ISSN 0135-3500. Зап. Ленингр. горного ин-та. 1990. Том 121.

УДК 551.24+553.31

С.С.ШАКИН

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД В ЗОНАХ РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ

Рассматривается вопрос об исследовании параметров дизъюнктива с использованием опережающих дизъюнктив трещин по неориентированному керну разведочных скважин. Автор добивался максимальной сходимости расчетной и фактической картин и таким образом определял параметры дизъюнктива. В результате выяснено, что по данным трещиноватости керна можно определить только либо положение, либо геологический тип, либо форму разрывного нарушения, вызвавшего трещиноватость.

Разрывная зона представляет собой геологическое тело примерно пластинчатой формы сложного внутреннего строения [6, 8]. Внутреннее строение зоны и ее границы, иногда постепенные, фиксируются в породах чаще всего по характеру мелкой трещиноватости, ее виду, густоте, ориентировке. Трещиноватость давно привлекает внимание исследователей как важное в практическом отношении свойство горных пород.

Прежде чем приступить к моделированию, необходимо выбрать индикатор внутреннего строения разрывной зоны. Приразломная трещиноватость обычно делится [12] на опережающую разрыв во времени и пространстве и оперяющую разрыв, т.е. образовавшуюся при движении разорванных блоков друг относительно друга, однако критерии разделения этих трещин практически отсутствуют. Для любой системы трещин, подозрительной на оперяющую, можно показать, что она могла возникнуть незадолго перед формированием магистрального разрыва. При этом, правда, необходимо признать разные варианты схемы разрушения пород, наблюдаемые и выделенные Л.М.Расцветаевым [10] и О.И.Гущенко [3], иначе „пояса В.Н.Даниловича", широко используемые разными авторами [7, 9], становятся необъяснимыми. Кроме того, наличие оперяющих трещин затруднительно объяснить по механическим соображениям. Максимальный размер напряжений в горных породах наблюдается до образования разрыва, а движение по разрыву как раз и снимает эти напряжения. Таким образом, неясно, почему в области снятых напряжений должны образовываться трещины, если они не образовались в тех же породах при интенсивных напряжениях. Учитывая вышеизложенное, автор стоит на позиции слабого развития оперяющих трещин и ниже будет рассматривать только опережающие трещины.

Существует несколько моделей распределения мелких трещин вокруг разрыва, но все они (исключая качественные схемы [6]) не рассматривают каких-либо изменений приразломной трещиноватости по простиранию разрыва. Так построены схемы прогноза трещиноватости [7, 9, 11], согласно которым в выработке, пересекающей разрыв, измеряют трещиноватость и на основании измерений вычисляют коэффициенты, с помощью которых по выведенным формулам опре-

делят амплитуду смещения, характер разрыва и расстояние до него. Модели этого типа не объясняют, как должен изменяться характер трещиноватости (в частности, вычисляемые коэффициенты), поэтому автором была предложена другая схема, учитывающая внутреннее строение разрывной зоны [5, I4].

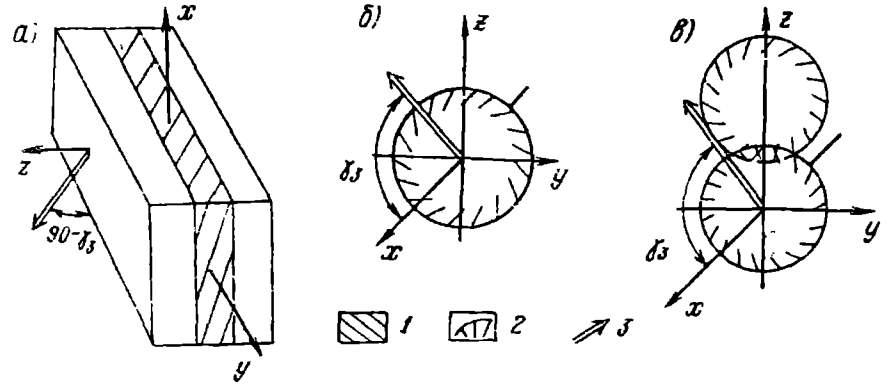


Рис.1. Модели зон разрывных нарушений: а - разрывная зона как зона пониженной вязкости; б - дискообразная трещина; в - правая кулиса из дискообразных трещин
1 - зона пониженной вязкости; 2 - плоскость трещины; 3 - внешняя сила

Основой ее явилось достаточно известное [9] положение о конечности разрыва как по простиранию, так и по падению. Напряжения в любой точке зоны разрыва описываются как результат перераспределения внешних напряжений на дискообразной трещине, в системе трещин или в зоне пониженной вязкости (рис.I). Трещиноватость в некоторой точке рассматривается как результат действующего в этой точке тензора напряжений. Интенсивность сколовой трещиноватости в точке пропорциональна максимальным касательным напряжениям в данной точке; площадки сколов наклонены под углом 30° к направлению максимального сжатия и средняя ось напряжений лежит на них; борозды скольжения на площадках сколов перпендикулярны средней оси напряжений; площадки отрыва перпендикулярны направлению максимального растяжения; интенсивность отрыва пропорциональна значению максимального растяжения. В результате получается математическое описание интенсивности, ориентировки и характера (скол-отрыв) трещиноватости в любой точке объема разрывной зоны. Работоспособность этой схемы основана на механических расчетах [I] (формулы распределения напряжений взяты из работ по механике), возможности рационального объяснения фактов ориентировки трещиноватости в глиняных моделях разрывных зон [I3] и подтверждается хорошей сходимостью вида опережения окончания разрыва [4] с результатами расчетов на основе этой схемы.

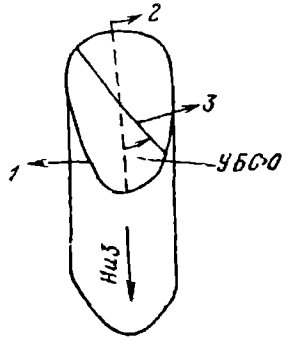


Рис.2. Геометрические характеристики трещин в керне со следами скольжения
1 - поверхность трещины; 2 - видимая линия падения трещины; 3 - направление борозд скольжения

Поскольку все параметры трещиноватости имеют в этой модели количественные значения, можно рассчитать, какой вид должна иметь приразломная трещиноватость в керне скважин. Угол наклона трещины к оси керна, видимый угол ныряния борозд (рис.2) и частота встречаемости трещин связаны с истинной ориентировкой трещин следующими соотношениями [2]:

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{\cos\alpha'' \sin(\alpha' - \beta')}{\sin\beta'' \sin\alpha'' - \cos\beta'' \cos\alpha'' \cos(\alpha' - \beta')}$$

$$\text{УБС} = \beta''' - \gamma;$$

$$\cos\gamma' = \cos\alpha'' \cos(\alpha' - \beta') \sin\beta'' - \cos\beta'' \sin\alpha'';$$

$$\text{УКОК} = 90^\circ - \gamma',$$

где α' – азимут оси скважины; α'' – угол наклона скважины; β' – азимут падения трещины; β'' – угол падения трещины; β''' – угол ныряния борозд скольжения; УБС – угол ныряния борозд скольжения в керне; УКОК – угол наклона трещины к оси керна; γ и γ' – промежуточные углы.

Таким образом, возникает возможность проверки гипотезы о тектоническом строении некоторого участка. Критерием достоверности гипотезы будет степень совпадения параметров трещиноватости исходя из принятой структурной гипотезы и фактической трещиноватости, наблюдаемой в керне скважин.

Все предлагаемые модели имеют параметры, которые в реальных условиях будут меняться. В частности, для модели двух перекрытых кулис (см. рис.I, в) это масштабы по осям координат (степень анизотропии среды и степень эллиптичности основных трещин), угол скалывания γ_3, коэффициент Пуассона, степень перекрытия кулисного ряда, вид кулисы (правая или левая). Кроме того, при формировании гипотезы о структуре некоторого участка необходимо кроме вида структуры предположить, где она находится в пределах изучаемого участка, т.е. задать еще шесть параметров положения начала координат и наклона осей в реальной геологической структуре. Исследуя поведение модели при задании параметров, можно найти те их значения, при которых расчетная ориентировка трещиноватости в модели наиболее приближается к замеренной в скважинах трещиноватости, и таким образом установить структуру изучаемого участка.

Для апробации предложенной схемы был проведен эксперимент с использованием данных по небольшому участку (200 х 200 м) Куржункульского скарново-магнетитового месторождения Тургайского прогиба, геология которого исследована довольно подробно [I5]. Участок, перекрытый с поверхности чехлом мезозойско-кайнозойских отложений мощностью около 30 м, представляет собой фрагмент сдвиговой зоны, образовавшейся по механизму сдвига с растяжением (судя по многочисленным текстурам растяжения). Зона выходит в карьер в 200 м восточнее исследуемого участка в виде серии сколовых трещин с горизонтальными бороздами скольжения. В карьере она прослеживается по простиранию на расстояние около 300 м. Изучаемый фрагмент зоны вскрыт семью примерно крестообразно расположенными скважинами глубиной около 200 м. Во всех скважинах наблюдалась сорудная [I4] трещиноватость и были рассчитаны средние углы наклона трещин к оси керна, средние углы ныряния борозд

скольжения и средняя интенсивность сколовой трещиноватости на каждом пятиметровом интервале проходки. На изучаемом участке имеется магнитная аномалия ΔZ с локальным максимумом примерно в центре участка и удлиненная в широтном направлении.

Были приняты две гипотезы о строении изучаемого участка: I) сколовая зона с началом координат в центре участка (модель рис.I, а); 2) межкулисный промежуток (модель с рис.I, в). Ось x модели I и ось z модели 2 наклонены под углом 10^{0} к югу, в соответствии с соотношением вертикальных и горизонтальных борозд скольжения.

Критерием правильности гипотезы являлись коэффициенты корреляции между парами значений – вычисленного по модели и измеренного в скважине. Рассматривались три коэффициента: I – интенсивности сколовой трещиноватости, II – угла наклона трещин к оси керна УКОК и III – угла ныряния борозд скольжения УБС. При фиксированном тензоре напряжений возможны две сопряженные системы сколовых трещин [5]. Для вычисления коэффициентов корреляции из модели выбиралась та система, которая наименее отклоняется от наблюдаемой в керне. Далее методом координатной сходимости определялся максимум, т.е. изменялся один из параметров модели при фиксации всех прочих и устанавливалось значение изменяемого параметра, при котором значения контрольных коэффициентов максимальны. Далее значение первого параметра заменялось на найденное на предыдущем шаге, выбирался следующий параметр и производилась аналогичная операция и т.д.

Здесь возникает необходимость решать основной вопрос аппроксимации: что описывает сформированная модель – реальную структуру или набор исходных данных. Абсолютно определенно на этот вопрос нельзя ответить никогда, но очевидно, что модель может описывать структуру только в том случае, если все три проверочных коэффициента изменяются примерно синхронно при изменении параметров и имеют в максимуме близкие значения. Для обеспечения достоверности аппроксимации при нахождении максимума принимался во внимание только один или два коэффициента сходимости, а остальные использовались для контроля достоверности.

Эксперимент показал (см. таблицу), что при подборе значения первых трех параметров модели значения всех трех проверочных коэффициентов синхронно увеличиваются. Далее значения их стабилизируются, и максимум коэффициентов сходимости приходится на то значение параметра, которое выбиралось как начальное приближение. Однако начиная с некоторого параметра (в нашем случае с пятого) увеличение одних проверочных коэффициентов сопровождается уменьшением других, то есть модель „расходится". Следовательно, с помощью модели можно подобрать значение только нескольких первых параметров, до стабилизации максимума на начальном приближении. Экспериментально установлено, что для заданных условий определяются только три любых параметра. Это значит, что модель может ответить только на один из вопросов: где находится разрывное нарушение (положение начала координат модели на моделируемом участке); какую форму имеет разрывное нарушение в осевой плоскости (соотношение масштабов осей x, y); какой

Определение коэффициентов корреляции для модели зоны пониженной вязкости (рис. 1, а)

Номер параметра	Изменяемый параметр	Коэффициенты корреляции		Номер параметра	Изменяемый параметр	Коэффициенты корреляции	
		I x III	Максимальное значение			I x III	Максимальное значение
	Масштабный коэффициент оси x				0,6	0,08	
	0,2	0,01	I_{max} 0,345		0,7	0,11	
	0,4	0,00	II_{max} 0,416		0,8	0,10	
	0,6	0,04	III_{max} 0,252		0,9	0,09	
	0,8	0,			1,0	0,10	
	1,0	0,06				0,10	
	1,2	0,00			1,2	0,09	
	1,4	0,01		4	Сдвиг от центра, ось x		
	1,6	0,01			-0,5	-0,14	I_{max} = 0,345
	1,8	0,02			-0,4	0,00	II_{max} = 0,334
	2,0	0,00			-0,3	0,06	III_{max} = 0,335
2	Масштабный коэффициент оси y				-0,2	0,03	
	0,02	0,03	I_{max} 0,345		-0,1	0,11	
	0,04	0,08	II_{max} 0,334		0,0	0,00	
	0,06	0,08	III_{max} = 0,335		0,1	0,00	
	0,08	0,11			0,2	0,01	
	0,10	0,10			0,3	0,00	
	0,12	0,09			0,4	-0,04	
	0,14	0,09		5	Сдвиг от центра, ось y		
	0,16	0,09			-0,5	0,04	I_{max} 0,226
	0,18	0,09			-0,4	0,02	II_{max} 0,447
	0,20	0,10			-0,3	0,07	III_{max} = 0,375
3	Масштабный коэффициент оси z				-0,2	0,04	
	0,3	0,00	I_{max} 0,345		-0,1	0,11	
	0,4	0,05	II_{max} = 0,334		0,0	0,17	
	0,5	0,09	III_{max} = 0,335		0,1	0,00	
					0,2	0,00	
					0,3	0,00	
					0,4	0,00	

геологический тип имеет разрывное нарушение (наклон осей x, y, z к горизонту); каков угол скалывания или коэффициент Пуассона среды. Для получения с помощью модели ответа на один из этих вопросов на остальные надо ответить без привлечения модели. Это явление возникает из-за множественности вариантов строения участка, удовлетворяющих заданному распределению

трещиноватости в скважинах. Задавая начальные приближения параметров, мы тем самым уже задаем значения первых трех искомых, это значение остается только отыскать. Выбрав другие параметры и (или) начальные приближения, мы отыщем несколько другое решение.

Кроме модели зоны пониженной вязкости, автор пытался оптимизировать и модель правой кулисы (рис.I, в). При этом получены проверочные коэффициенты, близкие по значению к коэффициентам первой модели, но при других оптимальных значениях параметров (масштабные коэффициенты по оси x, y и z соответственно равны 0,7; 0,5 и 0,22). Таким образом, наблюдаемая в керне трещиноватость может одинаково вероятно объясняться и первой, и второй моделями.

При таком моделировании волюнтаризм все же ограничен. В частности, когда при эксперименте пытались оптимизировать модель правого сдвига или левой кулисы, то коэффициенты начинали „расходиться" начиная с первого параметра, что четко указывает на невозможность подобной структуры при наблюдаемой в керне трещиноватости. Аналогичный результат получен при попытках оптимизировать модели с соотношением масштабных коэффициентов $x : y$ для первой модели и $z : y$ для второй модели меньше I.

Как было показано ранее [I4], для железорудных месторождений на основе модели с подобранными параметрами может быть создана система автоматического прогнозирования положения рудных тел. Очевидно, что при использовании схемы флюидопроводников внутри модели, которая задается интенсивностью растягивающих напряжений и вычисляется из модели, можно прогнозировать и содержания в рудах, и технологические свойства руд. Однако составление и оптимизация подобных моделей – довольно дорогая процедура, поэтому их экономично применять в случае глубоко залегающих объектов с высокой стоимостью рудного пересечения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Андрейкив А.Е. Разрушение квазихрупких тел с трещинами при сложном напряженном состоянии. Киев: Наукова думка. 1979. 140 с.

2. А.с. 1528908 (51), 4 Е 21 С39/00. Способ определения ориентировки трещиноватости / С.С.Шакин (СССР). 4385000/23-03; Опубл. 15.12.89. Бюл. 46.

Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979. С.7-25.

4. Лир Ю.В., Шакин С.С., Кистеров К.В. Особенности развития рудовмещающих трещинных структур // Геол. руд. месторожд. 1982. № I. С.25-30.

5. Лир Ю.В., Шакин С.С. Математическое моделирование напряжений на участке кулисообразных трещин // Изв. вузов. Геол. и разведка. 1988. № 9. С.33-37.

6. Лобацкая Р.М. Дискретная зональность внутренней структуры разрывных нарушений // Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геол. М.: Наука. 1985. С.268-275.

7. Любин Г.А., Мишин Н.И. Методы изучения трещиноватости с целью оценки горно-геологических условий отработки угольных пластов / Ленингр. горный ин-т. Л., 1988. 72 с.

8. Невский В.А. О внутреннем строении разломов // Геотектоника. 1967. 1. С. 83-87.

9. Разрывные нарушения угольных пластов М.С.Гарбер, В.Е.Григорьев, Ю.Н.Дупак и др. М.: Недра. 1979. 190 с.

10. Расцветаев Л.М. Некоторые общие модели дизъюнктивной тектонической деформации // Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геолог. М.: Наука, 1985. С. 118-127.

Погребиский Рац М.В., Чернышев С.Н. О зависимости густоты тектонических трещин от расстояния до разрывов ДАН СССР. 1971. Т. 201. 4. С. 927-931.

12. Рац М.В., Чернышев С.Н. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород. М.: Недра, 1970. 160 с.

13. Шакин С.С. Аналитическая модель строения зоны предразрушения разлома Математические и экспериментальные методы в дизъюнктивной тектонике. М.: Наука. 1986. С. 113-118.

14. Шакин С.С. Прогнозирование размещения оруденения на основе моделирования деформаций: Автореф. дис. геол.-минерал. наук / Ленингр. горный ин-т. Л., 1987. 22 с.

15. Яковлев Ю.Н. Геологическое строение и минеральный состав Куржункульского железорудного месторождения // Зап. ЛГИ. 1962. Т. 42, вып. 2. С. 38-65.