

С.И. ШЕРМАН, А.Н. АДАМОВИЧ, А.И. МИРОШНИЧЕНКО

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА
ТЕКТОНИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ЗОН СОЧЛЕНЕНИЙ РАЗЛОМОВ*(Представлено академиком Н.А. Логачевым 22 VII 1986)*

Практически для всех сейсмоактивных регионов мира отмечается приуроченность эпицентров сильных землетрясений к разломам или, еще чаще, к местам их сочленений [1, 2]. При объяснении высокой сейсмичности этих тектонических структур основное внимание исследователей уделяется специфике геологического строения, масштабу сочленяющихся или пересекающихся разрывов, степени их активизации и др. [3—6 и др.]. Иными словами, ведутся поиски наиболее геологически важных генетических причин тектонической и сейсмической активности разломов. При этом вне внимания остаются внешне не существенные структурные факторы активности, такие как форма сочленяющихся структур и их положение в поле тектонических напряжений.

Исследования авторов были направлены на выявление структурных факторов, определяющих активность зон сочленений разломов и, следовательно, их сейсмический потенциал. В частности, впервые была проведена количественная оценка степени тектонической активности зон сочленений разломов в зависимости от формы сочленения и их ориентации в региональном поле тектонических напряжений. В литературе подобный вопрос не освещался, хотя и использовались методы математического и физического моделирования при решении практических задач, связанных с местами пересечения разломов [7, 8].

Зоной сочленения разломов (ЗСР) будем называть место пересечения разрывов и окружающее его пространство, на котором проявляются различные геолого-структурные процессы и (или) изменение напряженного состояния, вызванные пересечением или сочленением различно ориентированных дислокаций [9]. Центральную часть ЗСР образует разломный узел, который на местности представляет территорию, одновременно принадлежащую всем пересекающимся разрывам. В данном определении разрывы рассматриваются как геологические тела.

Условимся, что более активными в геологическом понимании следует считать те ЗСР, в пределах которых нарушение динамического равновесия (возникновение подвижек и рост трещин) происходит при меньших нагрузках. Разрастание разрывов или их сочленений и движение по ним сопровождается активным выделением упругой энергии (землетрясением).

В данной работе оценка условий активизации ЗСР сведена к решению плоской задачи о влиянии ЗСР и ее ориентации на прочность среды в определенном силовом поле. В качестве модели верхней части земной коры с ЗСР принимается в первом приближении бесконечная упругая плоскость с пересекающимися трещинами. Решается задача о напряженно-деформированном состоянии плоскости под действием на бесконечности статических взаимно перпендикулярных усилий p и q и нулевых усилий на исходных трещинах. Величины (p, q) являются аналогом главных напряжений, о значениях которых можно судить по работе [10]. Моделируемые ЗСР характеризуются количеством сочленяющихся трещин N , их полудлиной l_k , углом

α_k между k -й трещиной и осью OX декартовой системы координат, углом γ между p и OX .

Используя терминологию и стандартные обозначения, принятые в теории упругости при решении подобных задач, и применив методику, разработанную в [11–13], можно построить комплексные потенциалы Φ и Ψ , описывающие напряженно-деформированное состояние принятых моделей:

$$\Phi(z) = \frac{p+q}{4} + \sum_{k=1}^N \int_{-1}^1 Q_k(t, z) g'_k(t) dt,$$

$$\Psi(z) = -\frac{p-q}{2} e^{-2i\gamma} + \sum_{k=1}^N \int_{-1}^1 (R_k(t, z) g'_k(t) + F_k(t, z) \overline{g'_k(t)}) dt,$$

$$Q_k = \frac{l_k e^{i\alpha_k}}{2\pi(T_k - z)}, \quad R_k = -\frac{l_k e^{i\alpha_k} \bar{T}_k}{2\pi(T_k - z)^2}, \quad F_k = \frac{l_k e^{-i\alpha_k}}{2\pi(T_k - z)},$$

$$T_k = l_k e^{i\alpha_k} (1+t).$$

Применяя метод механических квадратур, подробно описанный в [11, 12], и используя предположение о нулевом коэффициенте интенсивности напряжений в точке пересечения, приходим к алгебраической системе уравнений относительно неизвестных u_k , где

$$u_k(t) = \sqrt{1-t^2} g'_k(t) / |p|.$$

Решение системы полностью определяет напряженно-деформированное состояние модели. Для определения коэффициента интенсивности напряжений у концов трещин использовалась формула [11]:

$$\frac{k_{1k} - ik_{2k}}{|p| \sqrt{2l}} = \sqrt{\frac{l_k}{2l}} \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (-1)^m u_k(\beta_m) \operatorname{ctg} \frac{2m-1}{4M} \pi,$$

где $u_k(\beta_m)$ – значение u_k в узлах $\beta_m = \cos \frac{2m-1}{2M} \pi$, а M – число узлов в квадратурных формулах. Здесь l – некоторый произвольный линейный размер. Состояние среды, нарушенной пересекающимися трещинами; оценим через показатель концентрации напряжений K_p :

$$K_p = \max \left(\frac{\cos^3(\theta_k/2) (k_{1k} - 3k_{2k} \operatorname{tg}(\theta_k/2))}{\sqrt{2l} |p|} \right),$$

$$\theta_k = 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{k_{1k} - \sqrt{k_{1k}^2 + 8k_{2k}^2}}{4k_{2k}} \right).$$

Из условия локального разрушения [11] следует, что более активной будет ЗСР, у которой больше значение K_p . Показатель K_p может быть назван коэффициентом активности трещиноватой среды, в данном случае коэффициентом активности ЗСР.

Авторы на ЭВМ провели расчет и оценку коэффициента активности K_p для некоторых видов ЗСР при различной их ориентации в силовых полях. На рис. 1 приведены графики K_p при изменении α от 0 до 180° , где α – угол между направлением напряжения p и первым лучом. Расчет активности проводился для ЗСР четырех элементарных типов в полях напряжений сдвига и растяжения. Следует отметить, что при определенных значениях параметров (p, q, γ и др.) берега трещин будут контактировать, что не учитывалось при решении задач.

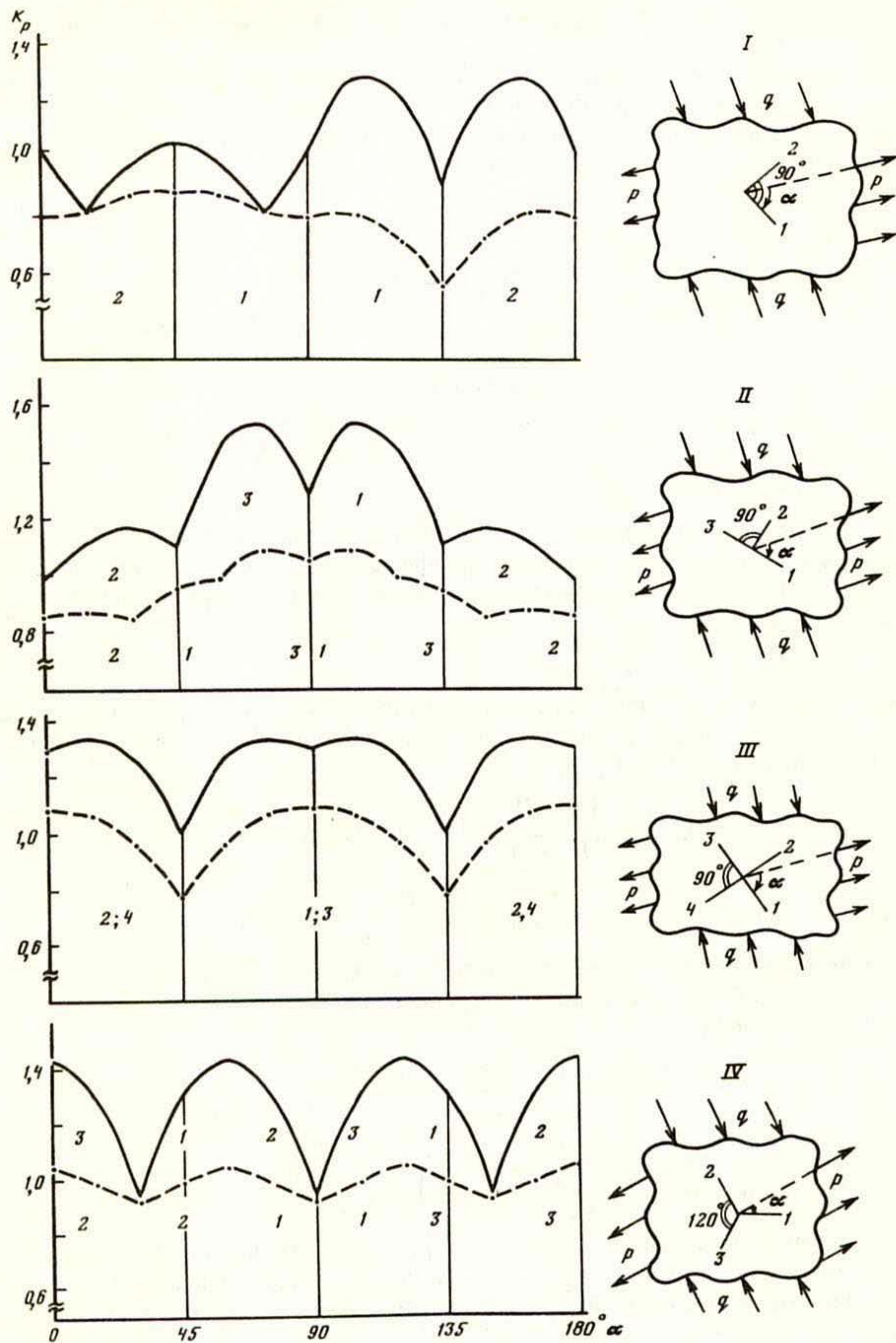


Рис. 1. Графики активности зон сочленений разломов и схемы моделирования (справа). Сплошная линия – сдвиговое поле ($p = -q$); штриховая – поле растяжений ($q = 0$). Римскими цифрами обозначены принципиальные типы сочленений, арабскими на графиках в соответствии со схемами указаны номера лучей с максимальными концентрациями напряжений

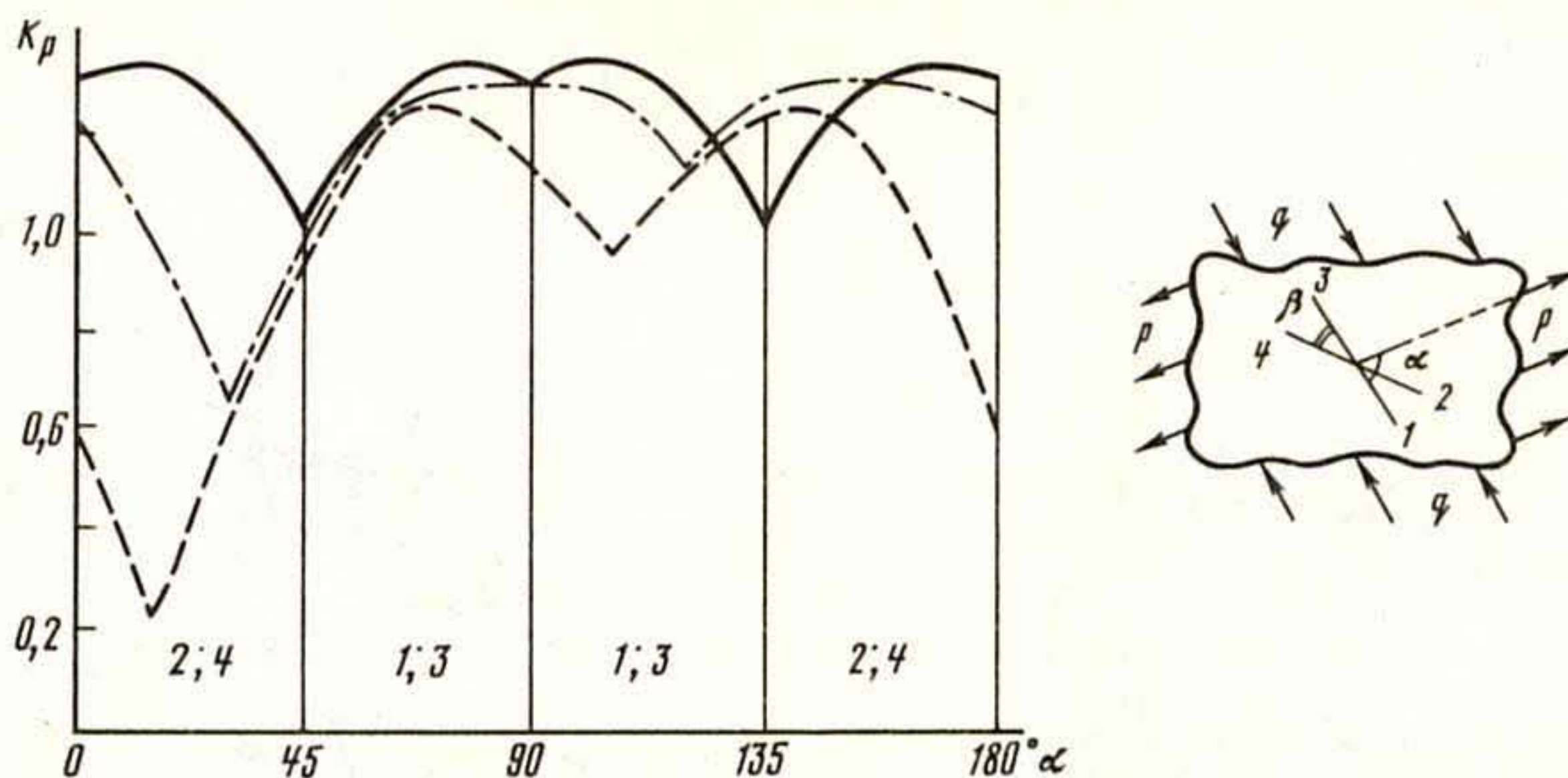


Рис. 2. Кривые активности зон сочленений разломов в сдвиговом поле при разных углах сочленений. β — угол между лучами. Сплошная линия — $\beta = 90^\circ$, штрих-пунктирная — $\beta = 60^\circ$, штриховая — $\beta = 30^\circ$; остальные обозначения см. рис. 1

Анализ графиков показывает существенное влияние ориентации ЗСР на степень активности. При изменении значений α величина K_p изменяется в широких пределах. Характер распределения K_p по интервалам α зависит от формы ЗСР. Наиболее сложные изменения K_p присущи ЗСР типов I и II, более простое поведение кривой K_p отмечается для ЗСР типов III и IV. Хорошо видно, что активность всех видов ЗСР в сдвиговом поле выше, чем в поле растяжения. Точки экстремума, где K_p имеет минимальную величину, соответствуют значениям угла α , при которых на концах пересекающихся трещин концентрируются одинаковые напряжения.

Значительное влияние на активность ЗСР оказывает и угол между сочленяющимися разрывами. Максимальное значение K_p характерно для перпендикулярного пересечения разрывов (см. рис. 2). Когда угол между разрывами уменьшается, значение K_p в целом также уменьшается. При этом фиксируется существенное "упрочнение" сочленения при малых углах β (рис. 2).

Математическое моделирование условий активности ЗСР проведено для полей напряжений сдвига и растяжения. При формировании разрывов в этих полях трение берегов трещин незначительно, оно не оказывает существенного влияния на подвижность блоков и им можно пренебречь. В поле напряжений сжатия игнорировать параметр трения нельзя, и решение этой же задачи выполнено физическим моделированием на оптически анизотропных моделях.

В качестве модельного материала использовались студни желатина, обладающие высоким коэффициентом оптической активности. Исследование напряженного состояния проводилось по методике [14, 15] на полярископе—поляриметре ПКС-250.

В качестве эталона была взята крестообразная по форме ЗСР (см. рис. 1, тип III). На рис. 3 приведены схемы строения локальных полей напряжений для различно ориентированных ЗСР III типа при одинаковом по величине одноосном сжатии. Хорошо видно, что характер распределения напряжений в пределах ЗСР существенно меняется в зависимости от их ориентации в силовом поле. При $\alpha = 45^\circ$ (рис. 3а) концентрации напряжений у концов сочленяющихся трещин равны по величине и превышают исходное значение τ_{max} в 2 раза. Отношение площадей областей повышенных и пониженных значений максимальных касательных напряжений близко к единице. Изменение же ориентации ЗСР к внешнему силовому полю приводит к резкой перестройке локальных полей напряжений. На рис. 3б приведена картина распределения τ_{max} при $\alpha = 75^\circ$. Повышенные значения напряжений характерны для концов разрывов, образующих минимальный угол с ориентировкой вектора сжа-

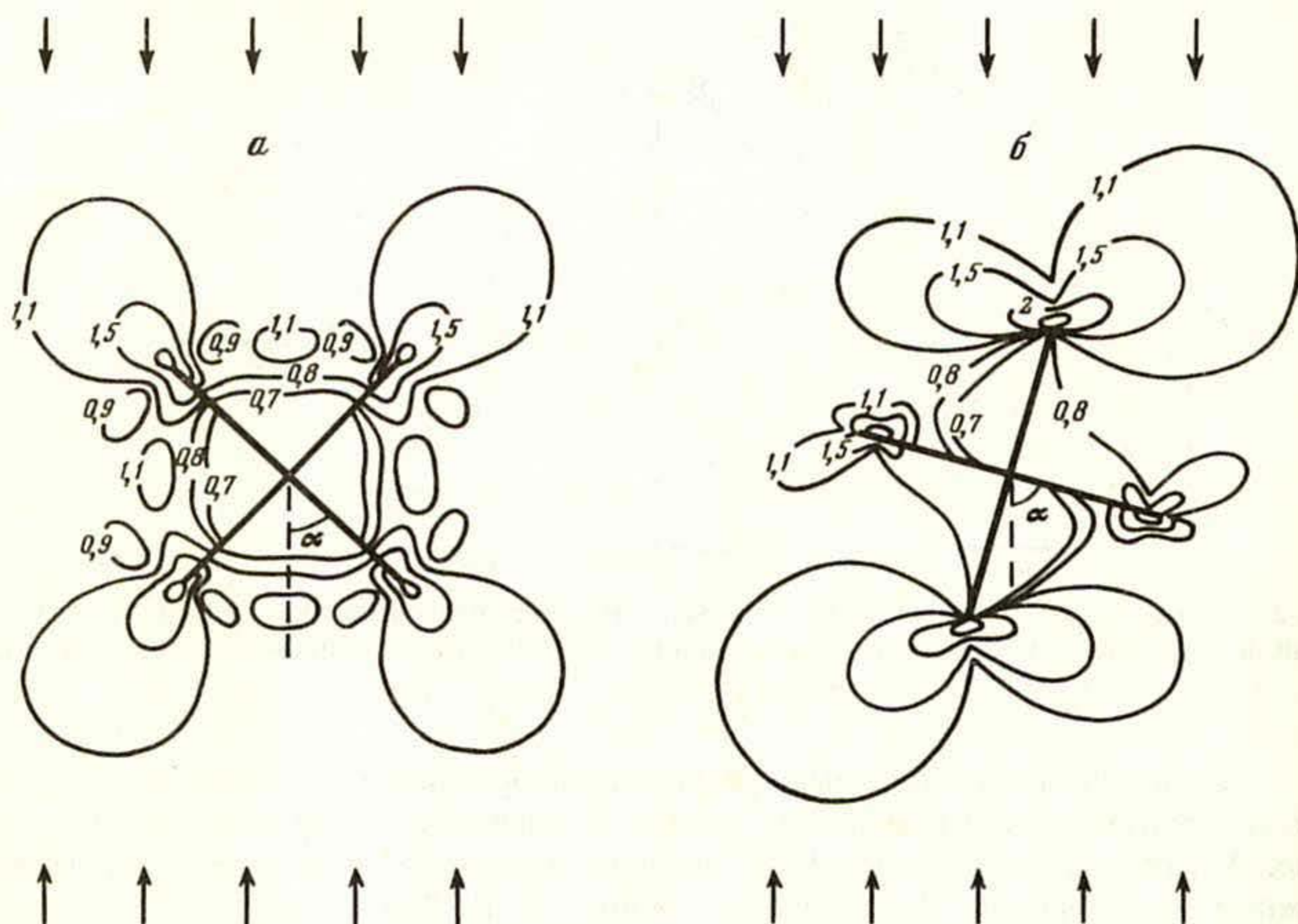


Рис. 3. Изменение интенсивности максимальных касательных напряжений в поле сжатия в зоне крестообразного сочленения разломов, ориентированных под углом 45° (а) и 75° (б) к оси сжатия. Стрелками показана ориентация поля сжатия. Числа у изолиний – интенсивность касательных напряжений

тия. Это свидетельствует о более высокой степени активности ЗСР в данном случае. Нарушается соотношение площадей повышенных и пониженных значений максимальных касательных напряжений.

В заключение отметим, что объяснение многочисленных вариантов геологической и сейсмологической обстановки, контролируемой разломными узлами и сочленениями, часто следует искать не в специфике геологического строения вмещающей среды, а прежде всего в различной активности ЗСР, вызванной их формой и положением в пространстве.

Институт земной коры
Сибирского отделения Академии наук СССР, Иркутск

Поступило
23 IX 1986

ЛИТЕРАТУРА

1. Ранцман Е.Я. Места землетрясений и морфоструктура горных стран. М.: Наука, 1979. 171 с.
2. Ерхов В.А. В кн.: Геолого-геофизические особенности и сейсмичность территории Киргизии. Фрунзе: Илим, 1978, с. 47–50.
3. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И. и др. Вычислительная сейсмология. М.: Наука, 1976, вып. 9, с. 3–91.
4. Рейснер Г.И. Геологические методы оценки сейсмической опасности. М.: Недра, 1980. 173 с.
5. Мишарина Л.А., Солоненко Н.В., Хренов П.М. – Геол. и геофиз., 1973, № 2, с. 103–106.
6. Губин И.Е. – ДАН, 1980, т. 253, № 3, с. 670–673.
7. Жидков М.П., Кособоков В.Г. Вычислительная сейсмология, М.: Наука, 1973, вып. 11, с. 43–76.
8. Гельфанд И.М. – ДАН, 1972, т. 202, № 6, с. 1317–1320.
9. Шерман С.И., Адамович А.Н., Мирошниченко А.И. – Геол. и геофиз., 1986, № 3, с. 10–18.
10. Кропоткин П.Н. В кн.: Напряженное состояние земной коры. М.: Наука, 1973, с. 21–31.
11. Панасюк В.В., Саврук М.П., Дацышин А.П. Распределение напряжений около трещин в пластинах и оболочках. Киев: Наук. думка, 1976. 444 с.
12. Саврук М.П. Двумерные задачи упругости для тел с трещинами. Киев: Наук. думка, 1981. 324 с.
13. Бойко А.В., Карпенко Л.Н. – Прикл. мех., 1980, т. 16, № 8, с. 64–70.
14. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.
15. Осокина Д.Н., Цветкова Н.Ю. В кн.: Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979, с. 139–162.