

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НА ПРИМЕРЕ СЕЙСМОГЕННЫХ РАЗЛОМОВ

Л. А. Хамидов, Ф. Ф. Зияудинов, К. Ф. Зиявитдинов, М. А. Халилов

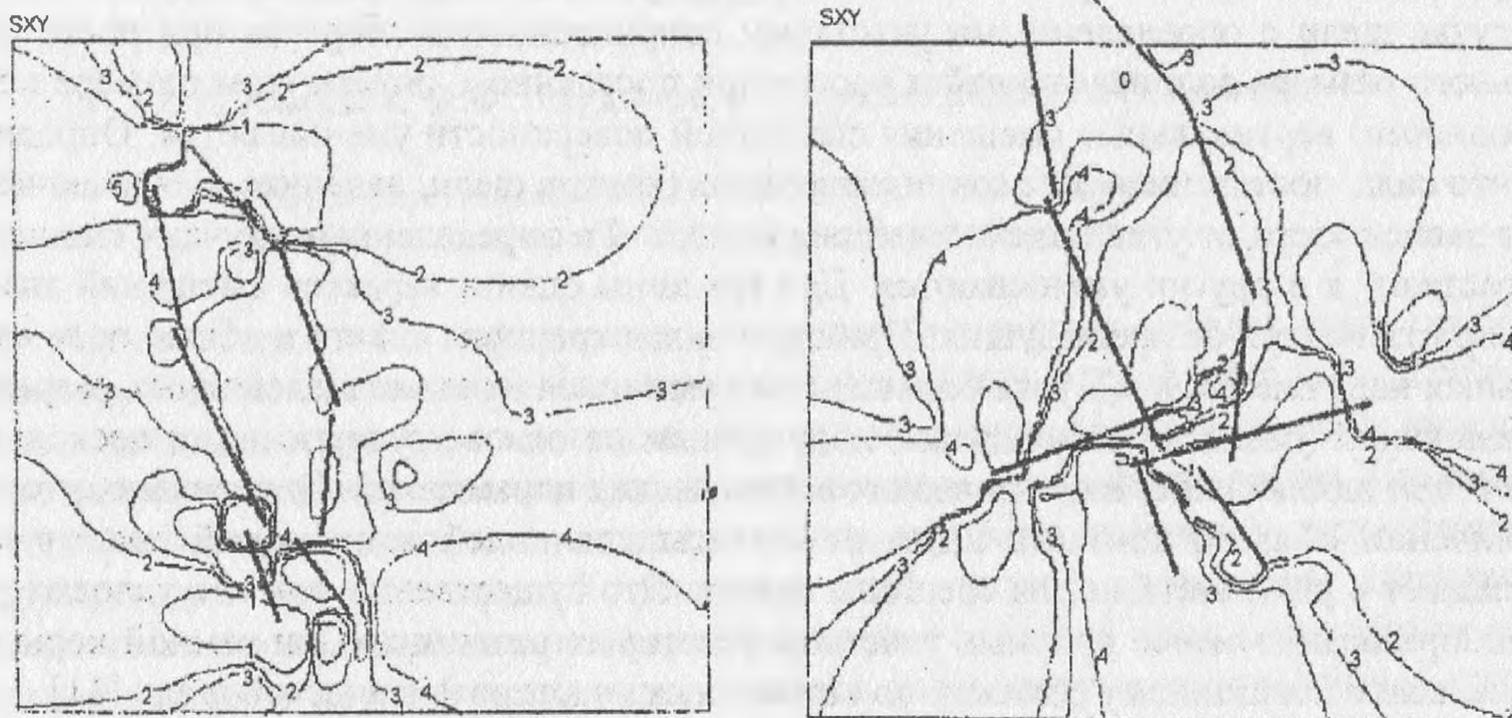
*Институт сейсмологии АН Узбекистан, 700128, Ташкент,
Ц-12, ул. Зулфияxonим 3. E-mail : tashkent@seismo.org.uz*

Изучение процессов деформации и разрушения в горных породах стало особенно важным в связи с возникновением в геотектонике очень острой проблемы прочности геологических структур, в частности, определения параметров разрывных нарушений по целому комплексу признаков, проявляющихся на поверхности земли. Поэтому в [1,2,13,14] нами предложена компьютерная модель изучения прочности, разрушения и деформирования земной коры. К решению этой задачи привлечены механико-математические модели процессов перераспределения силового поля, при котором создается возможность проводить для ряда условных форм нагружения численные эксперименты, а также расчет полей предельных (избыточных) напряжений для конкретных условий залегания тектонических структур [1,2]. Прежде всего проведен анализ кондиционно собранного натурального материала. В качестве исходной информации служили данные о расположении сейсмогенных разрывных зон [3], оцифрованы основные вертикальные смещения из карты современных движений земной коры [4], рассчитаны, пользуясь данными о скоростях продольно-поперечных волн для изучаемых районов, модули упругости и сдвига, коэффициенты упругости [5,6,7] и др. Объем статьи не позволяет приводить все эти данные т. к. они в совокупности достаточно громоздки. Вычислены осредненные глубины приблизительной границы земной коры по данным [8,9], которая получена равной 45 км. При этом использованы данные эпицентрии и сейсмогенных зон [3], преобладающее направление действующих сжимающих напряжений и их градиенты по глубине [10]. Проведена серия численных экспериментов для определения оптимальной элементной базы в методе граничных элементов, на основе которого созданы основные модели. Результаты тестовых вычислений на разных уровнях элементных баз компонентов напряжений (при котором использован тензор Миндлина для уравнений равновесия) показали, что картина концентрации напряжений в зависимости от элементной базы изменяется только при малых количествах элементов на границах концентраторов. При большом количестве элементов на границах разрывов наблюдается устойчивое изменение компонентов напряжений. Это значит, что чем больше привлечено для численных экспериментов элементной базы, тем точнее вычисляются компоненты напряжений. На основе 56-элементной базы построены проекции на поверхностную плоскость эпюр касательных напряжений от трещины сдвига, когда угол действующих главных напряжений по отношению к оси разлома составляет 60 градусов. При этом направления максимальных касательных напряжений находятся в зоне устойчивости Мора. Сравнительный анализ с эмпирическими данными [3,6] показал их совпадение с такими же направлениями, определенными инструментальными методами. Выявлено изменение нормальных и касательных напряжений от изменения элементной базы для тензора Миндлина при пространственном случае (основное изменение этих напряжений находятся в пределах использования от 40 до 80 элементов для трещин сдвига).

На базе созданного модуля и банка его информационного обеспечения, вычислены касательные напряжения для нескольких условий залегания (по глубине) различных разрывных нарушений при различных формах нагружения. В данном случае алгоритм позволяет вычислять все компоненты напряжений. В качестве примера рассчитаны распределения касательных напряжений, когда в полупространстве имеется сочетание трещин сдвига и включений (жестких). Вклад в образование максимального касательного напряжений в сближенной зоне двух неоднородностей при разных значениях модуля сдвига получился разным, и наоборот – при сочетании трещины сдвига и щели. В случае щели с определенными участками соприкосновения берегов при росте продольного размера соприкасающейся части (при постоянном поперечном размере неоднородности) вертикальные смещения свободной поверхности уменьшаются. Определено, что сила, достаточная для соприкосновения берегов щели, невелика, для включения же в зависимости от угла падения неоднородностей в определенных случаях смещения возрастают, а в других уменьшаются. Для трещины сдвига характер смещений значительно отличается от предыдущих. При этом вклад трещины сдвига в общее поле касательных напряжений в 1,7 раза больше, чем суммарное влияние щелевидных разрывов и включений (согласно результатам, полученным на основе суперпозиции нескольких задач при одинаковых геометрических и физических параметрах). Определено, что при увеличении области контакта щели результаты для полей напряжений практически совпадают с результатами для трещины сдвига. Это существенно, так как условия разрывообразования менее прочных участков некоторых разломных зон земной коры подобны выше показанному сближению контактных участков физической щели [11].

В качестве примера проведен расчет касательных напряжений для менее сейсмоактивного участка Кумбель-Угамской разломной зоны Центрального Тянь-Шаня. Горные массивы этой зоны характеризуются высокими прочностными свойствами и составлены из метоморфических и интрузивных пород. По простиранию Кумбельского разлома проведены две линии измерений направления залегания разрывных площадок, на которых в 14-х точках сделаны соответствующие замеры мелкой трещиноватости (1700 замеров), борозд скольжения (85 замеров), скоростные зондирования на базе 25 кв. км. (с глубиной массива в пределах 35 км.), составлен банк соответствующей информации по результатам измерений. Выбраны образцы из диоритов, гранидиоритов, известняков для экспериментального определения физико-механических характеристик при высоких P и T . В численной модели поверхность объема принята свободной от нагрузок, что соответствует природным условиям. Так как механизм очагов землетрясений (область разрушения) в этой зоне ориентирован в основном на сдвиг и сдвиго-сброс, то физическим законом, управляющим движением бортов этих разломов, является закон трения покоя Кулона, при котором касательные напряжения по плоскости разлома пропорциональны нормальным напряжениям. Рассчитаны по результатам измерения зеркал скольжения (34 площадок) средние вариации изменения коэффициента трения с северо-восточной части Угамского разлома в сторону юго-западной его части (на расстоянии 16-24 км). Вариация этих значений находилось в пределах от 0,4 до 0,75. Эти исследования показали, что по конкретным разломам движение происходит с жестким сцеплением, что и введено как краевое условие в численную модель. Определена произвольность распространения разрывов, согласно основному направлению действия касательных тектонических напряжений. Так как прямолинейное распространение разрыва возможно лишь при скоростях движения разрыва, меньших критического значения скорости испарывания, то основной зоной крупного разрывообразования является зона максимальных касательных напряжений (на численной модели она составляет около 25% всей исследуемой зоны разлома в которой основное напряжение изменяется в пределах $80 \div 170$ МПа). Скоростные характеристики условий образования разрывов для данного участка разлома подтвердили

предыдущее наше предположение о возможности изменения направления движения разрывов при определенных скоростях. Нужно отметить, что для различных значений жесткости горного массива это критическое значение скоростей лежит в пределах 0,4-0,6г ($\tau = 4,5\text{ км/сек}$) [13,14]. Построенные поля касательных напряжений для конкретного участка разлома (рис. 1) показали, что уровень распространенности участков максимальных отрицательных касательных напряжений выше, чем положительных, что указывает на расширенность области энергоконцентрации вблизи исследуемых разрывов.



$V_x = 1.00$	$V_y = 1.00$	1 -- -0.141
$V_x = 1.00$	$V_y = 1.00$	2 -- -0.040
$V_x = 1.00$	$V_y = 1.00$	3 -- -0.015
$V_x = 1.00$	$V_y = 1.00$	4 -- 0.055
$V_x = 1.00$	$V_y = 1.00$	5 -- 0.336
$V_x = 1.00$	$V_y = 1.00$	
$V_x = 1.00$	$V_y = 1.00$	

$V_x = 1.00$	$V_y = 1.00$	1 -- -1.507
$V_x = 2.00$	$V_y = -1.00$	2 -- -0.246
$V_x = 0.50$	$V_y = -0.50$	3 -- -0.029
$V_x = 2.00$	$V_y = 0.40$	4 -- 0.220
$V_x = 0.10$	$V_y = 0.20$	5 -- 1.610
$V_x = 1.00$	$V_y = 0.80$	
$V_x = 0.10$	$V_y = 2.00$	
$V_x = 11.00$	$V_y = 10.00$	
$V_x = 10.00$	$V_y = -5.00$	

Рис 1. Распределение касательных напряжений в зоне Кумбель-Угамского разлома Центрального Тянь-Шаня (а – совмещенность семи разрывов при одинаковом уровне выхода на поверхность разрывов; в – совмещенность девяти разрывов при разном уровне выхода на поверхность разрывов); изолинии безразмерных значений напряжений с 1-5-необходимо умножить на значения модуля сдвига конкретного участка разрывной зоны (1-3 – отрицательные; 4-5 – положительные); вниз-Ю; вверх-С.

При этом характер изменения напряжений указывает на то, что вертикальные движения в центральной части разрывных зон относительно сильнее по сравнению с движениями в периферийных зонах. Проведены расчеты для эталонного включения при падении его центральной оси под углом 30° к оси сжатия при действующих сдвиговых деформациях. Как показали результаты, существенной деформации подвергается, как правило, кромковая часть включения. По основной оси сдвига значения касательных напряжений резко меняют знак. Это указывает на то, что при действии скалывающих напряжений на область с определенной кусочной однородностью влияние расположения включения на знак локализующихся касательных напряжений контролируется геометрическими условиями наложения силы. Это существенно, так как до сих пор считалось [3,4,6,12], что расположение разрыва контролирует знак локализуемых

напряжений в ближней зоне кусочной однородности, независимо от геометрии наложения сил. Построена на основе расчета схема максимальных касательных напряжений, выделены зоны наиболее высокой концентрации дополнительных напряжений, появляющихся за счет наличия разломов с учетом геодезических смещений поверхности по данным [9,12,13]. На схеме выделены конкретные менее прочные зоны с наиболее высокими концентрациями напряжений, при которых могут происходить соответствующие внутрикоровые сбросовые процессы с силой не превышающей 4-8 МПа в пределах локальной прочности структур.

Список литературы

1. Хамидов Л.А., Содиков А.Р. Деформация упругого полупространства с повернутым включением // Узб. журн. Проблем механики, 1996. N3, С.24-27.
2. Хамидов Л.А., Зиявитдинов К. Ф. Математическая модель одной тектонофизической задачи // Узб. журнал. Проблемы механики, 1993. N2, С.15-19.
3. Ибрагимов Р.Н. Сейсмогенные зоны Среднего Тянь-Шаня. Ташкент, Фан, 1978. 144 с.
4. Ярмухамедов А.Р. Морфоструктура среднего Тянь-Шаня и ее связь с сейсмичностью. Ташкент: Фан, 1988. 163с.
5. Бакиев М.Х. Физические свойства горных пород сейсмоактивных зон Узбекистана при высоких давлениях и температурах. Ташкент: Фан, 1989. 288 с.
6. Безродный Е.М., Туйчиев Х.А. Механизмы очагов сильных землетрясений Узбекистана. Ташкент: Фан, 1987, 143 с.
7. Уломов В.И., Яковлева И.Б., Якубов М. Сейсмичность территории Узбекистана. Ташкент: Фан, 1990, 145 с.
8. Уломов В.И. Очаговая сейсмичность и долгосрочный прогноз землетрясений // Сб. Проблемные вопросы сейсмологии Средней Азии. Ташкент: Фан, 1988. С.32-87.
9. Хамидов Л.А., Иноятлов М.Ф. Районирование Восточного Узбекистана и прилегающих территорий по расчетам полей касательных напряжений // Сб. Прогноз сейсмической опасности. Ташкент: Фан.1994. Т1, С.124-131.
10. Садовский М.А., Нерсесов И.А., Писаренко В.Ф. Иерархическая дискретная структура литосферы и сейсмический процесс // Сб. Современная тектоническая активность Земли и ее сейсмичность. М.: Наука, 1987. С.17-28.
11. Корешков Н.А., Пискулин В.А., Райзман А.П. О некоторых результатах геодезических исследований деформаций земной поверхности в Средней Азии // Сб. Совр. движ. земной коры на геодинамических полигонах. М.: Радио и связь, 1978. С.50-57.
12. Корешков Н.А., Райзман А.П. Состояние и некоторые результаты изучения современных движений // Сб. Совр. движ. земной коры на геодинамических полигонах. М.: Наука, 1988. С.50-55.
13. Быковцев А.С., Семенова Ю.С. О взаимодействии системы дислокационных разрывов // Узб. журн. Проблемы механики, 1995. N3, С.9-13.
14. Крамаровский Д.Б. Об устойчивости отчлененного блока на наклонной плоскости // Узб. журн. Проблемы механики, 1995. N4, С.14-19.