

НОВЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ХАОТИЧЕСКОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ ВБЛИЗИ РАЗЛОМНЫХ СМЕСТИТЕЛЕЙ

К.Ж. Семинский, Ю.П. Бурзунова

Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия

Представлены основы нового методического подхода к анализу происхождения внешне хаотических сетей трещин, нарушающих горные массивы вблизи разломов разного морфогенетического типа. Он заключается в сравнении интерпретируемых диаграмм приразломной трещиноватости с эталонными трафаретами, разработанными для условий разрывообразования в сдвиговых, взбросовых, надвиговых и сбросовых зонах. Трафареты воссоздают наложение в локальном объеме горной породы троек-систем трещин, закономерно возникающих в полях напряжений 2-го порядка при формировании внутренней структуры разломной зоны. Рассмотренные примеры анализа хаотической трещиноватости показали эффективность нового подхода, который позволил установить морфогенезис и особенности развития разломных зон, нарушающих скальные породы и слабосцементированные отложения.

Хаотическая трещиноватость, разломные зоны, разрывы, тройки-системы трещин, поля напряжений.

INTERPRETATION OF CHAOTIC JOINTING NEAR FAULT PLANES: A NEW APPROACH

K.Zh. Seminsky and Yu.P. Burzunova

We suggest a new approach to study apparently chaotic jointing near faults of different geometries. It implies matching jointing stereograms to standard patterns developed for strike-slip, reverse, thrust, and normal faulting. The standard patterns correspond to joint triplets that regularly initiate in small rock volumes under second-order stress fields during the formation of fault zones. The approach was tested for the cases of failure in bedrock and unconsolidated sediments and showed up as an efficient tool for investigating the origin, structure, and evolution of faults.

Chaotic jointing, fault zones, fractures, triplets of joint sets, stress field

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с существующими представлениями [Чернышев, 1983], хаотическая трещинная сеть образуется в локальном объеме горной породы под действием разновозрастных полей напряжений. Поскольку хаотичность, согласно данному определению, не является истинной, а отражает лишь внешнюю сторону трещинообразования, существует принципиальная возможность установить историю формирования такой сети. Объектом представленных в статье исследований была хаотическая трещиноватость, генетически связанная с разломами и, таким образом, представляющая кроме теоретического и известный практический интерес. Сложность ее интерпретации обусловлена трудностями, возникающими при определении происхождения отдельных систем трещин и установлении генетических взаимосвязей между ними. Исследования обычно проводятся тектонофизическими методами, принадлежащими к двум группам.

Первая группа объединяет способы анализа трещин с видимыми признаками смещений, дающие богатую информацию об условиях и характере разрушения горного массива по сравнительно небольшому числу наблюдений. Как следствие этого, методы восстановления осей палеонапряжений посредством анализа штрихов скольжения, а также способы определения характера подвижки вдоль поверхности разрыва по его морфологии представляются сейчас наиболее хорошо разработанными [Гущенко, 1979; Парфенов, 1984; Ramsay, Huber, 1987; Reches, 1987; Angelier, 1989; Gephart, 1990; Родыгин, 1991]. В то же время трещины с характерными признаками происхождения и развития встречаются далеко не во всех коренных выходах.

Для анализа повсеместно распространенной „немой“ трещиноватости используют методы **второй группы**, относящиеся к парагенетическим. В их основе лежат поиск и анализ совокупностей систем трещин, характеризующихся общностью происхождения. Для различных напряженно-деформированных состояний выделяют парагенезисы из двух (классических) и более систем трещин [Данилович, 1961; Гзовский, 1963; Reches, 1978; Расцветаев, 1987; Николаев, 1992; Twiss, Mooges, 1992]. Однако такие парагенезисы, как конусы, пирамиды и пояса, отчетливо выделяющиеся на диаграммах (в том числе и „шлейфами“ полюсов трещин), встречаются достаточно редко и поэтому могут использоваться для интерпретации приразломных хаотических сетей лишь в ограниченном круге природных ситуаций.

Классические пары сопряженных сколов распространены повсеместно, но их выявление из многочисленных приразломных систем трещин в подавляющем большинстве случаев представляет неоднозначную задачу. В стандартной ситуации, при использовании только элементов залегания трещин, для выделения сопряженных систем может применяться лишь критерий П.Н. Николаева [1992] — наличие у двух максимумов полюсов трещин противоположно направленных разбросов, отчетливо фиксирующихся на диаграммах трещиноватости. С другой стороны, применение этого критерия для выделения сопряженных сколов в хаотических сетях затруднено из-за большого количества систем и неоднозначности выбора пар для сопоставления разбросов.

Конкретизация ситуации с сопряженными сколами оказалась возможной для приразломной трещиноватости на основе наших предыдущих исследований [Разломообразование..., 1991, 1992, 1994; Семинский, 1994, 2003; Семинский, Адамович, 2004], результаты которых позволили установить существование вблизи разломов, кроме пары сколовых направлений, третьей генетически связанной с ними системы трещин. Пространственные соотношения между разрывами этого парагенезиса и сместителем, а также известные закономерности структурообразования в разломных зонах [Гзовский, 1963; Лукьянов, 1965; Wilcox et al., 1973; Стоянов, 1977; Hancock, 1985; Woodcock, Fischer, 1986; Расцветаев, 1987; Mandl, 1988; Sylvester, 1988; Разломообразование..., 1991, 1992, 1994; Копп, 1997; Sibson, 1998; Семинский, 2003] стали основой рассматриваемого в данной статье подхода к анализу приразломной хаотической трещиноватости. В соответствии с ним такая сеть может представлять совокупность тройственных парагенезисов трещин, образовавшихся в полях напряжений 2-го порядка, которые имели место в пределах какого-либо участка разломной зоны в процессе формирования сместителя.

Цель статьи — представить новый подход к анализу наиболее сложной трещиноватости разломных зон, базирующийся на закономерностях развития их внутренней структуры. При этом было необходимо: 1) рассмотреть основные принципы составления эталонных сетей трещин и представить их в виде круговых диаграмм-трафаретов для структурных ситуаций, соответствующих условиям трещинообразования вблизи разломов разного типа (правый и левый сдвиги, пологий и крутой сбросы, взброс, надвиг); 2) проиллюстрировать возможности использования эталонных сетей для интерпретации хаотической трещиноватости в скальных и слабосцементированных породах.

ОСНОВЫ МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Теоретической базой нового подхода к анализу хаотической трещиноватости послужили закономерности формирования внутренней структуры разломных зон, подробно рассмотренные в наших специальных публикациях [Разломообразование..., 1991, 1992, 1994; Семинский, 1994; Семинский, Гладков, 1997; Семинский, 1997, 2003, 2005; Гладков, Семинский, 1999; Семинский, Адамович, 2004], а также в цитируемых ниже работах предшественников.

Как известно [Данилович, 1961; Гзовский, 1963; Лукьянов, 1965; Wilcox et al., 1973; Стоянов, 1977; Чернышев, 1983; Mandl, 1988; Sylvester, 1988; Разломообразование..., 1991, 1992, 1994; Twiss, Moores, 1992; Копп, 1997; Семинский, 2003], внутренняя структура разломной зоны определяется наличием нескольких парагенезисов разрывов (2-й порядок). Каждый из них образовался в одном поле напряжений, существовавшем на определенной стадии развития главного сместителя (1-й порядок). Наличие и типы этих полей 2-го порядка находятся в тесной взаимосвязи с видом деформации, реализующимся в разломной зоне. Таковым, в соответствии с механикой разрушения, является скалывание, которое для наиболее распространенных в земной коре условий разрывообразования классифицируется как изначально сложное, в связи с наличием поперечного к зоне (бокового) сжатия [Sibson, 1998]. Этот небольшой транспрессионный эффект увеличивает количество членов в характерном для разломной зоны парагенезисе эшелонированных разрывов 2-го порядка (рис. 1, А).

Так, кроме разрывов растяжения e -типа и широко известных сколов R' -, R -, P - и Y -типов [Wilcox et al., 1973; Стоянов, 1977; Hancock, 1985; Mandl, 1988; Sylvester, 1988; Twiss, Moores, 1992] парагенезис включает сопряженные пары сколов n' - и n -типов, а также t' - и t -типов [Wilcox et al., 1973; Hancock, 1985; Sylvester, 1988; Семинский, 2003] (см. рис. 1, Б). Их образование связано с возникающим при скалывании со сжатием состоянием, близким к осесимметричному [McCoss, 1986], которое характеризуется примерным равенством абсолютных значений двух главных нормальных напряжений (в данном случае σ_2 и σ_1). В этих условиях после возникновения сколов 1-й серии (R' и R , см. рис. 1, В-1) может происходить переиндексация осей главных нормальных напряжений [Семинский, Адамович, 2004], т. е. изменение их величин при сохранении направлений действия [Гзовский, 1963; Расцветаев, 1987; Mandl, 1988]. В результате образуются сколы 2-й серии (n' и n , см. рис. 1, В-2) или сколы 3-й серии (t' и t , см. рис. 1, В-3), соответствующие всем возможным вариантам индексации осей напряжений. Исключение составляет лишь случай переиндексации осей σ_1 и σ_3 , реализации которого (и, следовательно, изменению типа подвижек в зоне с левосдвиговых на правосдвиговые) препятствует направление действия внешних сил.

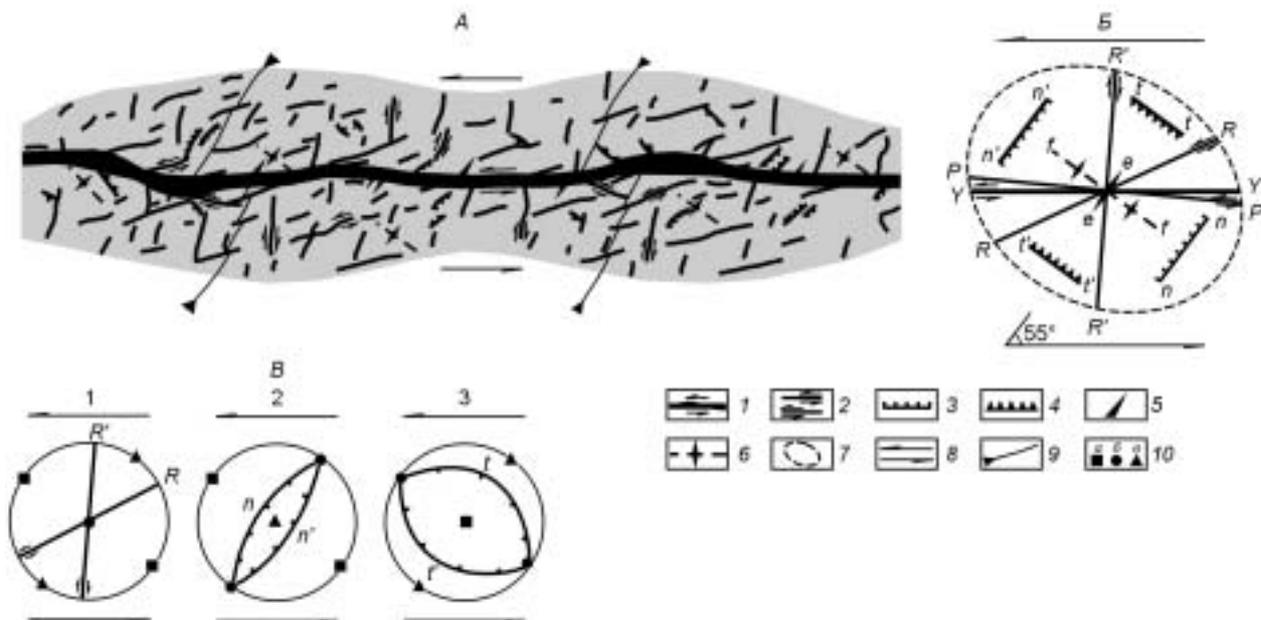


Рис. 1. Главные элементы внутренней структуры разломных зон земной коры (на примере левого сдвига).

A — принципиальная схема строения разломной зоны.

B — сводная диаграмма разновидностей разрывов и складок, образующихся в зоне действия скальвующих напряжений с небольшим ($55^\circ - 45^\circ = 10^\circ$) транспрессионным эффектом.

B — положение на круговых диаграммах систем сопряженных сколов 1-й (R и R'), 2-й (n и n') и 3-й (t и t') серий, которые могут развиваться в левосдвиговой разломной зоне за счет переиндексации осей главных нормальных напряжений в ходе разрывообразования.

1 — сдвиговый магистральный сместитель (Y), выполненный тектонитами; 2 — сопряженные (R и R') и одиночные (P) сдвиги; 3 — сопряженные сбросы (n и n'); 4 — сопряженные взбросы или надвиги (t и t'); 5 — разрывы растяжения (e); 6 — оси складок (f); 7 — эллипс, в который преобразовалась окружность после деформации; 8 — направление перемещения крыльев разломной зоны; 9 — реперы, смещенные по разрывам; 10 — выходы на верхнюю полусферу осей главных нормальных напряжений σ_1 (a), σ_2 (b) и σ_3 (ϕ), где σ_1 — ось растяжения, σ_2 — промежуточная ось и σ_3 — ось сжатия.

Очевидно, что каждой из возникающих систем разрывов 2-го порядка соответствует свой парагенезис на уровне трещиноватости. Развитие этих парагенезисов в одном и том же горном массиве, принадлежавшем в разное время к зонам влияния трех и более сместителей 2-го порядка, формирует в нем хаотическую сеть. Значит для интерпретации последней, кроме представленной выше ориентировки вторичных по отношению к главному сместителю разрывов, необходимо знать парагенезис трещин, составляющий структуру небольшого разлома земной коры.

Целенаправленные исследования трещиноватости вблизи частных сместителей разломных зон сдвига (Главный Саянский сдвиг в Восточном Саяне, сдвиг по р. Красная в Северном Вьетнаме, Аксу-Мургабский сдвиг на Памире и др.), сжатия (Кандатский и Борусский взбросы в Западном Саяне, Гиссаро-Кокшаальский надвиг в Южном Тянь-Шане, Вахшский и Рушано-Пшартский надвиги на Памире и др.) и растяжения (Обручевский сброс в Прибайкалье, сброс Ло в Северном Вьетнаме и др.) показали [Разломообразование..., 1991, 1992, 1994; Семинский, 1994, 2003, 2005; Семинский, Адамович, 2004], что процесс переиндексации на уровне трещин характеризуется определенной спецификой. В общем случае небольшие объемы земной коры, находящиеся в условиях трехосного сжатия, разрушаются под действием тектонических сил с образованием вначале двух сопряженных систем трещин. Резкое (при существенно упругом поведении горного массива) падение напряжений после их возникновения вызывает при новой индексации осей напряжений формирование в локальном объеме не двух сколовых, а одной отрывной системы трещин, которая (см. круговые диаграммы на рис. 2) перпендикулярна обоим образовавшимся ранее направлениям сколов. Процесс продолжается в виде циклов, когда накапливающиеся в разломной зоне напряжения частично снимаются за счет подвижек по сети уже возникших трещин. При этом характер перемещений по разрывам третьей системы будет не раздвиговым, а сколовым, так как их ориентация совпадает с направлением транспортировки вещества при подвижках по нарушениям двух первых систем.

Двойственная (скол—отрыв) природа третьей системы трещин, которая в некоторых обнажениях была подтверждена наличием (иногда у одних и тех же разрывов) вещественного заполнителя и штрихов

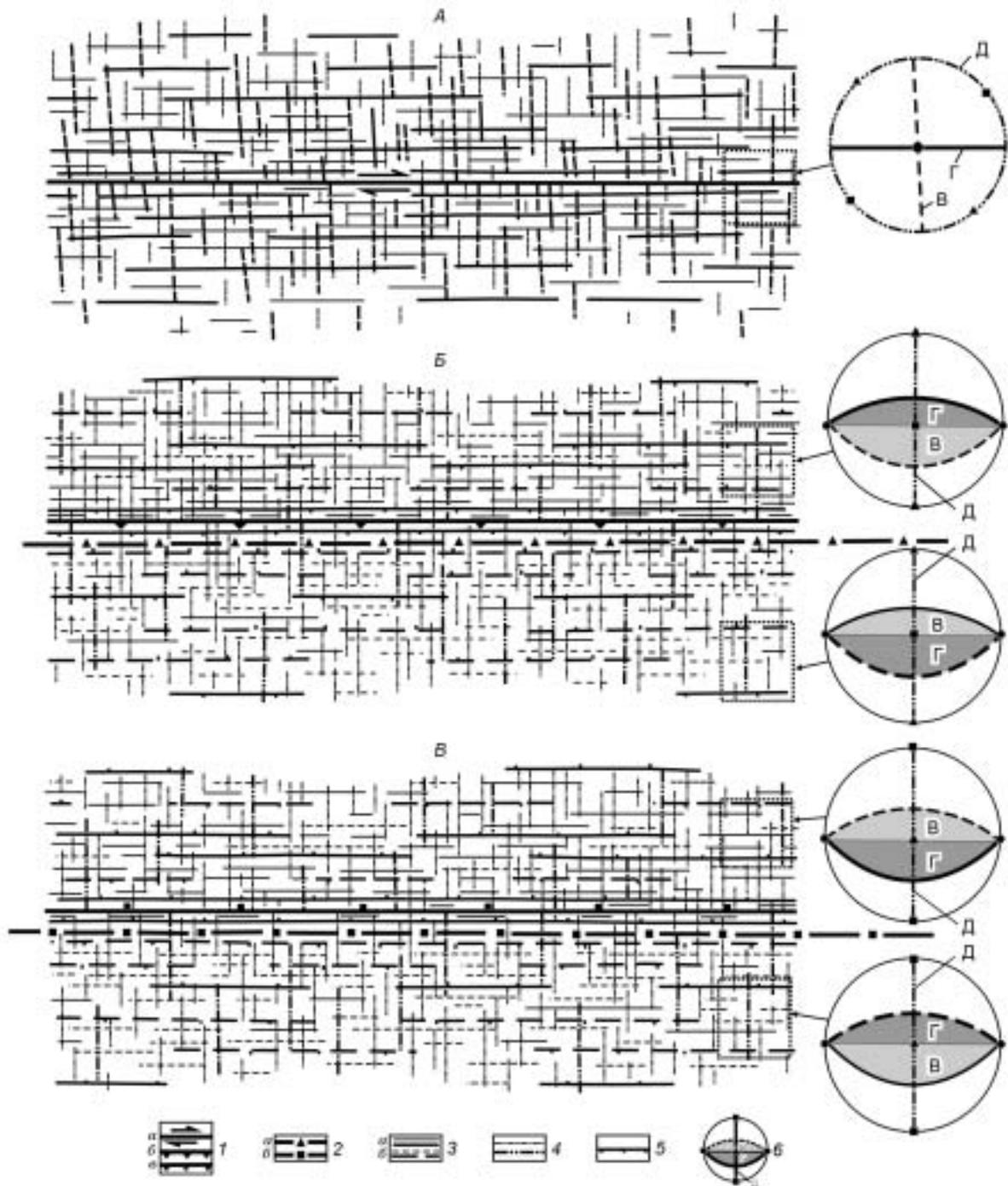
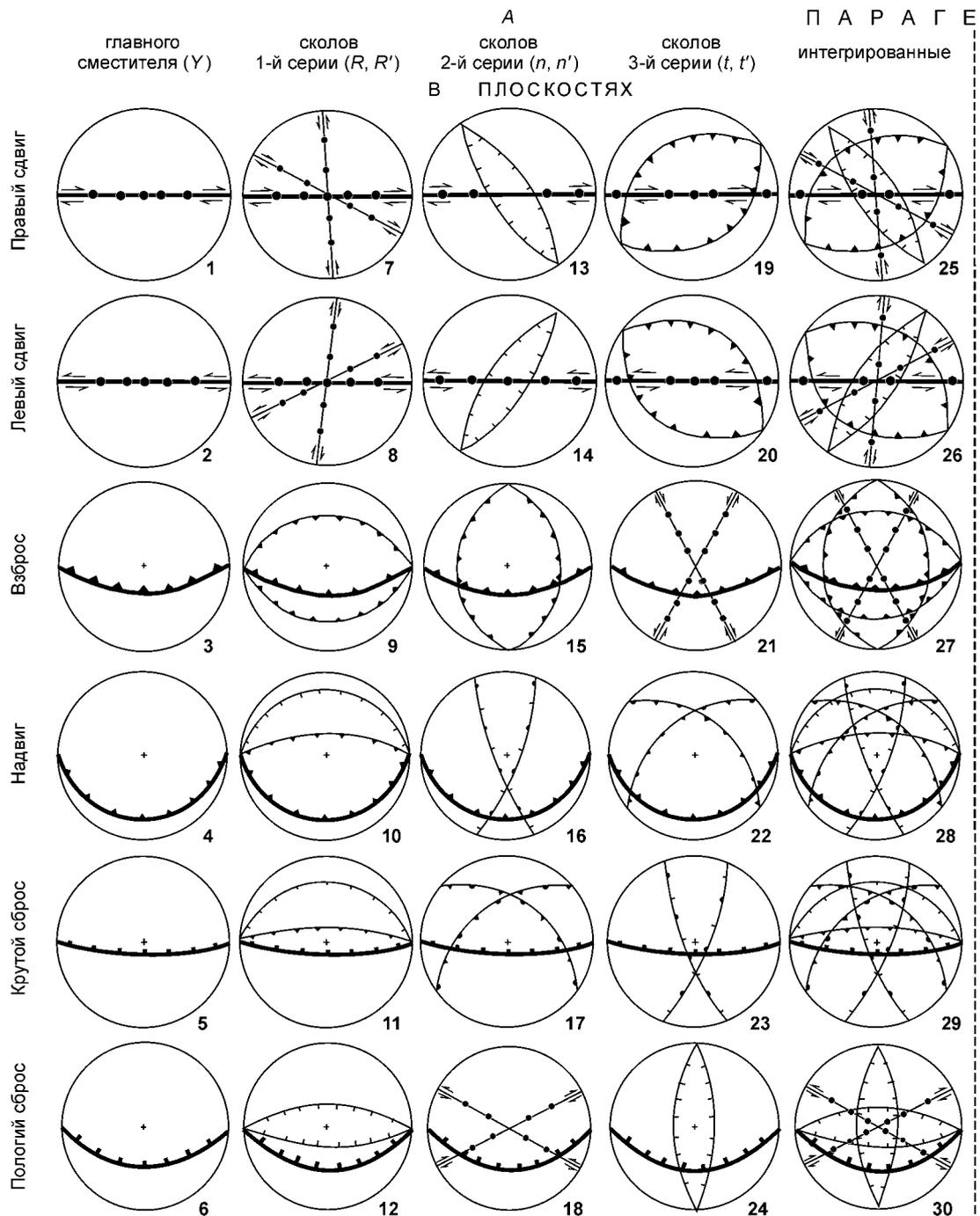


Рис. 2. Принципиальные схемы (план) внутренней структуры правосдвиговой (А), взбросовой (Б) и сбросовой (В) разломных зон, основу которой составляет парагенезис из трех примерно перпендикулярных друг другу систем трещин.

1 — магистральный сместитель сдвиговой (а), взбросовой (б) или сбросовой (в) разломных зон; 2 — ось, разделяющая подзоны с противоположным падением главной системы трещин тройственного парагенезиса у взбросовой (а) и сбросовой (б) разломных зон; 3 — мелкая и более крупная трещина, принадлежащая к одной (а) или ко второй (б) из двух взаимно-перпендикулярных систем, являющихся в зависимости от интенсивности проявления на площадке наблюдения главной или второстепенной в тройственном парагенезисе; 4 — мелкая и более крупная трещина дополнительной системы тройственного парагенезиса; 5 — направление падения у крупных трещин; 6 — круговая диаграмма, на которой для произвольно выбранных участков разломной зоны (оконалированы точками) отражено поле напряжений (квадрат — σ_1 ; кружок — σ_2 ; треугольник — σ_3), а также пространственное положение образовавшегося в нем парагенезиса из трех примерно перпендикулярных систем трещин (Г — главная, В — второстепенная, Д — дополнительная).



скольжения, отражает специфику формирования парагенезиса. Особенность его внешнего проявления состоит в примерной перпендикулярности трех составляющих разрывных направлений, которая была установлена при массовых целенаправленных измерениях даже для классической пары сопряженных трещин: угол скалывания в момент их образования составляет $\approx 35^\circ$, но в ходе описанной выше последующей деформации „пассивно“ увеличивается до 45° и более [Семинский, 1997]. В итоге среднее значение двугранного угла при оси сжатия для сопряженных сколов, имеющих место у разлома, составляет примерно 80° [Семинский, 2003].

Таким образом, наиболее часто встречающийся случай переиндексации осей напряжений дает три системы примерно ортогональных трещин, которые составляют основу разрывной сети в зонах мелких тектонических нарушений и, согласно [Разломообразование..., 1991, 1992, 1994; Семинский, 2003], отличаются по ориентировке для разломов разного типа (см. рис. 2). Вблизи сместителей с перемещением крыльев по падению (сбросы, взбросы, надвиги) главная (наибольшей густоты) и второстепенная системы

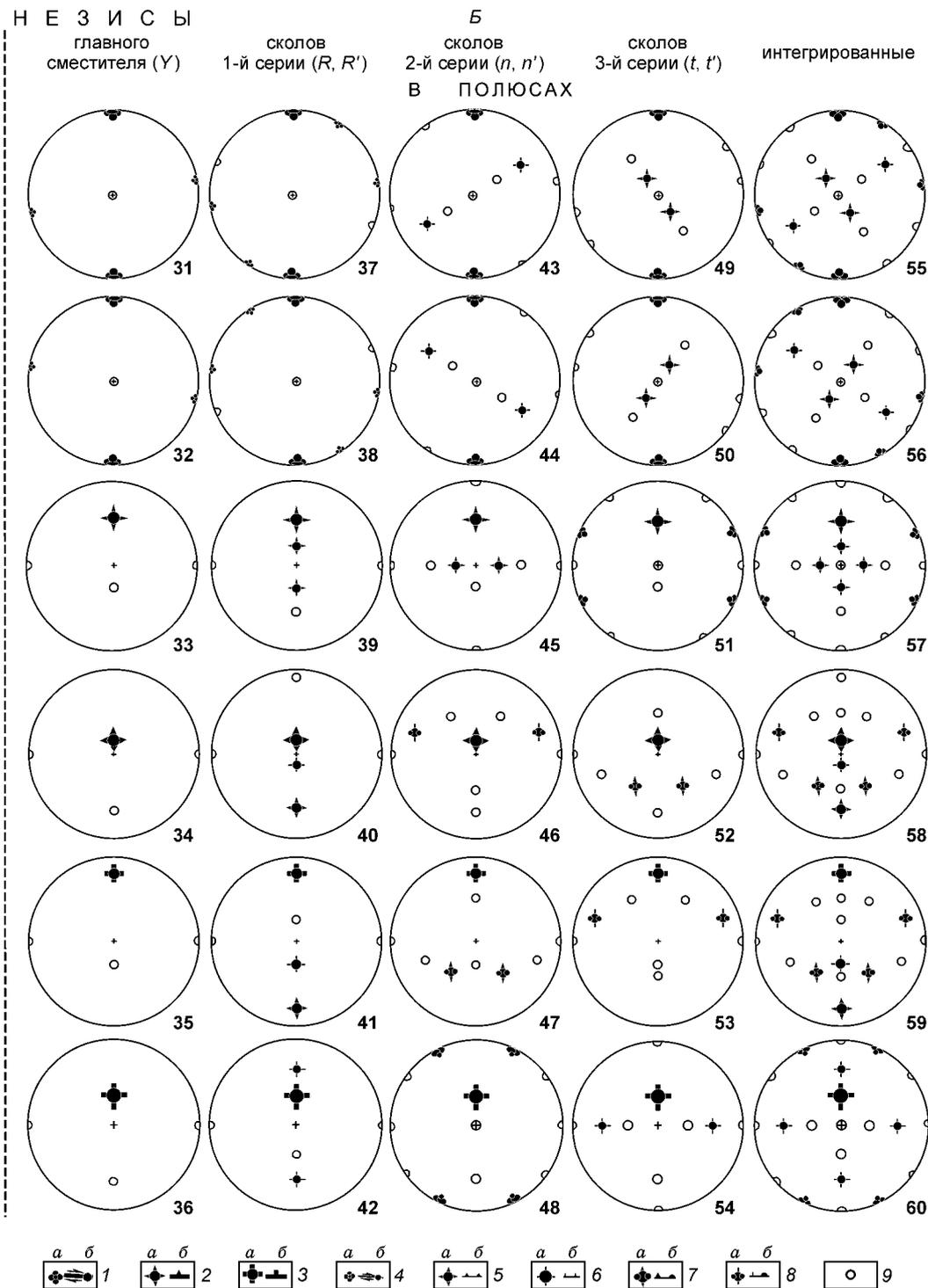


Рис. 3. Эталонные парагенезисы разрывов 2-го порядка (А) и соответствующих им троек-систем трещин (Б), имеющие место в зонах взброса, надвига, крутого и пологого сбросов, левого и правого сдвигов.

Парагенезисы представлены на круговых диаграммах (верхняя полусфера, сетка Вульфа) в плоскостях и полюсах для наиболее распространенного в природе случая сложного скальвания (угол между сместителем разлома и осью сжатия — 55° ; угол скальвания — 30°), что позволяет их использовать для интерпретации массовых замеров хаотических трещинных сетей. Полюсы максимумов, переходящих на противоположную сторону круга, здесь и на следующих рисунках показаны половинками значков.

Полюсы (а) и плоскости (б) главных сместителей 1-го порядка: 1 — сдвигового, 2 — надвигового (взбросового), 3 — сбросового типов; полюсы (а) и плоскости (б): 4 — сдвигов, 5 — надвигов (взбросов), 6 — сбросов, 7 — взбрососдвигов, 8 — сбрососдвигов 2-го порядка; 9 — положение полюса второстепенной и дополнительной систем тройственного парагенезиса трещин.

трещин параллельны в плане разлому, но падают в противоположные стороны. У сдвигов это две системы субвертикальных разрывов, одна из которых также совпадает с простираем разломной зоны. Третья — дополнительная — система трещин у сдвигов субгоризонтальна, а у сбросов и взбросов (надвигов) субвертикальна при поперечном в плане положении к двум первым системам. Таким образом, зоны сдвигов, с одной стороны, а зоны надвигов (взбросов) и сбросов — с другой, достаточно четко отличаемы друг от друга по общей ориентировке в пространстве тройственного парагенезиса, составляющего их внутреннюю структуру. Идентификация разломов, формирующихся в условиях сжатия (надвиги, взбросы) и растяжения (сбросы), возможна по зональности внутреннего строения (см. рис. 2). Зоны их влияния разделены в поперечном направлении на две части, характеризующиеся противоположными азимутами падения главной системы трещин тройственного парагенезиса: у разломов, связанных со сжатием, трещины главной системы в разных подзонах „падают“ от периферии к центру, а у сбросов — от центра к периферии.

Представленные выше закономерности легли в основу метода специального картирования [Семинский, 1994; Семинский, Гладков, 1997], который дает возможность на основе площадного распределения разнотипных троек-систем трещин определить местоположение и границы разломных зон, условия их образования (сжатие, растяжение или сдвиг) и некоторые особенности внутреннего строения. Его применение в регионах, отличающихся по активности и динамическим обстановкам деформации [Разломообразование..., 1991, 1992, 1994; Семинский, 1994, 2003, 2005], показало эффективность использования тройственных парагенезисов в структурных исследованиях, а также позволило получить дополнительную информацию о приразломных сетях трещин.

Так, непосредственно связанный со сместителем тройственный парагенезис трещин трассирует его на всем протяжении, имеет одинаковую ориентировку в разных крыльях и характеризуется полимодальностью распределения плотности составляющих систем в продольном и поперечном направлениях, т.е. он предшествовал появлению главного сместителя и, согласно [Чернышев, 1983], относится к опережающим. При этом главная и второстепенная системы парагенезиса, судя по морфологии и угловым взаимоотношениям с разломом [Hancock, 1985; Twiss, Moores, 1992; Семинский, 2003], являются сопряженными сколами Риделя (R' и R). Установленное при картировании ограниченное распространение опережающих трещин (обусловленных торможением скольжения по уже образовавшемуся сместителю [Чернышев, 1983]) может быть связано с тем, что их функции по снижению напряжений от трения обычно выполняют активизированные опережающие разрывы.

Кроме того, опыт спецкартирования показал, что вблизи перечисленных выше крупных разломных сместителей ширина полосы распространения связанного с каждым из них тройственного парагенезиса составляет несколько километров [Разломообразование..., 1991, 1992, 1994; Семинский, 2003], но трещинные сети, представленные только одним этим главным парагенезисом, встречаются в такой зоне достаточно редко. Трещиноватость большинства коренных выходов имеет знакомый исследователю хаотический вид. Исходя из представленных выше закономерностей приразломного трещинообразования, логично предположить, что она сформировалась в результате наложения трех и более троек-систем трещин, так как представляет участок горного массива, который в разное время принадлежал к зонам влияния различных нарушений 2-го порядка. Поскольку ориентировка систем таких разрывов, а также положение соответствующих каждому из них тройственных парагенезисов трещин известно, открывается возможность разработать идеализированные образцы разрывных сетей, которые могут быть использованы для интерпретации хаотической трещиноватости в разломных зонах земной коры.

Для выполнения этой задачи были составлены эталонные круговые диаграммы (трафареты), на которых в плоскостях и полюсах изображены трещинные сети, имеющие место в зонах взброса с углом падения 55° , надвига с углом падения 15° , сброса с углом падения 35° , сброса с углом падения 75° , а также правого и левого вертикальных сдвигов (рис. 3). Для построений использовались аналогичные принципы, так как строение сбросовых, взбросовых (надвиговых) и сдвиговых зон с позиций механики подобно. Кроме того, применялись известные приемы изображения плоскостей разрывов на круговых диаграммах, а также параметры, наиболее характерные [Wilcox et al., 1973; Hancock, 1985; Sylvester, 1988; Twiss, Moores, 1992; Семинский, 2003] для зон действия скальвающих напряжений в земной коре (угол между сместителем разлома и осью сжатия — 55° ; угол скальвания — 30°).

В левой части рис. 3 в плоскостях показано положение магистрального сместителя и разрывов 2-го порядка, а в правой — представлены полюсы соответствующих им троек-систем трещин. Каждый из трех центральных столбцов в обеих частях рисунка содержит диаграммы, иллюстрирующие положение пары сопряженных сколов 1-й (R, R'), 2-й (n, n') и 3-й (t, t') серий, причем лишь первые образуются в том же по типу поле напряжений, что и показанный в первом столбце магистральный сместитель. Последняя колонка включает интегрированные данные по всем разрывам, формирующимся в разломной зоне.

Как видно из рис. 3, B , наложение разновозрастных полей напряжений 2-го порядка в ряде случаев приводит к появлению таких известных парагенезисов, как пояса вращения, о чем мы писали ранее

[Гладков, Семинский, 1999]. Они отчетливо выражены на диаграммах второго столбца (№ 37-42). Однако, несмотря на присутствие поясов и в ситуациях, соответствующих номерам № 43-54, в реальной обстановке для них, как и для интегрированных диаграмм последнего столбца (№ 55-60), будут характерны внешне хаотические сети. Причиной является наложение большого количества трещинных систем (по 8), которые в реальной ситуации отклоняются от представленного на рисунке идеального положения. Это приводит к отсутствию „шлейфа“ полюсов трещин, вытянутого вдоль дуги большого круга, и, таким образом, затрудняет диагностику пояса. Поэтому в дальнейшем анализе рассматриваются природные ситуации, отвечающие как однозначно хаотическим сетям из последнего столбца, так и тем, которые формируются за счет сколов 2- и 3-й серий.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ХАОТИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ТРЕЩИН ВБЛИЗИ РАЗЛОМОВ РАЗНОГО ТИПА

Новый методический подход к анализу хаотических сетей трещин заключается в сравнении представленных на рис. 3 эталонных диаграмм с результатами массовых замеров „немых“ трещин в коренных выходах, принадлежащих к разломным зонам. Вначале для проверки его эффективности рассматриваются ситуации, в которых связь трещиноватости с подвижками по разлому очевидна. Далее для иллюстрации возможностей нового подхода интерпретируется более сложный случай проявления трещинных сетей в перекрывающих разлом рыхлых четвертичных отложениях.

В первом случае исследовались коренные выходы, представляющие структуру крупных активных разломных зон разного морфогенетического типа: Гиссаро-Кокшаальского надвига в Южном Тянь-Шане, сброса Ло и сдвига по р. Красная в Северном Вьетнаме. Важным свойством этих зон в свете решения поставленных задач является то, что их трещинная структура, сформированная в одном поле напряжений 1-го порядка, не была существенно изменена в течение последующих подвижек по сместителям. Для разлома по р. Красная, характеризующегося сменой в конце неогена знака перемещений с левого на правый, это было доказано результатами специальных исследований [Семинский, 2003], тогда как подвижки по двум первым разломам характеризуются однонаправленностью вплоть до настоящего времени. Кроме того, особенностью всех выбранных для непосредственного исследования коренных выходов являлось наличие частных сместителей перечисленных крупных разломных зон, морфогенетический тип которых был установлен в обнажении традиционными структурно-геологическими приемами.

Трещинные сети в обнажениях, несмотря на присутствие сместителей, по внешним признакам относятся к хаотическим. То же следует и из круговых диаграмм трещиноватости (рис. 4, № 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20, 23), на каждой из которых выделяется более десятка максимумов, не образующих каких-либо известных структурных рисунков. Вместе с тем анализ диаграмм свидетельствует о сходстве с эталонными сочетаниями систем трещин, представленными на рис. 3 и приведенными для удобства сравнения на рис. 4 (№ 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22). При этом, если учесть не отмеченные на диаграммах трещиноватости положения полюсов второстепенной и дополнительной систем у тройственных парагенезисов, то происхождение практически всех главных максимумов оказывается установленным.

Рассматриваемые хаотические сети трещин в сдвиговой и надвиговой зонах образовались при наложении тройственных парагенезисов, соответствующих главному сместителю и сколам 2-й серии (см. рис. 4, № 1-3 и 4-6), главному сместителю и сколам 3-й серии (№ 10-12 и 13-15), а также всей совокупности разрывов 2-го порядка (№ 16-18 и 19-21). Диаграммы из зоны сброса Ло интерпретируются как результат существования в локальных объемах горных пород полей напряжений, связанных с развитием полного парагенезиса разрывов 2-го порядка (№ 22-24), а также главного сместителя и сколов 2-й серии (№ 7-9).

Следует отметить, что представленные на рисунках и детально изученные в обнажениях трещинные сети не являются чем-то исключительным для рассматриваемых разломных зон. При анализе трещиноватости в смежных, не содержащих сместителей точках наблюдения, была получена серия диаграмм (всего — 37), положение максимумов на которых лишь в деталях отличается от эталонного (объединение близко расположенных максимумов; искажение углов между системами в связи с влиянием, например, слоистости и т. п.). При этом их образование в соответствующих динамических обстановках было подтверждено серией косвенных признаков (в том числе разбросами полюсов трещин в системах, по П.Н. Николаеву [1992]).

Наличие в непосредственной близости от разнотипных сместителей трещинных сетей, соответствующих теоретическим схемам, а также подтвержденная разными признаками сопряженность главной и второстепенной систем в составляющих их тройственных парагенезисах, свидетельствуют о неслучайности выявленных сочетаний. Происхождение сложных трещинных сетей вблизи разломных сместителей практически полностью определяется динамикой их развития. При этом воздействие на субстрат оказывается настолько существенным, что обычно имеющиеся в нем более древние структурные неоднородности (например, первичная трещиноватость) либо используются для реализации действующих напряжений, либо переходят в скрытое состояние за счет спекания или адгезии.

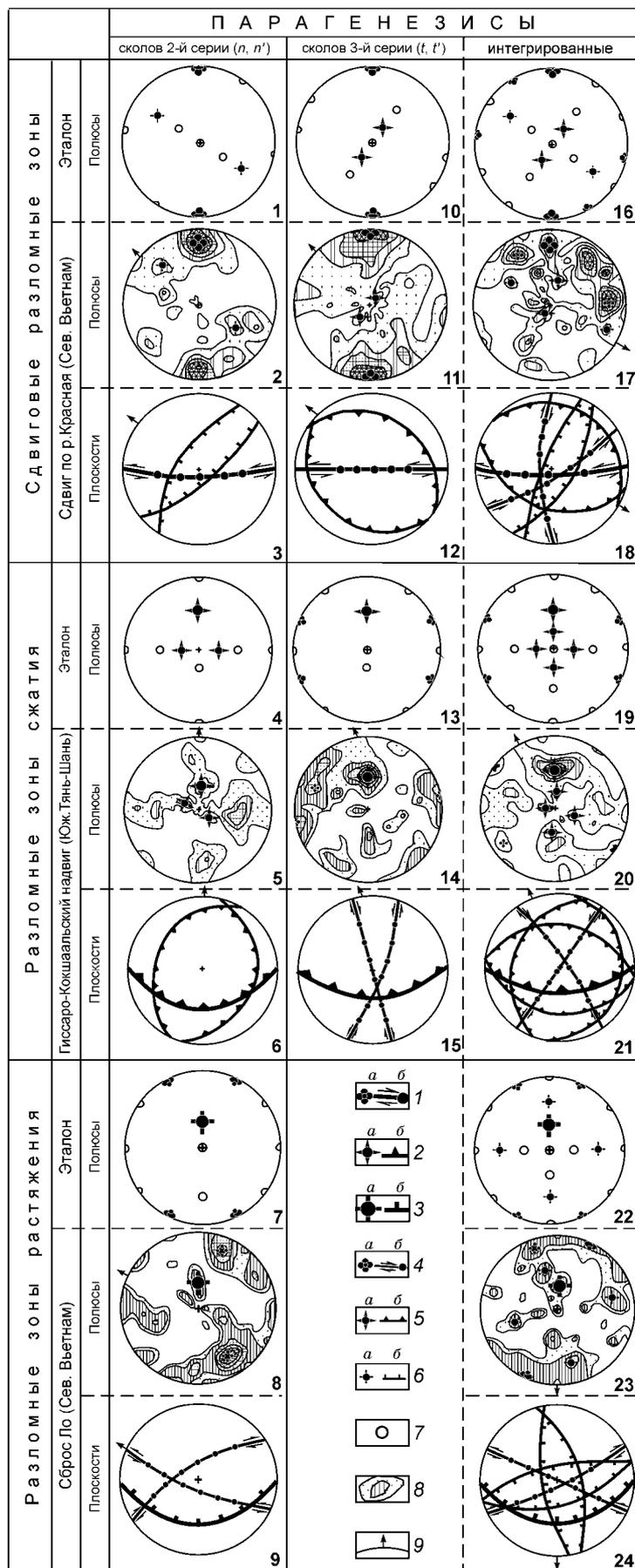


Рис. 4. Интерпретация диаграмм трещиноватости хаотического типа в скальных породах на основе эталонных парагенезисов, представляющих сочетания троек-систем трещин, которые формируются вблизи разрывов 2-го порядка, составляющих внутреннюю структуру для разломных зон разного морфогенетического типа.

Полосы (а) и плоскости (б) главных сместителей 1-го порядка: 1 — сдвигового, 2 — взбросового, 3 — сбросового типов; полюсы (а) и плоскости (б): 4 — сдвигов, 5 — надвигов, 6 — сбросов 2-го порядка; 7 — положение полюса второстепенной и дополнительной систем тройственного парагенезиса трещин; 8 — изолинии плотности полюсов трещин; 9 — направление на север.

В соответствии с вышеизложенным представленный методический подход может с успехом использоваться для интерпретации хаотических сетей трещин в крыльях разломных сместителей, так как они зачастую образуются при наложении друг на друга различных полей напряжений 2-го порядка. Предварительный анализ проявления сколов 1-, 2- и 3-й серий в зонах влияния рассмотренных выше и других разломов свидетельствует, что в равной степени встречаются ситуации, когда, кроме главного сместителя, имеет место лишь одно из сопряженных разрывных направлений в первой паре (обычно R-сколы) или сочетание сколов 1-й серии со сколами 2-й (или 3-й) серии. Что касается наиболее сложных сетей (см. рис. 3, № 55-60), то они встречаются значительно реже.

Представленный в статье новый подход к интерпретации хаотической трещиноватости особенно актуален для выявления специфики деформаций слабосцементированных осадков четвертичного возраста, так как именно она наиболее важна в практическом отношении для прогноза стабильности того или иного участка земной коры. Парагенетический анализ рассматриваемого вида в данном случае может быть наиболее эффективным для установления особенностей тектонического развития региона, так как рыхлые отложения: 1) характеризуются присутствием трещиноватости тектонического происхождения [Гладков, Лунина, 2004; Дзюба, 2004]; 2) еще реже, чем скальные породы, содержат такие структурные формы, которые позволяют восстановить динамическую обстановку их формирования достаточно однозначно.

Новый подход к исследованию хаотической трещиноватости рыхлых осадков был реализован нами для верхнеплейстоцен-голоценовых отложений Иркутского амфитеатра, которые представлены серыми суглинками, глинами и галечниками, горизонтально залегающими на юрских песчаниках и углях. Как показали наши предыдущие исследования [Семинский и др., 2001], эти отложения достаточно интенсивно нарушены трещинами в зоне Ангарского разлома, проходящего от истока р. Ангара в глубь Сибирской платформы и характеризующегося в связи с рифтогенезом вполне определенной активностью на современном этапе развития. Отчетливо проявляясь при зачистке обнажений, трещины зачастую имеют явно выраженный сколовый облик. В некоторых местах установлены смещения маркеров на первые сантиметры. Массовые замеры сколовых трещин в подобных обнажениях свидетельствуют о наличии хаотических сетей, образованных как субвертикальными и субгоризонтальными, так и наклонными системами. Целенаправленное исследование сближенных коренных выходов показало, что они не связаны с инженерно-геологическими процессами, проявления которых характеризуются существенной пространственной изменчивостью и обычно диагностируются достаточно определенно. Еще одним признаком эндогенного происхождения трещин сколового облика, является подобие их сетей в контактирующих породах MZ и KZ, которое для ряда коренных выходов было установлено не только визуально, но и с применением статистических методов сравнения результатов массовых замеров [Семинский и др., 2001].

Реализация представленного в статье подхода для интерпретации хаотической сколовой трещиноватости в рыхлых отложениях окрестностей Иркутска подтвердила ее тектоническое происхождение, обусловленное перемещениями по круто наклоненным разломам в мезозойском фундаменте. Этот вывод был сделан на основе обработки диаграмм трещиноватости, которая проводилась единообразно для нескольких точек наблюдения и иллюстрируется ниже на примере одной из них.

Коренной выход представлен серыми плотными суглинками, обнажающимися в левом борту небольшого распада, „выходящего“ в долину Ангары. Трещинная сеть по сравнению с многими из обследованных нами четвертичных пород здесь практически полностью состоит из сколов, массовый замер которых и послужил фактическим материалом для анализа (рис. 5, А). Разрывная сеть представлена трещинами без смещений и других характерных признаков, обеспечивающих возможность проведения структурного анализа традиционным способом. Вместе с тем ее сколовый облик свидетельствует о происхождении под воздействием направленной внешней нагрузки и, следовательно, хаотичность может быть кажущейся, что и послужило поводом для ее исследования в рамках нового методического подхода.

Рис. 5. Пример интерпретации происхождения хаотической трещинной сети в четвертичных суглинках на основе сопоставления с эталонным парагенезисом разрывов 2-го порядка, образующимся в правосдвиговой разломной зоне.

А — круговая диаграмма трещиноватости (верхняя полусфера; 100 замеров; уровни изолиний 0.5—1.5—...—7.5 %) с пронумерованными максимумами и определенными для некоторых из них разбросами, по П.Н. Николаеву [1992] (стрелки).

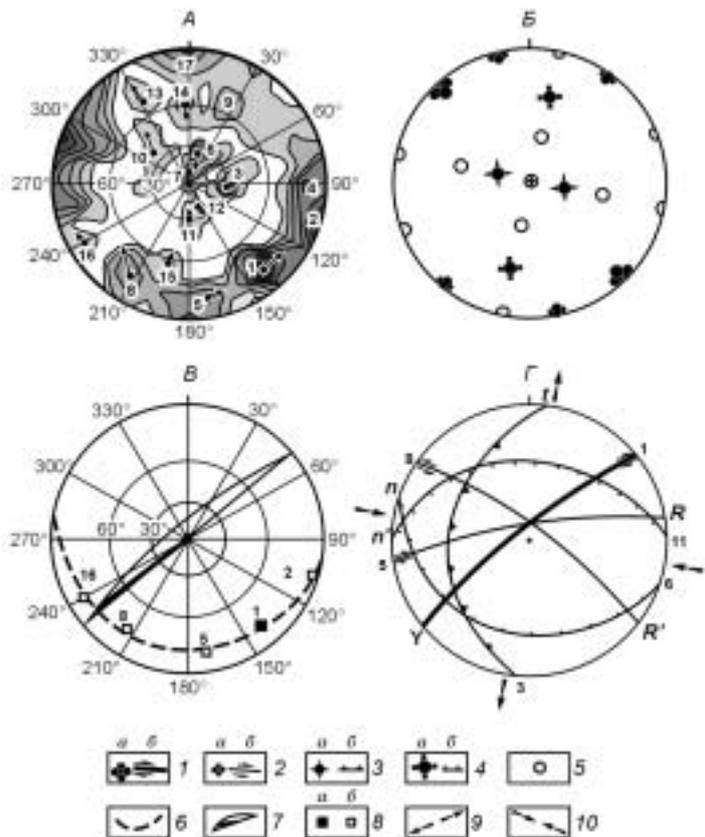
Б — круговая диаграмма, на которой в полюсах показано эталонное сочетание троек-систем трещин, соответствующих парагенезису разрывных нарушений 2-го порядка, который образуется в правосдвиговой разломной зоне при наиболее распространенных в природе условиях деформации.

В — реконструкция линии скольжения по магистральному сместителю разломной зоны на основе метода поясов.

Г — набор разрывов 2-го порядка, выявленный путем парагенетического анализа представленной на части А хаотической трещинной сети и отражающий внутреннее строение изучаемой разломной зоны.

Номера плоскостей и максимумов полюсов трещин на рис. В и Г соответствуют индексации аналогичных максимумов полюсов трещин на части А.

Полюсы (а) и плоскости (б): 1 — главного сдвигового сместителя 1-го порядка, 2 — сдвигов, 3 — надвигов, 4 — сбросов 2-го порядка; 5 — положение полюса второстепенной и дополнительной систем тройственного парагенезиса трещин; 6, 7 — положение пояса (б), плоскости магистрального сместителя и линии скольжения (7); 8 — разломный (а) и другие (б) максимумы полюсов трещин, составляющих пояс; 9, 10 — ориентировки субгоризонтальных осей растяжения (9) и сжатия (10), относящихся к полю напряжений 1-го порядка.



Использовались эталонные трафареты, представленные в последнем столбце на рис. 3 (№ 55-60) и отражающие совокупное положение систем трещин, входящих в тройки, каждая из которых соответствует одной из разновидностей разрывов 2-го порядка, составляющих парагенезисы правого сдвига, левого сдвига, взброса, надвига, пологого или крутого сбросов (№ 25-30). В нашем случае выбор трафарета, соответствующего взаимному расположению максимумов на анализируемой диаграмме, упрощался в связи со сдвиговым типом распределения полюсов трещин, подавляющее большинство из которых располагается по периферии круга. Удовлетворительное совмещение максимумов на трафарете и диаграмме с учетом неизбежных (ввиду различия идеальных и реальных условий разрывообразования) отклонений в их положении наблюдается лишь для случая, когда трещинная сеть формируется в зоне правого сдвига (см. рис. 5, *A, B*). Положению главного сместителя соответствует наиболее интенсивный максимум на диаграмме ($140^\circ \angle 80^\circ$), что является еще одним, хотя и косвенным, доказательством справедливости сделанного заключения.

Чтобы исключить элемент случайности в совпадении положений максимумов на диаграмме и трафарете, истинность полученного решения была проверена комплексом специальных методических приемов, применение которых оказалось в данном случае возможным. Отметим, что описанный ниже анализ может быть независимым, так как основывается на знании особенностей проявления в коренном выходе и на диаграмме известных парагенезисов: классических пар сопряженных сколов [Гзовский, 1963; Николаев, 1992], троек-систем трещин [Семинский, 1994; Семинский, Гладков, 1997] и поясов [Данилович, 1961].

В целом на диаграмме выделяются шесть тройственных парагенезисов. Решения по полям напряжений для каждого из них с использованием главной и сопряженной с ней систем представлены на рис. 6. Реконструкция проводилась по методу М.В. Гзовского [1963] с восстановлением оси сжатия в остром угле между сопряженными направлениями трещин, что характерно для близповерхностных условий разрывообразования. Справедливость каждого из решений подтверждается разбросами полюсов трещин у участвующих в реконструкции максимумов [Николаев, 1992], направления которых показаны на рис. 5, *A*. Все полученные решения (кроме показанного на рис. 6, *E*) принадлежат к „чистым“ динамическим обстановкам (сдвиг, сжатие, растяжение) и характеризуются общей особенностью: оси напряжений занимают субвертикальное или субгоризонтальное положения. В последнем случае они ориентируются либо в субмеридиональном (средний аз. прост. 15°), либо в субширотном (средний аз. прост. 285°) направлениях. Это свидетельствует о возникновении всех рассматриваемых полей за счет переиндексации осей в одной динамической обстановке 1-го порядка, которая характерна для формирования правосдвиговой разломной зоны, простирающейся по азимуту 50° .

Принимая в каждом из частных решений (см. рис. 6) главную систему трещин за условно разломную, можно установить парагенезис разрывов 2-го порядка, составляющих внутреннюю структуру рассматриваемой разломной зоны. Как видно из рис. 5, *Г*, он представлен почти всеми системами опережающих сколов, которые могут сформироваться в данных условиях, исключая одно из сопряженных направлений надвигового типа. Вместе с тем это лишь предполагаемый парагенезис, поскольку из всех его членов только в одном случае достаточно уверенно можно судить о реальном существовании разломной поверхности. Так, простираение системы сколов главного сместителя (*У*) соответствует ориентировке распада, в пределах которого измерялись трещины, причем при выходе в долину Ангары его крутой борт образует уступ, позволяющий сделать вывод о правостороннем смещении крыльев разлома. При этом характер подвижки подтверждается как решением о поле напряжений по методу П.Н. Николаева [1992] (см. рис. 6, *A*), так и анализом существующего на диаграмме пояса по методу В.Н. Даниловича [1961] (см. рис. 5, *B*). Более того, установленная кинематика движений находится в полном соответствии с подвижками по разрывным нарушениям, располагающимся рядом с изученным и представляющим зону влияния крупнейшего в Иркутском амфитеатре Ангарского разлома [Семинский и др., 2001].

Условный парагенезис разрывов 2-го порядка (см. рис. 5, *Г*) и послужившие основой для его реконструкции частные решения (см. рис. 6) позволяют уточнить параметры, отражающие конкретные для данного участка условия разрывообразования. Так, удвоенный угол скальвания для полученных решений в среднем составляет 75° . Это заметно меньше, чем значения, обычно определяемые для зон сдвига в кристаллических породах (примерно 85°), и в целом, согласно установленным ранее закономерностям изменения угла скальвания [Семинский, 2003], соответствует обстановке близповерхностного разрывообразования в сравнительно рыхлом осадке. Угол между осью сжатия поля напряжений 1-го порядка и простираением разломной зоны (50°) примерно равен величине, имеющей место в условиях лабораторного эксперимента по деформированию модели из глинистой пасты, располагающейся над сдвиговым сместителем [Wilcox et al., 1973; Mandl, 1988; Разломообразование..., 1991, 1992, 1994]. Это не только свидетельствует об аналогии процессов, но и о небольшой транспрессии, являющейся причиной переиндексации осей напряжений в ходе разрывообразования и, как следствие этого, возникновения многих зафиксированных в обнажении систем трещин.

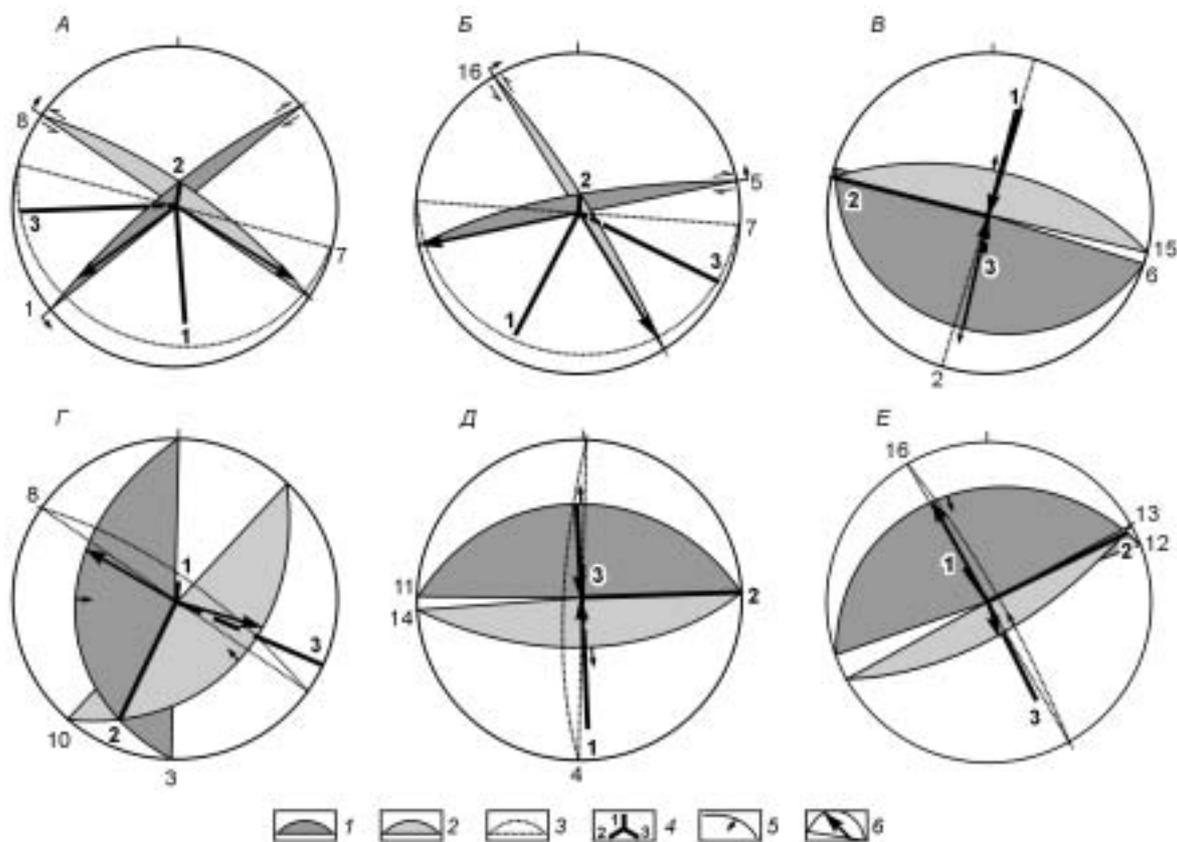


Рис. 6. Реконструкция полей напряжений, в которых образовались тройственные парагенезисы, составляющие хаотическую трещинную сеть, представленную на рис. 5, А.

Номера соответствующих друг другу плоскостей и максимумов полюсов трещин на рис. 5, А и 6 совпадают; А–Е — пояснения см. в тексте.

1–3 — три взаимно-перпендикулярные системы трещин парагенезиса (1 — главная, 2 — второстепенная, 3 — дополнительная); 4 — оси напряжений (1 — σ_1 , 2 — σ_2 , 3 — σ_3); 5 — направление разброса трещин в системе (соответствует рис. 5, А); 6 — направление скольжения всяческого блока по плоскости разрыва.

Итак, приведенный анализ позволяет считать однозначно доказанным, что задокументированная в суглинках трещинная сеть практически полностью (13 систем из 17) образовалась в результате активизации в позднем КЗ северо-восточного правостороннего сдвига, располагающегося в подстилающих рыхлые отложениях породах мезозоя. Эта интерпретация не объясняет происхождения лишь одного из 6 выявленных тройственных парагенезисов (см. рис. 6, Е) и двух отдельных максимумов (№ 9 и 17 на рис. 5, А), первый из которых не относится к основным, а второй можно считать разновидностью, участвующей в решениях системы № 5.

Так как и в некоторых других коренных выходах аналогичные построения позволили выявить парагенезисы структур 2-го порядка, формирующиеся в осадочном чехле над разломами фундамента, опыт применения представленного выше методического подхода к расшифровке хаотической трещинной сети в слабосцементированных четвертичных отложениях следует считать вполне успешным. Использование трафаретов не требует больших временных затрат, но для проверки достоверности решений следует анализировать и дополнительные косвенные признаки (направление разбросов, типы поясов трещиноватости и т. д.). В целом анализ данного типа открывает большие возможности по картированию скрытых под современными отложениями разломных зон и определению характера перемещений в их пределах. Получение такой информации имеет важное значение при инженерно-геологических изысканиях под строительство в любом природном регионе и особенно актуально для тектонически-активных территорий.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере скальных пород и, что еще более важно, слабосцементированных четвертичных отложений представлен новый подход к интерпретации сложных приразломных трещинных сетей. В его

основе лежат установленные ранее особенности формирования разломных зон, структура которых развивается путем закономерной смены для одного и того же объема горных пород полей напряжений 2-го порядка и возникновения в каждом из них разрывов с соответствующим парагенезисом из трех примерно перпендикулярных систем трещин. Наложение тройственных парагенезисов формирует внешне хаотические сети трещин, происхождение которых связано с однонаправленными перемещениями в разломной зоне 1-го порядка и, согласно представленному в статье подходу, может быть выявлено при помощи эталонных наборов разрывных систем (в форме трафаретов), разработанных для каждого из известных режимов смены полей напряжений и преобладающих в земной коре условий трещинообразования. Это, в свою очередь, дает возможность установить морфогенетические характеристики самой разломной зоны, а также поля напряжений и наборы разрывов 2-го порядка, имевшие место в истории формирования ее внутренней структуры.

Следует отметить, что в статье показана лишь принципиальная возможность и главные преимущества анализа, тогда как его детальная разработка является целью дальнейших исследований, которые могут осуществляться в нескольких направлениях. Во-первых, следует отработать приемы компьютерного сравнения (на количественной основе) диаграмм трещиноватости друг с другом и с трафаретами, что существенно снизит временные затраты анализа и повысит его точность. Во-вторых, необходима разработка новых эталонов, отражающих специфику трещинообразования в разных условиях деформирования (например, по глубине, степени активности), а также в различных, но закономерно возникающих в разломных зонах структурных ситуациях (например, участки дуплексного строения, участки развития оперяющих трещин). В-третьих, следует выявить роль в формировании хаотических трещинных сетей имеющихся в горных массивах структурно-вещественных неоднородностей.

Вторая и третья как наиболее важные для развития метода задачи могут быть корректно решены только при сочетании теоретического анализа с апробацией нового подхода в пределах разломных зон, характеризующихся разным типом, масштабом и интенсивностью перемещений. Преимуществом рассмотренного подхода в этом плане является возможность проведения исследований, в том числе и в слабообнаженных тектонически стабильных регионах (например, платформенных), поскольку главный объект исследования — трещиноватость — распространен повсеместно. В связи с этим практический в любом обнажении горных пород может быть сделан статистический массовый замер элементов залегания трещин, представляющий „структурный портрет“ коренного выхода. Последний имеет не меньшее значение для геологической характеристики горного массива, чем тип и состав горной породы, отражающие его вещественную сущность. Поэтому открывающаяся возможность расшифровки происхождения большинства зафиксированных у разлома систем трещин позволит поднять структурную изученность земной коры на качественно новый уровень.

Работа выполнена при поддержке СО РАН (интеграционный проект ОНЗ-6.13).

ЛИТЕРАТУРА

Гзовский М.В. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория, Ч. 3, 4. М., Изд-во АН СССР, 1963, 544 с.

Гладков А.С., Семинский К.Ж. Нетрадиционный анализ поясов трещиноватости при картировании субгоризонтальных разломных структур (на примере окрестностей Иркутска) // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (2), с. 213—220.

Гладков А.С., Лунина О.В. Трещины в позднекайнозойских отложениях: новые возможности для структурного анализа // Докл. РАН, 2004, т. 398, № 6, с. 782—785.

Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М., Наука, 1979, с. 7—35.

Данилович В.Н. Метод поясов в исследовании трещиноватости, связанной с разрывными смещениями. Иркутск, ИПИ, 1961, 47 с.

Дзюба И.А. Типы тектонических деформаций в кайнозойских породах Тункинской рифтовой впадины // Эволюция тектонических процессов в истории Земли, Т. 1. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал „Гео“, 2004, с. 142—145.

Копп М.Л. Структуры латерального выжимания в Альпийско-Гималайском коллизионном поясе. М., Научный мир, 1997, 314 с.

Лукьянов А.В. Структурные проявления горизонтальных движений земной коры. М., Наука, 1965, 210 с.

Николаев П.Н. Методика тектонодинамического анализа. М., Недра, 1992, 295 с.

Парфенов В.Д. К методике тектонофизического анализа геологических структур // Геотектоника, 1984, № 1, с. 60—72.

Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига / С.И. Шерман, К.Ж. Семинский, С.А. Борняков и др. Новосибирск, Наука, 1991, 262 с.

Разломообразование в литосфере. Зоны растяжения / С.И. Шерман, К.Ж. Семинский, С.А. Борняков и др. Новосибирск, Наука, 1992, 240 с.

Разломообразование в литосфере. Зоны сжатия / С.И. Шерман, К.Ж. Семинский, С.А. Борняков и др. Новосибирск, Наука, 1994, 263 с.

Расцветаев Л.М. Выявление парагенетических семейств тектонических дизъюнктивов как метод палеогеомеханического анализа полей напряжений и деформаций земной коры // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М., Наука, 1987, с. 171—181.

Родыгин А.М. Признаки направления смещения при деформации сдвига. Томск, Изд-во Томск. ун-та, 1991, 99 с.

Семинский К.Ж. Принципы и этапы спецкартирования разломно-блоковой структуры на основе изучения трещиноватости // Геология и геофизика, 1994, т. 35 (9), с. 112—130.

Семинский К.Ж. Соотношения углов между системами сопряженных трещин вблизи сместителей сдвигов, сбросов и надвигов // Докл. РАН, 1997, т. 354, № 3, с. 361—363.

Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал „Гео“, 2003, 244 с.

Семинский К.Ж. Картирование разломно-блоковой структуры земной коры на современном этапе развития тектонофизики // Геофизический журнал, 2005, т. 27, № 1, с. 85—96.

Семинский К.Ж., Гладков А.С. Комплексный подход к картированию структуры земной коры на современном этапе развития тектонофизики // Отечественная геология, 1997, № 4, с. 7—11.

Семинский К.Ж., Адамович А.Н. Значение переиндексации осей главных нормальных напряжений при структурообразовании в разломных зонах земной коры // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Новосибирск, Изд-во ИГД СО РАН, 2004, с. 251—255.

Семинский К.Ж., Гладков А.С., Лунина О.В. Тектонофизическая характеристика зоны Ангарского разлома (юг Сибирской платформы) // Геология и геофизика, 2001, т. 42 (8), с. 1260—1270.

Стоянов С. Механизм формирования разрывных зон. М., Недра, 1977, 144 с.

Чернышев С.Н. Трещины горных пород. М., Наука, 1983, 240 с.

Angelier J. From orientation to magnitudes in paleostress determination using fault slip data // J. Struct. Geol., 1989, v. 1, p. 37—50.

Gephart J.W. Stress and the direction of slip on fault planes // Tectonics, 1990, v. 9, p. 845—858.

Hancock P.L. Brittle microtectonics: principles and practice // J. Struct. Geol., 1985, v. 7, № 3/4, p. 437—457.

Mandl G. Mechanics of tectonic faulting. Models and basic concepts. Amsterdam, Elsevier, 1988, 407 с.

McCoss A.M. Simple constructions for deformation in transpression/transension zones // J. Struct. Geol., 1986, v. 8, № 6, p. 715—718.

Ramsay J.C., Huber M.J. The techniques of modern structural geology, V. 1, 2. London, Academ. Pres. Incorp., 1987, 700 p.

Reches Z. Analysis of faulting in three-dimensional strain field // Tectonophysics, 1978, v. 47, № 1—2, p. 109—130.

Reches Z. Determination of the tectonic stress tensor from slip along faults that obey the Coulomb field criterion // Tectonics, 1987, v. 6, p. 849—861.

Sibson R.H. Brittle failure mode plots for compressional and extensional tectonic regimes // J. Struct. Geol., 1998, v. 20, № 5, p. 655—660.

Sylvester A.G. Strike-slip faults // Geol. Soc. Amer. Bull., 1988, v. 100, p. 1666—1703.

Twiss R.J., Moores E.M. Structural geology. New York, W.H. Freeman and Company, 1992, 533 с.

Wilcox R.E., Harding T.P., Seely D.R. Basic wrench tectonics // Amer. Assoc. Petrol. Geologist Bull., 1973, v. 57, p. 74—96.

Woodcock N.H., Fischer M. Strike-slip duplexes // J. Struct. Geol., 1986, v. 8, № 7, p. 725—735.