин. Из полученных графиков можно отметить, что в целом картина не меняется с глубиной, за исключением глубины 20–25 км, но

меняется соотношение амплитуд максимумов. Если до глубины 15 км преобладающим направлением проекции оси сжатия является северо-северо-западное (330°), то после 15 км амплитуды двух максимумов становятся равнозначными. Исследование изменения распределения направлений главных осей во времени (рис. 5) показало, что значения экстремумов на распределениях направлений осей Р и Т практически не меняются во времени. По-видимому, для выявления временных вариаций этих направлений необходим более длительный период наблюдений.

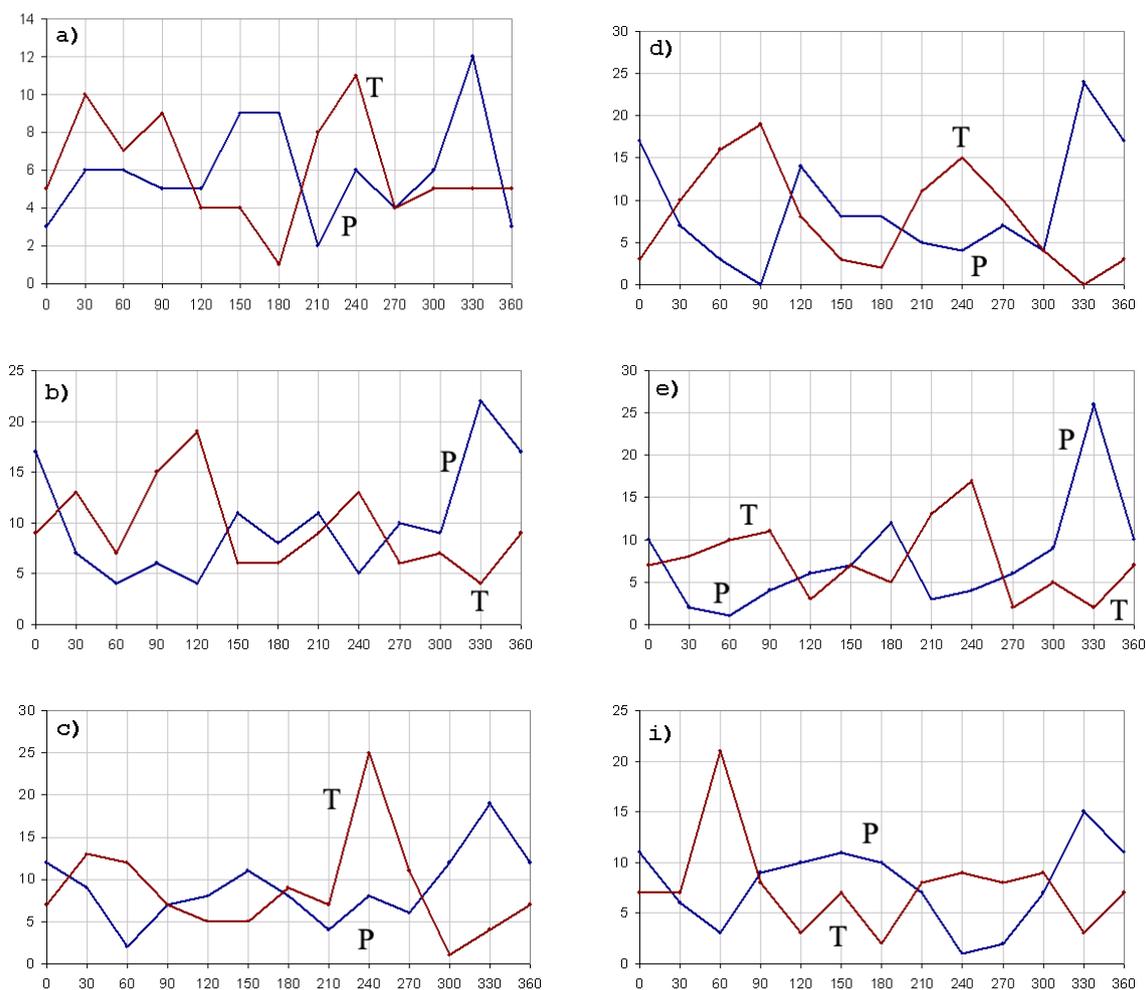


Рис. 5. Распределение углов простираения осей Р и Т в зависимости от времени сейсмических событий: а – 1998 г. (73 события), б – 1999 г. (114 событий), с – 2000 г. (106), д – 2001 г. (101 событие), е – 2002 г. (90 событий), и – 2003 г. (92 события).

Главные оси напряжений характеризуются не только углом простираения, но и углом выхода, или наклоном к горизонту. На рис. 6 представлено распределение углов выхода осей сжатия и растяжения для всех исследуе-

мых событий, вполне очевидно, что максимум событий приходится на события, которые имеют субгоризонтальное расположение оси сжатия (или растяжения).

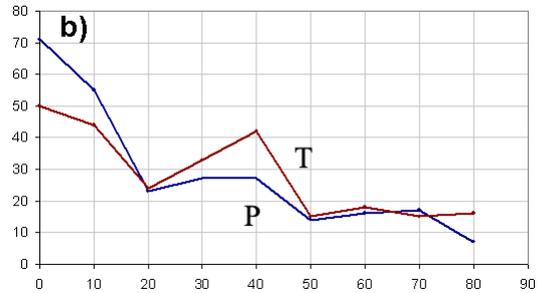
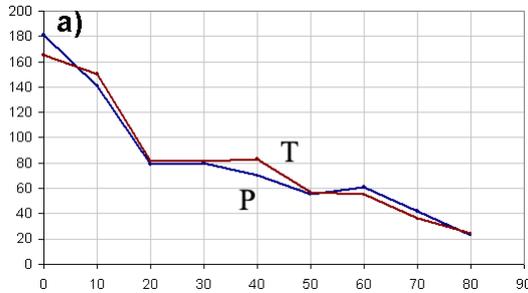


Рис. 6. Распределение углов наклона к горизонту осей P и T для исследуемых событий : а – по расширенному каталогу (732 события); б – по ограниченному каталогу (255 событий).

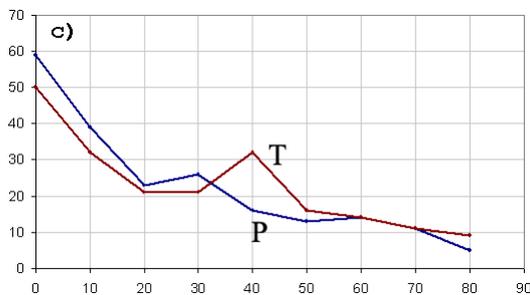
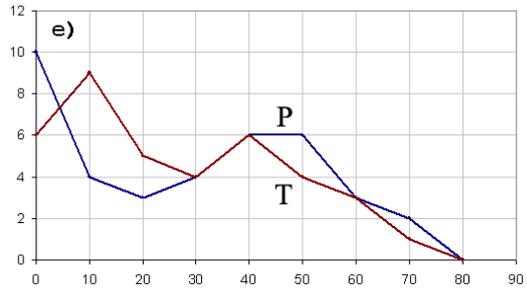
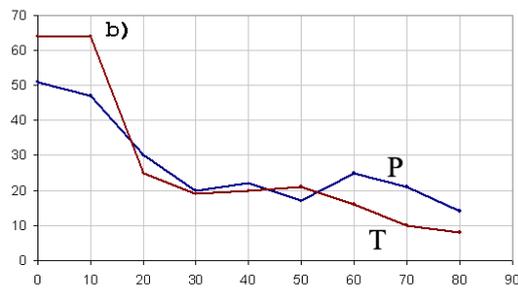
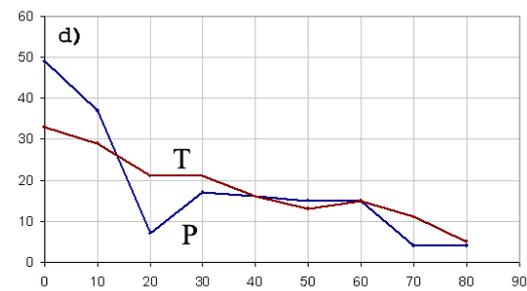
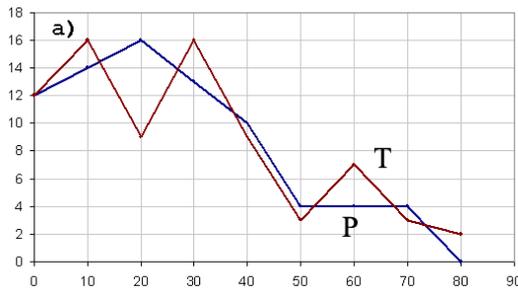


Рис. 7. Распределение углов наклона осей P и T в зависимости от глубины сейсмических событий: а – 0–5 км (77 событий), б – 5–10 км (247 событий), с – 10–15 км (205 событий), d – 15–20 км (165 событий), e – 20–25 км (38 событий).

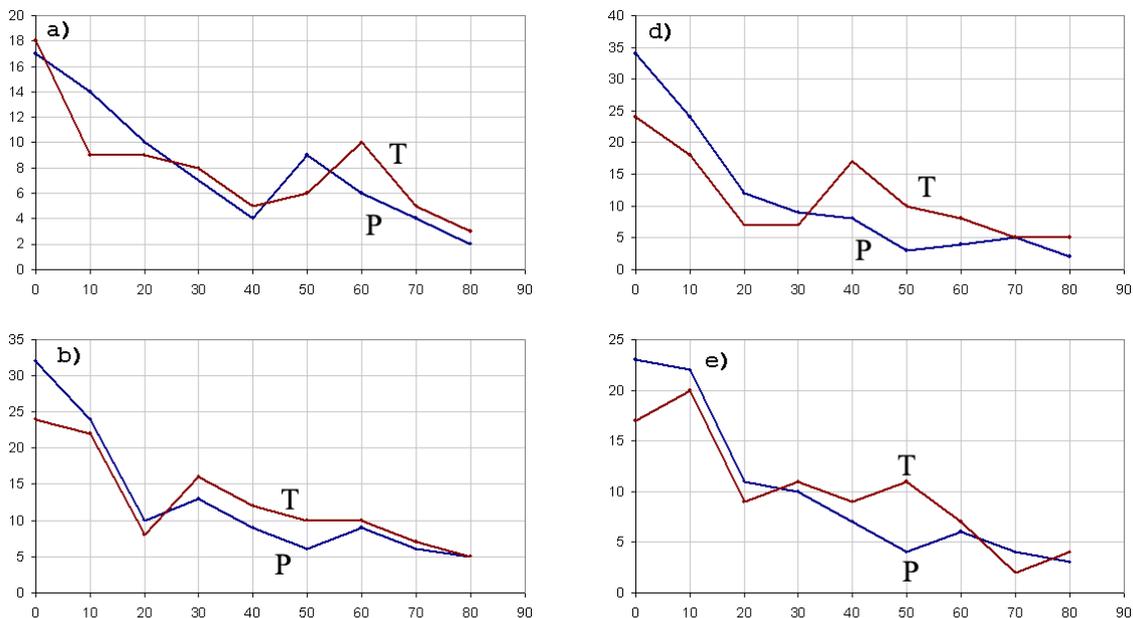


Рис. 8. Распределение углов наклона к горизонту осей P и T в зависимости от времени сейсмических событий: а – 1998 г. (73 события), б – 1999 г. (114 событий), д – 2001 г. (101 событие), е – 2002 г. (90 событий).

Изменение распределения наклона главных осей в зависимости от глубины очага представлено на рис. 7. Анализ графиков показывает, что в слое до 5 км максимальное число событий имеют угол выхода оси сжатия около  $30^\circ$ , что определяет положение плоскости предполагаемых плоскостей разрыва, которые расположены под  $45^\circ$  к главным осям и перпендикулярны относительно друг друга. Одна из плоскостей будет иметь угол наклона к горизонту в  $75^\circ$ , а другая – соответственно ( $-15^\circ$ ). Изменения распределения углов выхода осей сжатия и растяжения во времени показано на рис. 8.

Даже предварительный статистический анализ параметров осей растяжения и сжатия механизмов очагов позволяет отметить, что наиболее представительным направлением для осей сжатия является северо–северо-западное, а для оси растяжения – восточно–восточно-северное, что согласуется с результатами, полученными в [1–3].

**Физические аспекты.** Информативность распределений параметров фокальных механизмов ставит вопрос об их связи с условиями разрушения и энергетикой в очаговой зоне при подготовке землетрясения. Это следующий естественный шаг после чисто кинематической интерпретации очаговых подвижек и их распределений. На этом пути возникает следующая сложность. Начало подвижки по некоторой поверхности нарушения сплошности (разлому) традиционно описывается соотношением Кулона-Мора, в рамках которого принципиально неразличимы квазистатическое, “криповое” движение по разлому и динамическое распространение подвижки. В то же время подвижка в сейсмическом очаге вследствие потери устойчивости (типа роста Гриффитсовской трещины) – принципиально быстрый процесс. Для устранения кажущегося несоответствия перейдем к физическим аспектам, связанным с потерей устойчивости развития разрыва в очаге землетрясения. Рассмотрим

рение возможности подвижки горных масс по некоторой поверхности в очаге землетрясения требует в первую очередь уяснения роли анизотропии напряжения, достигающей величин в несколько сотен бар уже в верхних слоях земной коры (тектоническое горизонтальное напряжение превосходит литостатическое, вертикальное). Следуя подходу Е.М. Морозова и С.Л. Юнга, рассмотрим обобщенный энергетический критерий нарушения сплошности (локального разрушения) для идеального упругого тела в виде [3, 5]:  $\delta \int [G - (p_i + q_i) u_i] ds = 0$ . Здесь  $p_i = -\sigma_{ij}n_j$  – проекции плотности сил, действующих на площадках, расположенных на поверхностях трещины;  $\sigma_{ij}$  – тензор макронапряжения, определяющий компоненты напряжения для тела, не содержащего трещину;  $n_i$  – направляющие косинусы внешней нормали к поверхности трещины;  $u_i$  – компоненты вектора перемещений точек поверхности трещины;  $q_i$  – заданная симметричная нагрузка на этой поверхности;  $G$  – поверхностная плотность энергии разрушения, имеющая тот же смысл, что в известном критерии Гриффитса. Условие границы устойчивости, т.е. вариацию функционала энергии при упрощенных допущениях о плоской поверхности трещины, направлении ее роста в собственной плоскости и постоянстве нагрузки, можно записать в форме

$$2G \delta S - 2(p_i + q_i) \delta \int v_i ds = 0, \quad (1)$$

где  $v_i = v_i(x_i)$  – некоторая функция распределения подвижки по поверхности трещины, являющаяся решением упругой задачи о сдвиговой трещине заданной формы в поле однородных напряжений. Введем направляющие косинусы  $N_i$  для вектора в вариации интеграла в (1). Единичный вектор  $N_i$  является аналогом направляющего вектора “средней подвижки” по поверхности трещины. Определим характер нагрузки  $q_i$  как силу трения на поверхности трещины, пропорциональную нормальному напряжению. Рассмотрим для определенности круговую в плане трещину. Тогда из сообра-

жений симметрии следует, что вектор “подвижки”  $N_i$  совпадает с направлением действия вектора касательного макронапряжения на плоскости, совмещенной с плоскостью трещины. В силу линейности задачи функцию распределения смещения  $N_i$  можно представить в виде произведения общей нагрузки на трещину и единичной функции смещения  $U$ . Вклад второго слагаемого в (1) – квадратичный по компонентам напряжения. При этом из (1) следует критерий разрушения в виде (выкладки опущены):

$$\tau_n - k\sigma_n = [G/\varphi(l)]^{1/2}, \quad (2)$$

где  $\tau_n$  – величина вектора касательного напряжения на площадке с нормалью  $n$ ;  $\sigma_n$  – величина нормального напряжения на этой площадке;  $k$  – коэффициент внутреннего трения. Введенная в (2) функция  $\varphi(l)$  определяется вариацией интеграла из (1), нормированной на  $\sigma S$ , и является монотонно возрастающей функцией размера трещины. Конкретная форма зависимости  $\varphi(l)$ , отвечающая решению задачи о действии единичной нагрузки на трещину заданного размера, не существенна для данной работы. Важно лишь, что выражение в правой части (2) зависит только от размера трещины  $l$  и эффективной поверхностной энергии  $G$ , являющейся константой материала. Поэтому условие разрушения (2) обладает теми же характерными свойствами, что и формула Гриффитса. Подобно критерию Гриффитса условие (2) при фиксированной длине трещины определяет некоторую критическую нагрузку, по превышении которой рост трещины становится неустойчивым. Признаком неустойчивого распространения трещины является то, что небольшое увеличение ее длины при условии критической нагрузки еще больше выводит трещину в область неустойчивости.

Можно также трактовать условие (2) как критерий прочности Кулона-Мора, традиционно применяемый для сколов и сдвиговых разрушений. Как известно, в соответствии с этим условием разрушение произойдет при критической величине комбинации  $|\tau - k\sigma|$ . Направление плоскости разрыва, при котором достигается максимальное значение этой ком-

бинации компонент описывается углом  $\theta$ , который отсчитывается от главной оси и определяется формулой  $\operatorname{tg} 2\theta = \pm 1/k$ . Тем самым определяются две сопряженные плоскости наиболее вероятного разрушения, составляющие друг с другом прямой угол с биссектрисой в виде оси сжатия.

Работа выполнена при частичной поддержке CRDF, грант YG1-2316-BI-02

#### **Литература**

1. Добровольский И.П. Механика подготовки тектонического землетрясения. – М.: Наука, 1984. – 177 с.
2. Крестников В.Н., Шишкин Е.И., Штанге Д.В., Юнга С.Л. Напряженное состояние земной коры Центрального и Северного Тянь-Шаня // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1987. – № 3. – С. 13–30.
3. Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сеймотектонических деформаций. – М.: Наука, 1990. – 191 с.
4. Макаров В.И. Новейшая тектоническая структура Центрального Тянь-Шаня. – М.: Наука, 1977. – 171 с.
5. Морозов Е.М., Партон В.З. Механика упруго-пластического разрушения. – М.: Наука, 1974. – 1415 с.