

ҚР ҰҒА-ның Хабарлары. Геологиялық сериясы. Известия НАН РК.  
Серия геологическая. 2010. №4. С. 53–61

УДК 550.348.436'001.8(574.5)

A. R. ЖДАНОВИЧ<sup>1</sup>

## ГРАФО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ МЕХАНИЗМА СМЕЩЕНИЯ РАЗЛОМОВ НА ПРИМЕРЕ ОЧАГОВЫХ ЗОН БАЙСОРУНСКОГО И ТЕКЕЛИЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

Геологиялық және сейсмологиялық аспекттілердің жерсілкінуша ошактарының механизмдер параметризациясы талқыланады. Жарылым бойынша жылжу компоненттерін өзіндік аналитикалық өдіспен есептеу үсінілған.

Обсуждаются геологические и сейсмологические аспекты параметризации механизмов очагов землетрясений. Предложен оригинальный аналитический метод вычисления компонент смещения по разломам.

Geological and seismological aspects of parameterizations of mechanisms of earthquakes sources are discussed. The original analytical method of calculation of the component of faults movement has been.

В механическом аспекте «очаговые зоны» – это области срывов, отрывов поверхностей разделов структурных неоднородностей, в результате которых возникают сейсмические колебания [8, с. 291]. По знакам «+» и «-» вступления сейсмических волн выделяют зоны оси растяжения и оси сжатия, которые, как правило, могут быть разделены с той или иной точностью двумя дугами **нодальных плоскостей разрывов** (НПР) [2]. В пересечении этих плоскостей находится промежуточная ось напряжений, которой перпендикулярны оси сжатия и растяжения. На практике считают несущественным уклонение проведенных нодальных плоскостей от реального положения на  $6^\circ$  по азимуту простирации и на  $2^\circ$  по углу падения [9, с. 70]. Решение **механизма очага землетрясения** (МОЗ) включает параметры трех осей главных напряжений и двух возможных НПР. Из этих параметров можно получить направление смещения по каждому из разломов и компоненты вектора смещения, которые, как правило, в старых и новых каталогах землетрясений не приводятся, но являются важными параметрами при решении сейсмогеологических и тектонических задач. В этой связи рассмотрим на примере очаговых зон Байсорунского и Текелийского землетрясений графический

метод определения параметров смещения разломов и дадим оригинальный способ аналитического решения. Задача параметризации механизма смещения разломов усложняется тем, что старые и новые каталоги землетрясений в разных терминах описывают механизмы, кроме того, несколько отличается терминология описания разломов в геологии и сейсмологии, на что также будет обращено внимание.

**1. Терминология и обозначения параметров механизма очага землетрясения.** Обозначения трех главных осей напряжения в литературе отличаются: i или P – для оси сжатия; K или T – для оси растяжения; X, B или N – для промежуточной оси [2, 3, 7, 9]. Сами за себя «говорят» следующие обозначения: P (от pressure – «сжатие»), T (от tension – «растяжение»), N (от neutral – «нейтральный»), которые мы и используем. Каждая из перечисленных осей характеризуется двумя параметрами: азимутом оси и углом наклона оси.

**Азимут оси (Azm)** варьирует от  $0^\circ$  до  $360^\circ$  и измеряется по часовой стрелке от направления на север до направления того конца оси, который расположен не ниже горизонта. **Угол наклона оси** варьирует от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . В старых каталогах его обозначали  $\alpha$  и брали от вертикали, называя

<sup>1</sup>Казахстан. 050060, г. Алматы, пр. Аль-Фараби, 75а, «Институт сейсмологии».

**углом выхода** [9]. В современных работах берут от горизонта в том же интервале, обозначая  $P_l$  или  $e$  и называя углом падения оси [3, 7].

Ориентацию каждой из двух нодальных плоскостей разрыва можно охарактеризовать следующими тремя параметрами: азимутом вектора падения, азимутом простирания и углом падения.

**Азимут вектора падения НПР**, обозначаемый нами  $\psi$  [4, 5], измеряется в пределах  $0 \leq \psi \leq 2\pi$  ( $0^{\circ}$ – $360^{\circ}$ ) от направления на север по часовой стрелке до направления вектора падения [1]. В сейсмологических каталогах его, к сожалению, не употребляют, заменяя двусмысленным азимутом простирания.

**Азимут простирания плоскости разрыва** измеряется от направления на север по часовой стрелке до направления простирания. Поскольку всегда имеется 2 направления оси простирания, то нужно выбрать одно из двух. Азимут простирания разрыва, обозначавшийся нами  $\chi$  [4, 5], измеряется, как принято в геологии, в северных румбах и поэтому заключен в пределах  $0 \leq \chi \leq 90^{\circ}$  и  $270^{\circ} < \chi < 360^{\circ}$ . В старых источниках азимут простирания ( $A_z$ ) измерялся в восточных румбах, поэтому варьировал от 0 до  $180^{\circ}$  [3, с. 51–52]. Оба приведенных способа отсчета никак не связаны с выбором положительного направления оси простирания, за которое можно было бы принять направление правого сдвига висячего блока в рассматриваемой плоскости. При решении МОЗ в практике «Сейсмологической опытно-методической экспедиции» (ГУ «СОМЭ» МОН РК) и зарубежных сейсмологических бюро за азимут простирания плоскости, обозначаемый STR [7], берется азимут того конца линии простирания, глядя вдоль которого, наблюдатель видит висячий блок справа. Следовательно, угол STR изменяется от  $0^{\circ}$  до  $360^{\circ}$ . При этом способе направление азимута простирания совпадает с направлением отрицательного луча оси простирания, т. е. азимут STR указывает направление левого сдвига висячего блока.

**Угол падения плоскости разрыва**, обозначаемый Dip,  $\alpha$ , и или  $\xi$  [3, 4, 5, 10], – это угол между вектором падения плоскости и горизонтальной плоскостью (изменяется от  $0^{\circ}$  до  $90^{\circ}$ ). Мы будем использовать обозначение и, часто используемое в международных публикациях.

**Направление смещения** в плоскости разрыва характеризуется углом скольжения или углом подвижки висячего блока.

**Угол подвижки**, который мы обозначим SHEAR, лежит в верхней полуплоскости разрыва и измеряется от линии восстания до прямой, проходящей через вектор смещения. Угол подвижки изменяется от  $(-90)^{\circ}$  до  $90^{\circ}$ . Чтобы определить знак угла, нужно расположить плоскость разрыва перед собой линией падения вверх при взбросе или линией восстания вверх при сбросе. Если угол откладывается вправо от линии восстания, то угол положителен, если же влево, то угол считается отрицательным. Направление сдвига в геологии определяется из направления стрелок, изображающих относительное смещение лежачего и висячего блоков в плане: при направлении по часовой стрелке – сдвиг правый, а против часовой стрелки – сдвиг левый [1, с. 288]. Следовательно, значение угла подвижки положительно, если произошел правый сдвиг, и отрицательно, если произошел левый сдвиг.

В современной практике используют угол скольжения (SLIP), который лежит в плоскости разрыва и измеряется от направления линии простирания STR этой плоскости до вектора подвижки [6, 7]. Угол скольжения SLIP изменяется от  $(-180)^{\circ}$  до  $180^{\circ}$ . Если угол откладывается по направлению против часовой стрелки, то угол положителен. Если же откладывать угол по часовой стрелке, то он считается отрицательным. Следовательно, значение угла скольжения положительно, если в очаге взброс, и отрицательное, если сброс.

**Средняя абсолютная величина смещения по разрыву** ( $d$ ) – это полная величина в метрах перемещения висячего блока относительно лежачего. Смещение по разрыву используется при вычислении сейсмического момента и тесно связанной с ним сейсмической энергией и падением напряжения [8]. Если связать с направлением смещения единичный вектор, то можно разложить его на две ортогональные компоненты  $D_x$  и  $D_n$  [10].

**Относительная компонента вектора смещения вдоль линии простирания разрыва** ( $D_x$ ) – есть проекция единичного вектора подвижки на горизонтальную ось простирания и измеряется в дол. ед. Компонента  $D_x$  имеет положительное значение, если она сонаправлена с направлением правого сдвига вдоль линии простирания плоскости разрыва, отрицательное – если противоположно направлена, т. е. сонаправлена с направлением левого сдвига, и равна нулю,

если единичный вектор перпендикулярен линии простирания.

**Относительная компонента подвижки вдоль линии падения-восстания ( $D_u$ )** – есть проекция единичного вектора подвижки на линию падения-восстания, и измеряется в дол. ед. Компонента  $D_u$  имеет положительное значение, если она сонаправлена с вектором восстания плоскости разрыва, и отрицательное – если она сонаправлена с вектором падения плоскости разрыва, и равна нулю, если перпендикулярна линии падения-восстания. В старых изданиях компоненту  $D_u$  называли **компонентой подвижки по падению** [3, 10]. При этом, считая компоненту подвижки по падению положительной при взбросе (!) и отрицательной при сбросе, что противоположно смыслу самого термина. Это иногда приводило к ошибкам интерпретации.

Для иллюстрации вышеизложенной терминологии изобразим на рис. 1 взаимосвязь между угловыми параметрами плоскости разрыва, углами скольжения и подвижки при четырех принципиально различных кинематических типах смещения и соответствующие векторные компоненты смещений висячего блока.

## 2. Графический метод определения компонент смещения НПР.

Построения выполняют на стереографических сетках Г. В. Вульфа или Вальтера Шмидта, представляющих собой экваториальную проекцию параллелей и меридианов нижней или верхней полусферы глобуса на плоскость [11]. Равнотугольную сетку Г. В. Вульфа и равноплощадную сетку Вальтера Шмидта в сейсмологии градируют одинаково: азимуты оцифровывают по часовой стрелке от  $0^\circ$  до  $360^\circ$ , углы падения – от периферической окружности ( $0^\circ$ ) до центра ( $90^\circ$ ). Сетка Вальтера Шмидта с такой оцифровкой от-

личается от сетки, применяемой для определения максимумов систем трещин в структурной [1] и инженерной геологии [4]. Результаты построения на сетках Г. В. Вульфа и Вальтера Шмидта принципиально не отличаются, только точностью. Все ниже следующие комментарии к определению параметров МОЗ относятся к случаю использования проекции верхней полусферы сетки Вальтера Шмидта на плоскость. Рассмотрим примеры нанесения элементов МОЗ при четырех принципиально различных кинематических типах разломов на примере Байсорунского и Текелийского землетрясений, данные по которым приведены в табл. 1. Соответствующие стереограммы показаны на рис. 2. При графическом оформлении механизма очага землетрясения раньше заштриховывали зоны оси сжатия Р [9], теперь заштриховывают зоны оси растяжения Т [6], что нужно иметь ввиду при чтении литературы разных лет.

Для 1-ой НПР Байсорунского землетрясения наносим на лимбе риску азимута простирания  $180^\circ$  и противоположную  $180^\circ + 180^\circ = 360^\circ$  или  $0^\circ$ . Выводим риски на вертикальный диаметр палетки. Со стороны востока отсчитываем от лимба к центру  $82^\circ$  градуса, чтобы дуга изображала плоскость, падающую на запад. Найденную точку соединяем с рисками на лимбе подходящей дугой сетки. Эта дуга изображает первую нодальную плоскость на сетке. Точку, расположенную точно посередине дуги, т. е. на пересечении линии восстания с дугой, называют **вершиной дуги**. Построив вершину (В1), в сторону запада рисуем стрелочку, изображая направление падения. От точки В1 по направлению стрелки отсчитываем  $90^\circ$ , чтобы найти полюс 1-ой нодальной плоскости, обозначаемый Z. Построенная аналогично вторая плоскость  $271^\circ, 77^\circ$  С

Таблица 1. Фрагмент каталога механизмов очагов землетрясений (данные СОМЭ)

Дата, землетрясение	Ось сжатия, Р		Ось растяжения, Т		Промежуточная ось, N		Нодальные плоскости				
	Azm	$\alpha$	Azm	$\alpha$	Azm	$\alpha$	№	STR	и	SLIP	SHEAR
12.11.1990, Байсорунское	316	75	45	87	149	15	1	180	82 3	-13	-77
							2	271	77 С	-172	82
30.12.1993, Текелийское	164	88	73	60	256	30	1	32	68 ЮВ	21	-69
							2	295	70 СВ	157	67

*Примечание.* Обозначения в таблице: Azm – азимут оси;  $\alpha$  – угол с вертикалью; STR – азимут простирания плоскости; и – угол падения плоскости; SLIP – угол скольжения; SHEAR – угол подвижки (графический)

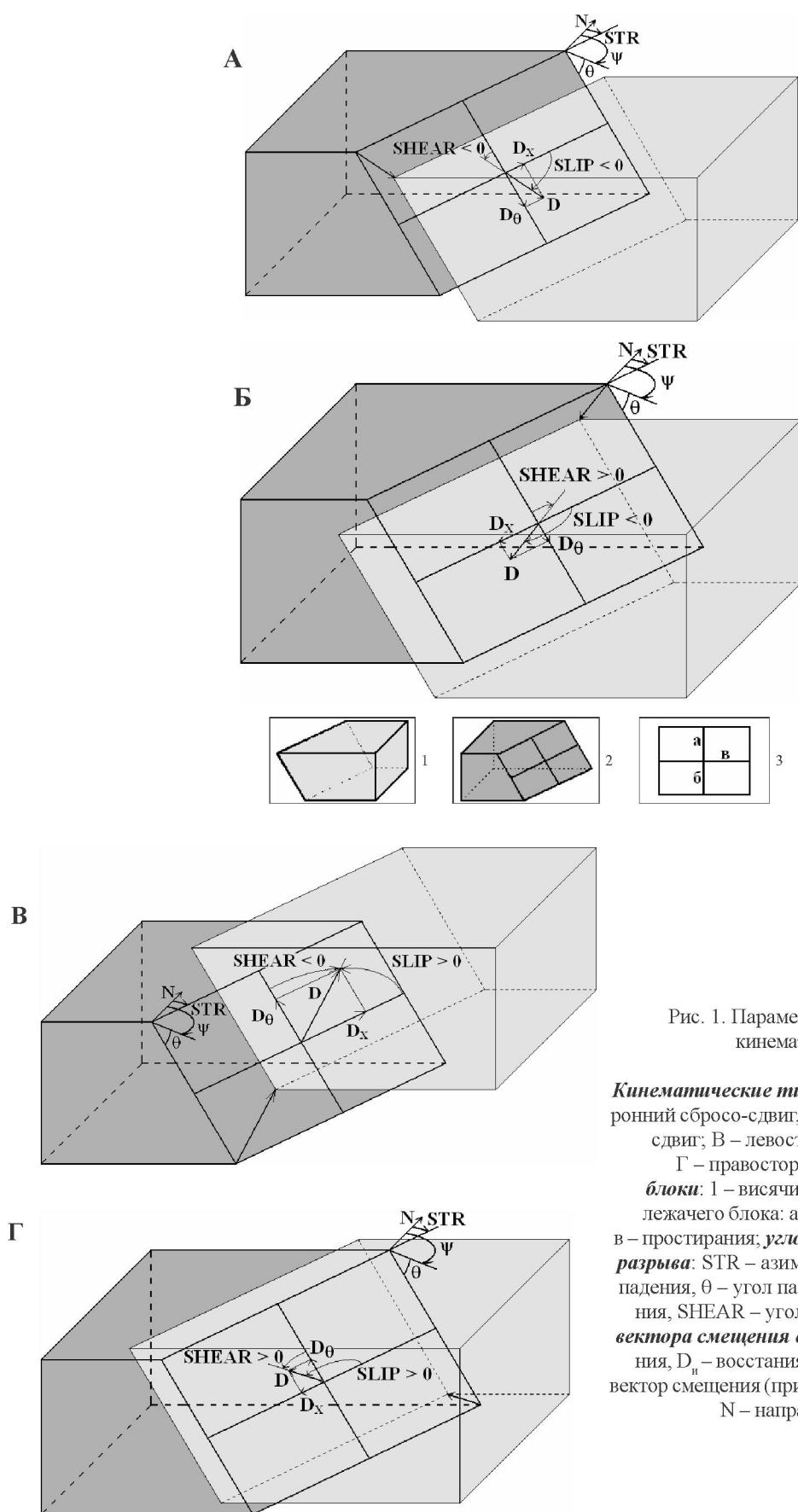


Рис. 1. Параметры разломов четырех кинематических типов

**Кинематические типы движений:** А – левосторонний сбросо-сдвиг, Б – правосторонний сбросо-сдвиг, В – левосторонний взбросо-сдвиг, Г – правосторонний взбросо-сдвиг.

**блоки:** 1 – висячий, 2 – лежачий, 3 – линии лежачего блока: а – восстания, б – падения,

**угловые параметры плоскости разрыва:** STR – азимут простирания,  $\psi$  – азимут падения,  $\theta$  – угол падения, SLIP – угол скольжения, SHEAR – угол подвижки;

**компоненты вектора смещения вдоль линий:**  $D_x$  – простирания,  $D_\theta$  – восстания-падения;  $D$  – суммарный вектор смещения (принят равным единице длины);

**N** – направление на север

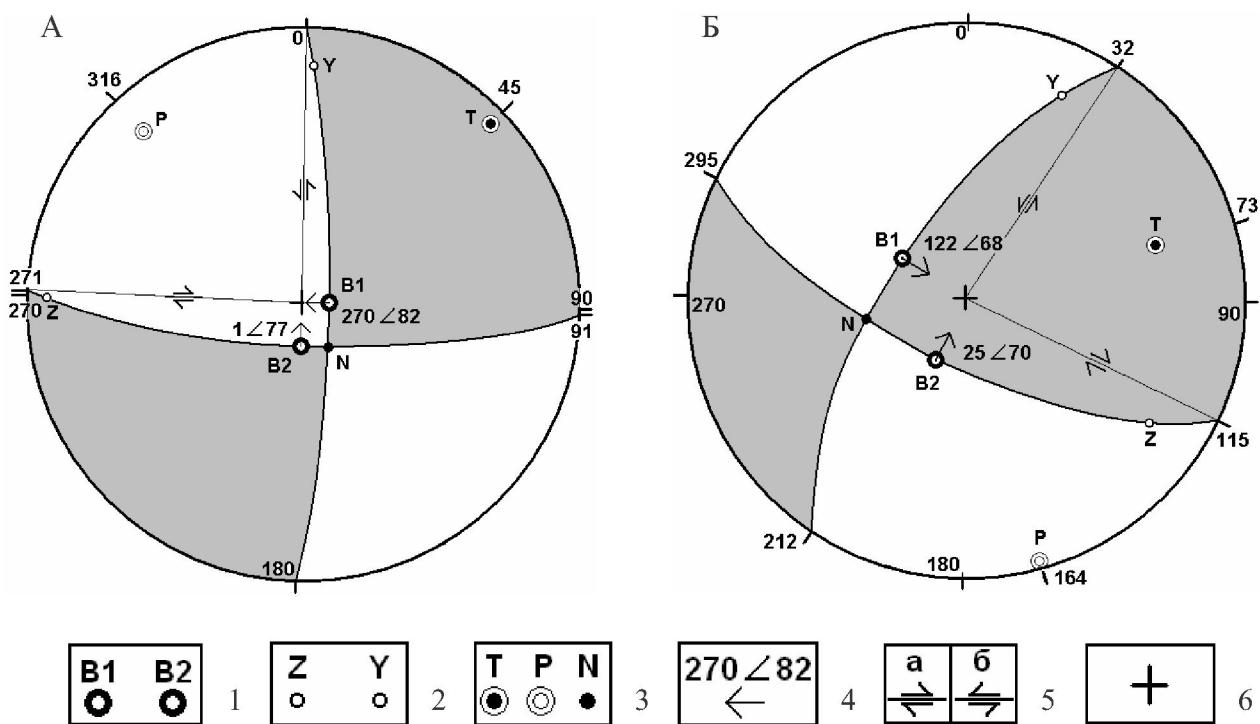


Рис. 2. Построение механизмов очагов четырех кинематических типов разломов на примере Байсорунского и Текелийского землетрясений

**Стереограммы очаговых механизмов:** А – Байсорунское землетрясение (левосторонний (НПР № 1) и правосторонний (НПР № 2) сбросо-сдвиги), Б – Текелийское землетрясение (левосторонний (НПР № 1) и правосторонний (НПР № 2) взбросо-сдвиги); 1 – вершины нодальных плоскостей: первой (B1), второй (B2); 2 – полюса нодальных плоскостей (оси подвижек): первой (Z), второй (Y); 3 – оси главных напряжений: растяжения (T), сжатия (P), промежуточная (N); 4 – азимут и угол падения нодальной плоскости; 5 – направления сдвигов в плане: правого (а), левого (б); 6 – центр диаграммы

пройдет через полюс Z. Полюс 2-ой нодальной плоскости, обозначаемый Y, будет лежать на 1-ой дуге.

Нанесем теперь ось сжатия, отметив сначала на лимбе ее азимут 316°. Совместим на лимбе риску с азимутом 316° с любым из диаметров и отсчитаем от центра 75°, нанесем точку и подпишем P (ось сжатия).

Аналогично нанесем ось растяжения T. Соединим риски азимутов простириания каждой нодальной плоскости с центром диаграммы так, чтобы не пересекать смежную дугу. Так как в полученном квадранте находится ось сжатия, то рисуем вдоль нанесенных отрезков со стороны оси сжатия стрелки к центру диаграммы, изображая сжатие. С противоположных сторон рисуем противонаправленные стрелки. По направлению стрелок определяем, что у второй нодальной плоскости произошел правый сдвиг (стрелки направлены по часовой стрелке), а у первой плоскости произошел левый сдвиг (стрелки направле-

ны против часовой стрелки). Поскольку в зоне, куда падают разрывы, находится ось сжатия P, то движение содержит компоненту сброса. Найдем угол подвижки первой нодальной плоскости. При графическом построении угол подвижки измеряется от вершины до полюса сопряженной нодальной плоскости. Угол подвижки получил свое название из-за того, что оси, соответствующие полюсам нодальных плоскостей Z и Y, называются **осами подвижек** [3, с. 52; приложение, рис. 17]. Отсчитывая градусы по дуге, найдем, что угол подвижки от вершины B1 до полюса Y равен 77°. Полюс смежной плоскости находится левее вершины дуги, если смотреть по восстановию противоположно сбросу. Поэтому угловому смещению присваиваем знак «-», и угол подвижки 1-ой плоскости равен: SHEAR<sub>1</sub> = (-77)°.

Аналогично определим, что угол на второй дуге от вершины B2 до полюса Z равен 82°. Поскольку полюс смежной плоскости находится правее вершины дуги, если смотреть по восста-

нию, противоположно сбросу, то углу присваиваем знак «+». Поэтому угол подвижки 2-ой плоскости равен:  $\text{SHEAR}_2 = 82^\circ$ .

Нодальные плоскости Байсорунского землетрясения были иллюстрацией левого и правого сбросо-сдвигов. Для иллюстрации левого и правого взбросо-сдвигов построим стереограмму Текелийского землетрясения по данным из табл. 1.

Для 1-ой плоскости разрыва Текелийского землетрясения наносим на лимбе риски азимутов простирации  $32^\circ$  и  $212^\circ$ . Выведя риски на вертикальный диаметр, со стороны СЗ отсчитываем от лимба к центру  $68^\circ$ . Найденную точку соединяем с рисками на лимбе, изображая плоскость, падающую на ЮВ, и рисуем от точки в сторону ЮВ стрелку падения. От точки по направлению стрелки отсчитываем  $90^\circ$ , чтобы найти полюс 1-ой нодальной плоскости Z. Построенная аналогично вторая плоскость  $295^\circ$ ,  $70^\circ$  СВ пройдет через полюс Z. С другой стороны, полюс Y 2-ой нодальной плоскости будет лежать на 1-ой дуге. Нанесем оси сжатия P ( $164^\circ$ ,  $88^\circ$ ) и растяжения T ( $73^\circ$ ,  $60^\circ$ ). Соединив риски азимутов простирации каждой нодальной плоскости с центром диаграммы, получим квадрант, в котором оказалась ось растяжения. Поэтому рисуем вдоль нанесенных отрезков со стороны оси растяжения стрелки, направленные от центра диаграммы, изображая растяжение. С противоположных сторон рисуем противонаправленные стрелки. По направлению стрелок определяем, что у первой НПР произошел левый сдвиг, а у второй НПР – правый сдвиг.

Поскольку в зоне, куда падают разрывы, находится ось растяжения T, то движение содержит компоненту взброса. Угол от вершины B1 до полюса Y первой НПР равен  $69^\circ$ . Поскольку полюс смежной плоскости находится левее вершины дуги, если смотреть по падению, противоположно взбросу, то угловому смещению присваиваем знак «-», и поэтому угол подвижки 1-ой плоскости равен:  $\text{SHEAR}_1 = (-69)^\circ$ . Аналогично, угол на дуге второй НПР от вершины B2 до полюса Z равен  $67^\circ$ . Поскольку полюс смежной плоскости находится правее вершины дуги, если смотреть по падению противоположно взбросу, то угловому смещению присваиваем знак «+», и поэтому угол подвижки 2-ой плоскости равен:  $\text{SHEAR}_2 = 67^\circ$  (см. табл. 1).

### 3. Аналитический метод определения компонент смещения НПР.

Очевидно, что графические оценки параметров МОЗ, в т. ч. угла подвижки SHEAR, страдают погрешностью построения. Вычисление компонент  $D_u$  и  $D_x$ , как будет показано ниже, определяется не только углом подвижки SHEAR, но и кинематикой смещения. Поэтому практически полезны формулы вычисления углов подвижки и скольжения из угловых параметров осей главных напряжений и нодальных плоскостей.

Как следует из рис. 1, компонента подвижки в направлении простирания просто выражается через угол подвижки:

$$D_x = \sin \text{SHEAR}. \quad (1)$$

Компоненту подвижки в направлении линии падения-восстания удобно выражать через угол скольжения (см. рис. 1):

$$D_u = \sin \text{SLIP}. \quad (2)$$

Учитывая знак угла подвижки при левом и правом сдвигах (рис. 1), не трудно получить, что угол подвижки SHEAR и угол скольжения SLIP связаны отношениями:

$$\text{SLIP} = 90 + \text{SHEAR}, \text{ при взбросах}. \quad (3)$$

$$\text{SLIP} = -(90 + \text{SHEAR}), \text{ при сбросах}. \quad (4)$$

Из равенств (3) и (4) следует, что  $|\text{SLIP}| = 90 + \text{SHEAR}$ , или:

$$\text{SHEAR} = |\text{SLIP}| - 90. \quad (5)$$

Из формул (1) и (5) вытекает, что:

$$D_x = \sin \text{SHEAR} = \sin (|\text{SLIP}| - 90) = -\sin (90 - |\text{SLIP}|) = -\cos (|\text{SLIP}|),$$

и, учитывая, что косинус – четная функция, знак модуля можно опустить:

$$D_x = -\cos \text{SLIP}. \quad (6)$$

Подставляя в формулу (2) вместо SLIP правые части уравнений (3) и (4), получим:

$$D_u = \sin (90 + \text{SHEAR}) = \cos \text{SHEAR}, \\ \text{при взбросах}; \quad (7)$$

$$D_u = \sin \{- (90 + \text{SHEAR})\} = -\cos \text{SHEAR}, \\ \text{при сбросах}. \quad (8)$$

Связем с пространством трехмерную прямоугольную систему координат, такую, что ось

Ох направлена на северный географический полюс, ось Оу – на восток, ось Oz – по радиусу от центра Земли [4, с. 82]. Тогда связь между азимутальными ( $\psi, \theta$ ) и аналитическими ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) углами, задающими любую из нодальных плоскостей, определяется зависимостями [4, с. 83]:

$$\cos \alpha = \cos \psi \sin \theta, \quad (9)$$

$$\cos \beta = \sin \psi \sin \theta, \quad (10)$$

$$\cos \gamma = \cos \theta. \quad (11)$$

Если азимут падения плоскости  $\psi$  не равен  $90^\circ$  или  $270^\circ$  и угол падения  $\theta$  не равен нулю (этот тривиальный случай далее не рассматривается), то делением равенства (10) на равенство (9) получим формулу (12) для вычисления угла  $\psi$ . В противном случае вычисляем угол  $\psi$  по формуле (13). Из равенства (11) и того, что величины углов  $\theta$  и  $\gamma$  не превышают  $90^\circ$ , следует равенство самих углов – формула (14):

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{\sin \psi}{\cos \psi} = \frac{\cos \beta}{\cos \alpha}, \Rightarrow \psi = \operatorname{arctg} \left( \frac{\cos \beta}{\cos \alpha} \right),$$

$$\text{если } \psi \neq 90^\circ \text{ или } \psi \neq 270^\circ; \quad (12)$$

$$\operatorname{ctg} \psi = \frac{\cos \psi}{\sin \psi} = \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}, \Rightarrow \psi = \operatorname{arcctg} \left( \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \right),$$

$$\text{если } \psi = 90^\circ \text{ или } \psi = 270^\circ; \quad (13)$$

$$\theta = \gamma. \quad (14)$$

Обозначим координаты единичного вектора  $\mathbf{e}_1$  первой нодальной плоскости тройкой чисел  $(\cos \alpha_1, \cos \beta_1, \cos \gamma_1)$ , а вектора  $\mathbf{e}_2$  второй нодальной плоскости –  $(\cos \alpha_2, \cos \beta_2, \cos \gamma_2)$ . Найдем координаты срединного единичного вектора  $\mathbf{e}_{cp}$  между нодальными плоскостями  $(\cos \alpha_{cp}, \cos \beta_{cp}, \cos \gamma_{cp})$ . Воспользовавшись выкладками из [4, с. 86], получим:

$$\cos \alpha_{cp} = (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)R/2, \quad (15)$$

$$\cos \beta_{cp} = (\cos \beta_1 + \cos \beta_2)R/2, \quad (16)$$

$$\cos \gamma_{cp} = (\cos \gamma_1 + \cos \gamma_2)R/2, \quad (17)$$

$$R = \frac{\pm \sqrt{2}}{\sqrt{1 + \cos \varphi_{1-2}}}, \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \cos \varphi_{1-2} &= \cos \alpha_1 \times \cos \alpha_2 + \\ &+ \cos \beta_1 \times \cos \beta_2 + \cos \gamma_1 \times \cos \gamma_2. \end{aligned} \quad (19)$$

Нормировочный множитель  $R$  берется с таким знаком, при котором  $\cos \gamma_{cp}$ , вычисляемый по

формуле (17), получится не меньше нуля. Тот же знак при  $R$  берется при вычислении  $\cos \alpha_{cp}$  и  $\cos \beta_{cp}$ . Угол  $\varphi_{1-2}$  есть угол между нодальными плоскостями. Теоретически две нодальные плоскости перпендикулярны и тогда знаменатель в формуле (18) равен единице. На практике, в силу неточности определения и округления значений параметров МОЗ до целых градусов, угол  $\varphi_{1-2}$  несколько отклоняется в большую или меньшую сторону от  $90^\circ$ .

Из формул (15), (16) и (12) выражим азимут падения срединной плоскости  $\psi_{cp}$ , а из формул (17), (18) и (14) – ее угол падения  $\theta_{cp}$ :

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \psi_{cp} &= \frac{\cos \beta_{cp}}{\cos \alpha_{cp}} = \frac{\cos \beta_1 + \cos \beta_2}{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}, \\ \Rightarrow \psi_{cp} &= \operatorname{arctg} \left( \frac{\cos \beta_1 + \cos \beta_2}{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2} \right), \end{aligned} \quad (20)$$

$$\theta_{cp} = \gamma_{cp} = \arccos \left( \pm \frac{\cos \gamma_1 + \cos \gamma_2}{\sqrt{2(1 + \cos \varphi_{1-2})}} \right). \quad (21)$$

Так как функция  $\operatorname{arctg}$  возвращает значения в интервале  $[-90^\circ, 90^\circ]$ , то часть азимутов падения, которые реально находятся в четвертях II, III, IV, нужно исправить. К значениям  $\psi_{cp}$ , полученного по формуле (20) нужно прибавить  $180^\circ$  или  $360^\circ$ , так, чтобы исправленный угол находился внутри угла (не большего развернутого), образуемого азимутами падения нодальных плоскостей  $\psi_1$  и  $\psi_2$ .

По положению средней оси ( $\psi_{cp}, \theta_{cp}$ ) можно судить о том, какой знак у вертикальной составляющей смещения. Если средняя ось близка к оси сжатия Р, то произошел сброс, если к оси растяжения Т, то произошел взброс. По сути дела, вычисление средней оси есть вычисление одной из осей деформации Р или Т по угловым параметрам нодальных плоскостей. Сдвиговые составляющие у двух нодальных плоскостей всегда противоположны. Очевидно, что при сбросе (рис. 2, А), у той нодальной плоскости, азимут падения которой запаздывает на  $90^\circ$ - $180^\circ$  перед другой, наблюдается смещение типа левого сдвига. При взбросе (рис. 2, Б), наоборот, у той нодальной плоскости, азимут падения которой запаздывает на  $90^\circ$ - $180^\circ$  перед другой, наблюдается смещение типа правого сдвига.

Рассмотрим расчет средней плоскости (главной оси) на примере Байсорунского и Текелийского землетрясений (табл. 2).

Таблица 2. Аналитические расчеты параметров смещений в очагах Байсорунского и Текелийского землетрясений

Землетрясение	Нодальная плоскость				Средняя плоскость (главная ось Р или Т)			SHEAR, по формулам (25) и (26) (и кинематике)	Компоненты смещения	
	№	$\psi$	$\theta$	кинематика	Угол по формуле (20)	$\Psi_{cp}$	$\theta_{cp}$ по формуле (21)		$D_x$ по формуле (1)	$D_u$ по формулам (7) и (8)
Байсорунское	1	270	82	лев. сбросо-сдвиг	-44,97	315,03	75,19	-76,99	-0,9743	-0,2251
	2	1 (361)	77	прав. сбросо-сдвиг				81,98	0,99	-0,14
Текелийское	1	122	68	лев. взбросо-сдвиг	73,07	73,07	59,92	-68,90	-0,9330	0,3600
	2	25	70	прав. взбросо-сдвиг				67,00	0,9205	0,3907

Для Байсорунского землетрясения по формуле (20) получим значение угла ( $-44,97^\circ$ ). Если мы прибавим к этому углу угол  $360^\circ$ , то суммарный угол окажется между азимутами падения нодальных плоскостей  $\psi_1 = 270^\circ$  и  $\psi_2 = 1^\circ$  (или  $361^\circ$ ), следовательно  $\psi_{cp} = 360 + (-44,97) = 315,03^\circ$ . По формуле (21) найдем значение угла падения средней плоскости  $75,19^\circ$ . Как видно сравнением с табл. 1, мы получили точные углы для оси сжатия Р. Поскольку средняя ось близка к оси сжатия Р, то произошел сброс. У первой нодальной плоскости наблюдается смещение типа левого сдвига, т. к. ее азимут ( $270^\circ$ ) запаздывает перед азимутом падения второй нодальной плоскости ( $361^\circ$ ). Поэтому у второй нодальной плоскости произошло противоположное смещение типа правого сдвига. Итак, для Байсорунского землетрясения кинематический тип первой нодальной плоскости левый сбросо-сдвиг, а у второй – правый сбросо-сдвиг, что совпадает с графическими данными (рис. 2).

Аналогичные расчеты проводим для Текелийского землетрясения (табл. 2). Для него получено, что кинематический тип первой нодальной плоскости левый взбросо-сдвиг, а у второй – правый взбросо-сдвиг (рис. 2).

С известными кинематическими типами разломов, для вычисления относительных компонент смещения  $D_x$  и  $D_u$  достаточно определить модуль угла SHEAR. В силу определения, модуль угла

SHEAR есть угол между осями, проходящими через вершину дуги данной плоскости и полюсом сопряженной нодальной плоскости.

Ось полюса нодальной плоскости описывается собственными аналитическими координатами ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) или азимутальными координатами ( $\psi, i$ ).

Азимутальные координаты вершины нодальной плоскости ( $Azm_B, \alpha_B$ ) определяются следующими простыми соотношениями. Азимут оси, проходящей через вершину дуги ( $Azm_B$ ), противоположен азимуту падения самой плоскости:

$$Azm_B = \psi + 180, \text{ если } \psi < 180^\circ; \quad (22)$$

$$Azm_B = \psi - 180, \text{ если } \psi \geq 180^\circ. \quad (23)$$

Угол падения оси, проходящей через вершину дуги ( $\alpha_B$ ), дополняет до  $90^\circ$  угол падения самой плоскости:

$$\alpha_B = 90 - \theta. \quad (24)$$

Тогда можно определить модуль угла подвигки, например, первой нодальной плоскости SHEAR<sub>1</sub> по формуле [4, с. 87] для азимутальных координат полюса второй нодальной плоскости ( $\psi_2, i_2$ ) и вершины первой нодальной плоскости ( $Azm_{B1}, \alpha_{B1}$ ):

$$\begin{aligned} \cos SHEAR_1 &= \cos(Azm_{B1} - \psi_2) \sin \alpha_{B1} \sin \theta_2 + \\ &+ \cos \alpha_{B1} \cos \theta_2 = \cos(\psi_1 \pm 180 - \psi_2) \sin(90 - \theta_1) \sin \theta_2 + \\ &+ \cos(90 - \theta_1) \cos \theta_2 = \sin \theta_1 \cos \theta_2 - \\ &- \cos(\psi_1 - \psi_2) \cos \theta_1 \sin \theta_2. \end{aligned} \quad (25)$$

Аналогично модуль угла подвижки, второй нодальной плоскости  $SHEAR_2$  выразится через азимутальные координаты полюса первой нодальной плоскости ( $\psi_1, i_1$ ) и вершины второй нодальной плоскости ( $Azm_{B2}, \alpha_{B2}$ ):

$$\begin{aligned} \cos SHEAR_2 &= \cos(Azm_{B2} - \psi_1) \sin \alpha_{B2} \sin \theta_1 + \\ &\quad + \cos \alpha_{B2} \cos \theta_1 = \\ &= \sin \theta_2 \cos \theta_1 - \cos(\psi_2 - \psi_1) \cos \theta_2 \sin \theta_1. \end{aligned} \quad (26)$$

Так как угол  $SHEAR$  не больше  $90^\circ$  (по построению), то функция  $\arccos$  в формулах (25) и (26) вернет модуль угла  $SHEAR$ . Вычисления угла  $SHEAR$  и компонент подвижки приведены в таблице 2. Например, для первой нодальной плоскости по Байсуринскому землетрясению получим  $|SHEAR_1| = 76,99^\circ$ . Выше определено, что на данной плоскости произошел левый сбросо-сдвиг, значит угол  $SHEAR_1$  отрицателен (левый сдвиг), т. е.  $SHEAR_1 = (-76,99)^\circ$ . Затем можно вычислить компоненту смещения в направлении простирания ( $D_x$ ) по формуле (1), а компоненту смещения в направлении линии падения-восстания по формуле (8), т. к. произошел сброс (табл. 2).

### Выводы

1. Если направление смещения в плоскости разрыва характеризуется углом скольжения, то по знаку угла легко определить вертикальную составляющую подвижки (взброс при знаке «+» и сброс при знаке «-»), если же направление смещения характеризуется углом подвижки, то по знаку угла легко определить горизонтальную составляющую подвижки (правый сдвиг при знаке «+» и левый сдвиг при знаке «-»).

2. Наличие как угла скольжения  $SLIP$ , так и угла подвижки  $SHEAR$  дает возможность качественно судить о кинематике разлома без расчетов и графических построений.

3. Из угла скольжения  $SLIP$  (который часто приводится в современных каталогах) можно вычислить относительные компоненты подвижки вдоль линии простирания разрыва ( $D_x$ ) по формуле (6) и вдоль линии падения-восстания ( $D_u$ ) по формуле (2). Методика с использованием угла подвижки  $SHEAR$  требует сначала выяснения, что произошло: взброс или сброс. Затем уже нужно использовать одну из формул: (7) или (8) для вычисления относительной компоненты вдоль линии падения-восстания.

4. Для двух нодальных плоскостей знаки при  $D_u$  всегда совпадают, т. к. обе НПР имеют либо сбросовую, либо взбросовую составляющую. Знаки же при  $D_x$  противоположны, т. к. у одной нодальной плоскости наблюдается левый сдвиг, а у другой правый сдвиг.

5. Предложенные аналитические формулы позволяют вычислить компоненты смещения по разломам при наличии азимутов и углов падения нодальных плоскостей и азимутов и углов осей сжатия и растяжения, которые, как правило, приведены в старых и новых каталогах землетрясений.

### Благодарность.

Автор статьи признателен ведущему геофизику СОМЭ Н. Н. Полешко за ценные консультации в области выявления механизма очага землетрясения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Ажгирей Г. Д. Структурная геология. М.: Изд-во МГУ, 1956. 493 с.
2. Введенская А. В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 136 с.
3. Жаланап-Тюпское землетрясение 25 марта 1978 года / Отв. ред. П. М. Айталиев. Алма-Ата: «Наука» КазССР, 1981. 136 с.
4. Жданович А. Р. Аналитический метод оценки трещиноватости скальных массивов в инженерной геологии // Геология Казахстана. 1996. № 3. С. 81-96.
5. Жданович А. Р. Метод расчета и анализа вееров плоскостей при изучении трещинной тектоники с применением аэрофотоснимков // Геология Казахстана. 1997. № 2. С. 63-74.
6. Жунусова А., Кулбаева У., Ли А., Полешко Н., Ревенко О., Силачева Н., Кен Судо. Определение механизмов очагов трех сильных землетрясений, зарегистрированных на сейсмической обсерватории «Медео» // Второй Казахстанско-японский семинар «Проблемы предотвращения последствий разрушительных землетрясений» (Казахстан, Алматы, ИС МОИИ и АЧС РК ЛСА, 23-25 сентября 2002): Докл. Алматы: Эверо, 2003. С. 126-131.
7. Землетрясения Северной Евразии в 1994 году. М: ГС РАН, 2000. 306 с.
8. Курскеев А. К. Землетрясения и сейсмическая безопасность Казахстана. Алматы: Эверо, 2004. 504 с.
9. Лукк А. А., Юнга С. Л., Шкляр Г. П. и др. Вопросы точности определения механизмов очагов коровых землетрясений и сейсмотектоническая деформация Средней Азии и Казахстана // Землетрясения Средней Азии и Казахстана, 1980. Душанбе: Дониш, 1982. С. 66-95.
10. Шебалин Н. В. Очаги сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1974. 53 с.
11. Флинт Е. Е. Начала кристаллографии. М., 1952. 224 с.