

УГЛЫ МЕЖДУ СОПРЯЖЕННЫМИ СИСТЕМАМИ ПРИРАЗЛОМНЫХ ТРЕЩИН В ИДЕАЛИЗИРОВАННЫХ И ПРИРОДНЫХ ПАРАГЕНЕЗИСАХ, ФОРМИРУЮЩИХСЯ В РАЗЛИЧНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВКАХ

© 2011 г. Ю. П. Бурзунова

Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
E-mail: bourz@mail.ru

Поступила в редакцию 15.03.2010 г.

На основе анализа трещиноватости в разломных зонах земной коры с установленным морфогенетическим типом, а значит известной динамической обстановкой их формирования, уточнены значения углов между сопряженными системами сколов в идеализированных трещинных парагенезисах. Величина этого параметра варьирует в определенных пределах и существенно зависит от типа действующего в момент образования трещин поля напряжений. Она возрастает в ряду обстановок растяжения, сдвига и сжатия, изменяясь в интервале от 75° до 94° . Подобная зависимость установлена и для разрывов более крупного ранга – разломов. Предлагается использовать установленные значения углов в новых идеализированных диаграммах при исследованиях закономерностей формирования разломной структуры природных регионов методом парагенетического анализа тектонической трещиноватости.

Ключевые слова: угол скалывания, сопряженные системы трещин, трещинный парагенезис, разломная зона, разрывы, поле напряжений, морфогенетический тип разлома.

ВВЕДЕНИЕ

При изучении тектонической структуры земной коры трещины обладают большим преимуществом по сравнению с другими категориями разрывов в том отношении, что они развиты повсеместно. Трещины, как “малые” структурные формы, протяженность которых измеряется сантиметрами, метрами или десятками метров, могут быть изучены непосредственно при полевом анализе практически любых обнажений горных пород. Поэтому большое значение имеет интерпретация трещинных сетей, а именно пространственного взаимоположения их систем, поскольку эти данные свидетельствуют об определенном напряженном состоянии горного массива при разрывообразовании. Полученные

сведения важны не только для выявления генезиса конкретной трещинной сети, но и для установления механизма формирования более крупных, связанных с ней, структурных форм, которыми являются мелкие разломы и второстепенные сместители региональных разломов. Эти данные могут применяться самостоятельно, но более эффективно использовать их совместно с другими методами исследования тектонического развития того или иного участка верхней части земной коры.

Приразломные трещинные сети наиболее сложны для изучения. Они обычно имеют внешне хаотический облик, поскольку состоят из множества разно ориентированных систем. Для исследования трещиноватости, не имеющей кинематических маркеров, используют структурно-парагенетический анализ. Парагенезисом называют совокупность разнотипных разрывных систем, которые формируются в одной динамической (геолого-механической) обстановке в результате действия определенного поля тектонических напряжений и, следовательно, связаны между собой устойчивыми и закономерными пространственно-временными соотношениями [11, 13]. В различных напряженно-деформированных состояниях образуются такие парагенезисы, как пара сопряженных сколов, пояса, пирамиды, конусы и другие [3, 11].

Две системы сопряженных сколовых трещин являются одним из самых распространенных простых трещинных парагенезисов [4, 11, 13] (рис. 1),

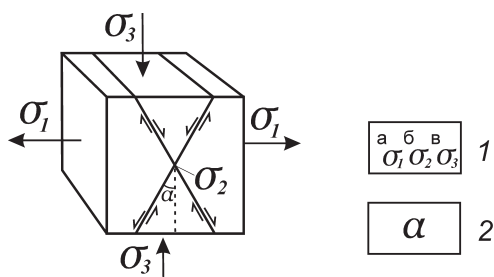


Рис. 1. Простой трещинный парагенезис, состоящий из пары сопряженных сколов.

1 – оси главных нормальных напряжений: растяжения (а), промежуточная (б) и сжатия (в); 2 – угол скалывания.

которые часто составляют основу их более сложных разновидностей. К сопряженным трещинам относят пересекающиеся под некоторым углом разновозрастные трещины, возникшие в одном поле тектонических напряжений. В полевых условиях сопряженность трещин скалывания двух направлений устанавливается по их слиянию, взаимному пересечению, противоположности направления смещения, постоянству угла между ними, аналогичной распространенности и связи со структурой района, сходному и разновозрастному минеральному заполнению [4].

Одним из параметров, характеризующих сопряженные сколы, является угол между ними, величина которого есть удвоенный угол скалывания α между разрывом и осью максимального сжатия (рис. 1). Исходя из положений механики разрушения, в изотропной однородной среде скалывание происходит в плоскостях действия максимальных касательных напряжений, характеризующихся углом скалывания в 45° . В реальных условиях трещины скалывания обычно возникают под меньшим углом, что объясняется внутренними силами трения, препятствующими разрыву горных пород [1, 3]. Коэффициент внутреннего трения зависит от состава и структуры материала, значит, и от его свойств, а также от скорости деформирования, температуры, давления. Угол скалывания неоднократно был определен при условно-мгновенном разрушении сухих образцов различных горных пород при атмосферном давлении и комнатной температуре [3]. В природе измеряемый угол между системами сопряженных трещин – это удвоенный угол скалывания, “измененный” в условиях прошедшей деформации горных пород. Согласно литературным данным, главную роль среди вышеперечисленных определяющих рассматриваемый параметр факторов играет всестороннее давление. В процессе формирования разломных зон в условиях действия сжимающих напряжений по всем трем осям угол скалывания варьирует в пределах $30\text{--}45^\circ$ [22], хотя есть экспериментальные данные, что и изначальный угол может быть достаточно велик [4]. В наиболее общем для условий земной коры случае в момент образования сколов угол α составляет 35° , но в ходе последующей деформации при развороте трещин он может “пассивно” увеличиться до 45° и более [1, 12, 13].

Таким образом, угол между сопряженными системами трещин, в котором располагается ось сжатия, может составлять $60\text{--}90$ и более градусов. В предлагаемой работе предполагается провести детальный анализ величины данного параметра, характеризующей расположение сопряженных систем трещин вблизи разломов, внутренняя структура которых формировалась в динамических обстановках сжатия, сдвига и растяжения.

ИСХОДНЫЕ МАТЕРИАЛЫ – ПРЕДПОСЫЛКИ ДЛЯ АНАЛИЗА

В работе используются термины “разлом”, “трещина”, “разрыв”, причем считается, что в механическом смысле они эквивалентны и относятся к структурам, образованным путем скалывания. Первые два термина отличаются размерами (рангом) структур, в то время как третий в этом отношении нейтрален [16]. Сопряженные пары могут быть выделены для разрывов разных рангов, как для небольших сколов длиной в первые десятки см, так и для разломов протяженностью первые километры–десятки километров [4]. В нашем исследовании разрывами скалывания самого мелкого ранга являются трещины.

Порядок структур определяется как признак только генетической соподчиненности и, в принципе, не учитывает размеры структур. В силу этого, структурами второго (или вообще более высокого) порядка мы, вслед за [16], называем структуры, в образовании которых существенную роль сыграла некоторая структура первого (или более низкого) порядка, которая считается главной. Термин “порядок” в указанном смысле применяется и тогда, когда речь идет о физических величинах (напряжения, деформации) или процессах (структурообразование, смещение). Существует преобладание порядков, то есть взаимоотношения структурных элементов 1-го и 2-го порядков друг с другом аналогичны тем, которые возникают в разломной зоне между разрывами двух любых смежных порядков.

Предпосылками для проведения данной работы послужили следующие, охарактеризованные ниже, материалы: 1) ранее разработанные идеализированные (эталонные) парагенезисы трещин со средним значением угла (80°) при оси сжатия у всех сопряженных сколовых трещин [13]; 2) результаты исследования природных парагенезисов, выявившие определенные вариации значений углов у сопряженных трещин, непосредственно связанных с главным сместителем разлома [15].

Эталонные трещинные сети

Для интерпретации сложных приразломных трещинных сетей был разработан новый методический подход [13]. В его основе лежат известные закономерности разрывообразования на уровне разломов [3, 23] и выявленные особенности скалывания на уровне трещиноватости [15, 23].

Согласно современным представлениям тектоники, внутренняя структура разломных зон земной коры формируется в полях напряжений 2-го порядка, существующих в отдельные моменты ее развития. Исходя из физических и структурных критериев, процесс формирования крупной разломной зоны разделен на три главных стадии, отделяющиеся

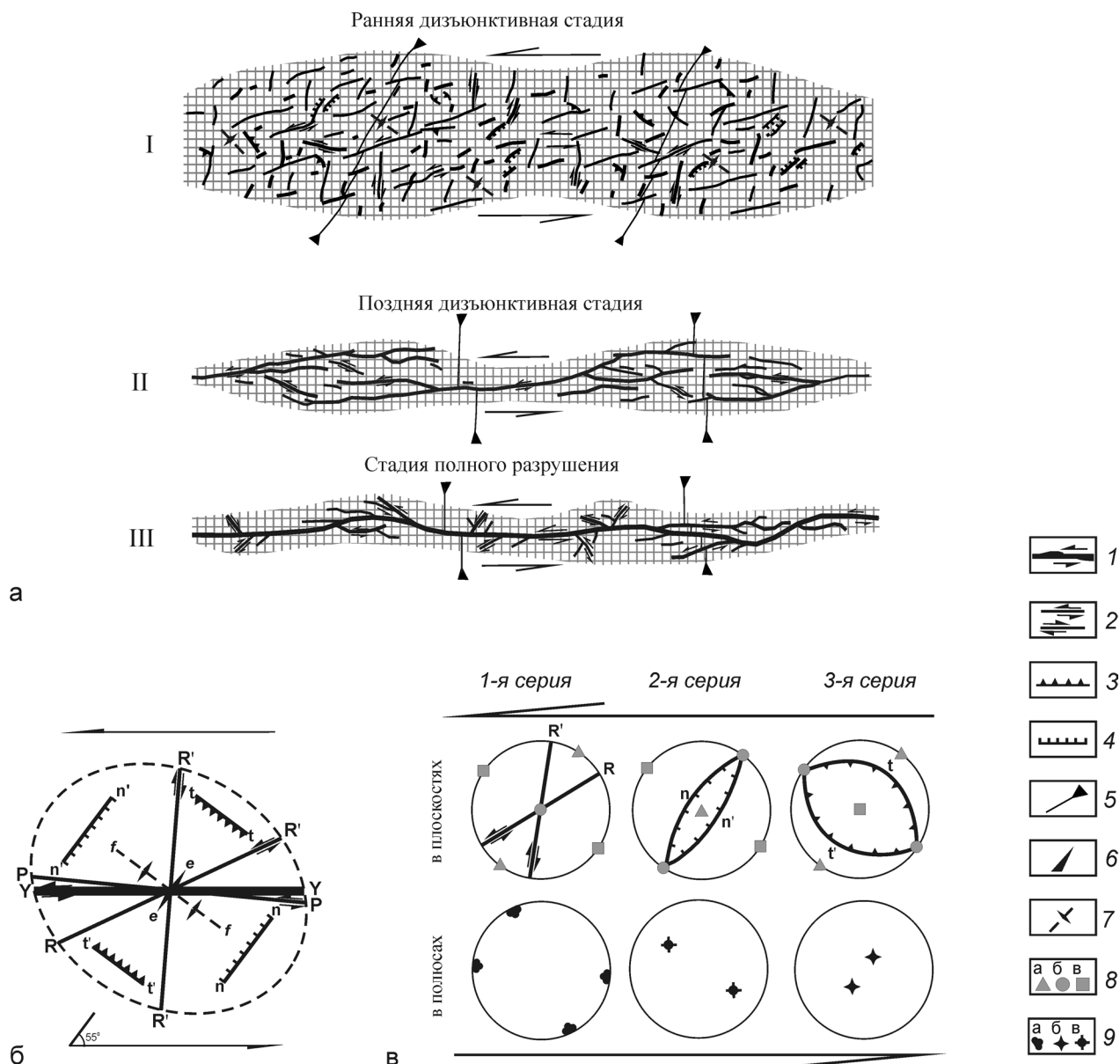


Рис. 2. Главные элементы внутренней структуры разломных зон земной коры (на примере левого сдвига).

а – тектонофизическая модель формирования разрывной структуры крупной разломной зоны (I, II, III – главные стадии развития) [13]; б – структурные элементы зоны скалывания (по [20] с упрощениями); в – типы разрывов 2-го порядка (в плоскостях и полюсах, здесь и далее представлены на круговых диаграммах, верхняя полусфера, сетка Вульфа) 1-ой (R), 2-ой (n) и 3-ей (t) серий, образующиеся в левосдвиговой зоне скалывания при переиндексации осей напряжений [13]. 1 – магистральный сдвиговый сместитель (Y); 2 – сопряженные (R и R') и одиночные (P) сдвиги; 3 – сопряженные взбросы (t и t'); 4 – сопряженные сбросы (n и n'); 5 – реперы, смещенные по разрывам; 6 – разрывы растяжения (e); 7 – оси складок (f); 8 – выходы на верхнюю полусферу осей главных нормальных напряжений – максимального (а), промежуточного (б) и минимального (в) сжатия; 9 – полюсы сопряженных разрывов 2-го порядка – сдвига (а), взброса (б) и сброса (в).

друг от друга моментами проявления главной структурной перестройки и возникновения магистрального сместителя [13]. В тектонофизической модели формирования разломной зоны (рис. 2а) каждой из трех стадий соответствуют строго определенные параметры: деформационное поведение субстрата, его напряженное состояние, парагенезис разрывов 2-го порядка (опережающих, сопутствующих и опережающих), пространственные и временные вариации количественных параметров разрывной сети.

Ранняя дизъюнктивная стадия (рис. 2а – I) представлена зоной распространения нескольких систем опережающих разрывов, располагающихся эшелонированно по отношению к осевой линии. Парагенезис разрывов состоит из сопряженных сколов 1-й (R'- и R-типов), 2-й (n'- и n-типов) и 3-й (t'- и t-типов) серий. Пары сопряженных направлений разрывов попеременно возникают в полях напряжений 2-го порядка, отличающихся друг от друга по типам и интенсивности проявления. За-

кономерная смена таких полей для одного и того же объема горных пород происходит путем изменения относительной величины главных нормальных напряжений при сохранении пространственного положения направлений их действия. Это явление – переиндексация осей главных нормальных напряжений – возникает на самых ранних этапах разрывообразования при осесимметричном напряженном состоянии, когда существенно упругая реакция горного массива имеет место при относительно большом всестороннем давлении в верхней части земной коры. К концу стадии доминируют системы сколов 1-ой серии, при этом наибольшее развитие получают синтетические разрывы R-типа, наклон которых к оси разломной зоны постепенно уменьшается из-за вращения осей напряжений и увеличения угла скалывания.

Поздняя дизъюнктивная стадия (рис. 2а – II) представлена зоной ветвящихся опережающих разрывов R-типа, из которых наиболее длинные располагаются на отдельных участках в единственном числе, тогда как в соседних областях происходит их сочленение друг с другом с образованием нарушений R-, P- и Y-типа. Реализация в разломной зоне больших амплитуд смещений по главным системам опережающих разрывов сопровождается подвижками по перпендикулярным к ним сопутствующим нарушениям трансформационного типа, которые наследуют древние структурные и вещественные неоднородности, ориентированные в направлении тектонического транспорта. Кроме того, в разломных зонах сжатия и растяжения развиваются сопутствующие разрывы гравитационной природы.

Дизъюнктивная стадия полного разрушения (рис. 2а – III) представлена непрерывным магистральным сместителем 1-го порядка, узкой зоной распространения опережающих, а также сопутствующих разрывов, степень выраженности которых, в связи с увеличением амплитуды перемещения, усиливается. Оперяющие разрывы представлены в основном активизированными опережающими нарушениями R- и P-типов, подвижки по которым в разных участках крыльев могут иметь противоположные знаки из-за возникновения на участках торможения скольжения по магистральному сместителю обстановок продольного растяжения или сжатия. У изгибов также возникают и собственно оперяющие разрывы, характер проявления которых определяется формой и размерами изгибов плоскости сместителя.

Необходимо отметить, что в новом подходе анализируются в основном опережающие разрывы как структуры 2-го порядка, возникающие в разломной зоне до появления в ее пределах магистрального сместителя (разрыва 1-го порядка). Преимущество использования данных разрывов состоит в том, что они неизбежно образуются на первой стадии разрывообразования в достаточно широкой зоне, в которой относительно равномерно распреде-

лены (рис. 2а – I). Затем они получают дальнейшее развитие в качестве наследуемых сопутствующими и, частично, оперяющими разрывами. Иногда развитие разломной зоны заканчивается на одной из промежуточных стадий (нет главного сместителя на поверхности), и тогда опережающие разрывы становятся единственным источником информации о существовавшем поле напряжений. Тем более, что в зонах самых мелких разломов имеются только опережающие разрывы – трещины, хорошо укладывающиеся в системы.

Разрывы 2-го порядка в разломной зоне, в зависимости от ее размеров, могут являться трещинами или разломами. Механизм их образования, по сути, одинаков, однако, ввиду различий рангов, а значит и величины деформируемого объема горных пород, условия протекания разрывообразования различаются, и тем самым влияют на некоторые его параметры (угол скалывания и др.).

Рассмотрим закономерности развития крупных разломов (рис. 2а), у которых разрывами 2-го порядка являются более мелкие **разломы**. Ранее наиболее полный набор структурных элементов 2-го порядка, формирующихся в разломной зоне (рис. 2б), составил по материалам многих авторов П. Ханкок [20]. Самыми известными структурами 2-го порядка являются сопряженные сколы Риделя (R-серия). В наиболее распространенном в природе случае [23, 24] угол между сопряженными сколами составляет около 60° . Занимающая положение его биссектрисы ось сжатия обычно ориентируется под углом $50 \pm 5^\circ$ к общему простиранию зоны скалывания, что обуславливается небольшим, характерным для разломов в изучаемом глубинном интервале земной коры транспрессивным эффектом (дополнительное боковое сжатие). На рис. 2в показано положение упомянутых выше систем возможных опережающих разрывов 2-го порядка (в плоскостях и полюсах), образующихся в полях напряжений разного типа за счет переиндексации главных осей при развитии структуры левосдвиговой разломной зоны. Пара сопряженных разрывов R-серии (левый и правый сдвиги) формируется в том же поле напряжений, что и будущий главный (Y-тип) левосдвиговой сместитель. Сопряженные сколы n-серии (сбросы) и t-серии (взбросы) образуются, когда, соответственно, меняются местами промежуточная ось напряжений с осью минимального или максимального сжатия. То же в механическом отношении будет характерно для взбросовой или сбросовой разломных зон, но в зонах их влияния вторичные разрывы R-, t-, n-серий будут принадлежать к другим морфогенетическим типам в соответствии с их иным расположением относительно земной поверхности.

В свою очередь для самых мелких разломов (которые являются структурами R-, t-, n-типов в более крупных разломных зонах) опережающими разрывами 2-го порядка уже являются **трещины**. Про-

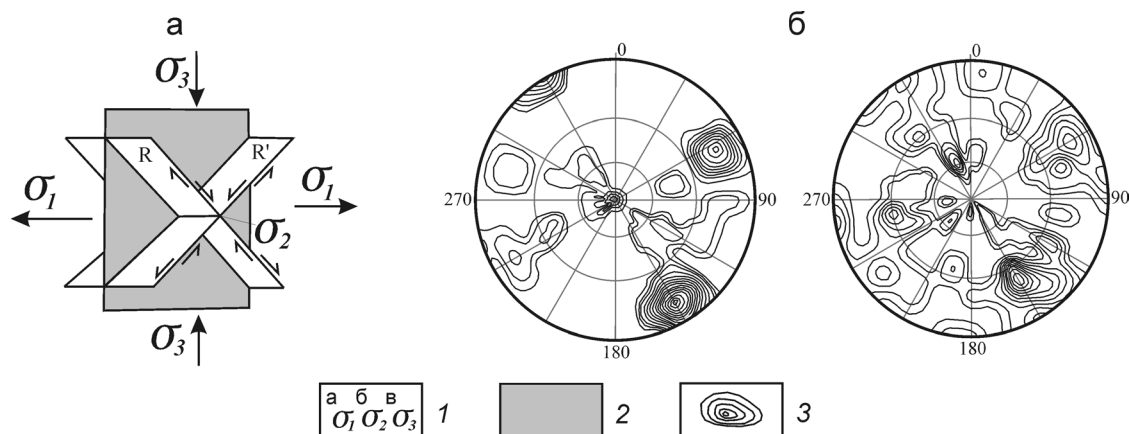


Рис. 3. Особенности формирования трещинных сетей.

а – плоскости тройственного парагенезиса трещин: главная (R), второстепенная (R') и дополнительная системы; б – простая (слева) и хаотическая (справа) трещинные сети: диаграммы трещиноватости с одной и несколькими тройками систем трещин (здесь и далее представлены на круговых диаграммах, верхняя полусфера, сетка Вульфа). 1 – оси главных нормальных напряжений: минимального (а), промежуточного (б) и максимального (в) сжатия; 2 – дополнительная система трещин; 3 – изолинии плотности полюсов трещин.

цесс их формирования отличается некоторыми особенностями [13]. Разрывообразование в зонах мелких разломов происходит сравнительно быстро и ограничивается ранней стадией. Здесь также образуется пара классических сопряженных сколов Риделя (R, R'), но уже в качестве систем трещин – главной (наибольшей по густоте) и второстепенной (рис. 3а). Величина угла между ними (около 80°) больше, чем в аналогичных сколах более низкого порядка – разломах, так как при трещинообразовании имеет место более упругая реакция на приложенную нагрузку в обстановке объемного сжатия. Известно [8, 13 и др.], что степень пластичности поведения деформируемого массива под нагрузкой повышается с величиной этого массива, а значит, и с рангом разрыва (чем меньше разрыв – тем бо-

лее хрупкое разрушение). Кроме того, при хрупком быстром разрушении вместо пары t-сколов вследствие разрядки напряжений при переиндексации часто образуется одна система трещин – дополнительная. Она генетически связана со сколами главной и второстепенной систем, но занимает примерно перпендикулярное к ним положение (рис. 3а).

Данная особенность трещинных сетей – формирование **трех** примерно ортогональных систем – была выявлена в строении разнотипных разломных зон многих регионов земной коры [9, 13, 15]. Тройственный парагенезис имеет устойчивые соотношения с положением разломного сместителя и составляет основу трещинной структуры зоны его влияния. Он может развиваться обособленно или являться частью более сложной трещинной сети (рис 3б).

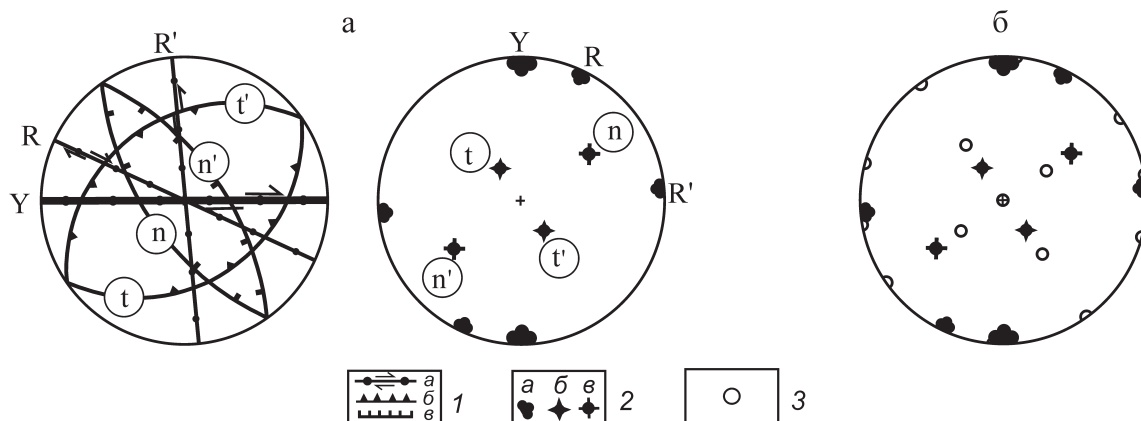


Рис. 4. Идеализированная диаграмма (эталон 1) опережающих разрывов для случая левосдвиговой разломной зоны.

а – главный сместитель (Y) и разломы 2-го порядка (R, t, n) в плоскостях (слева) и полюсах (справа); б – тройки систем трещин (в полюсах), главные системы которых соответствуют вышеперечисленным разломам (а). 1, 2 – плоскости (1) и полюсы (2) разломов сдвигового (а), взбросового (б), сбросового (в) типов; 2 – главные системы трещин; 3 – второстепенные и дополнительные системы трещин.

Последний случай имеет место, когда каждому мелкому разлому 2-го порядка (R-, t-, n-типов), а также частным сместителям более крупной структуры 1-го порядка (Y-типа) соответствует тройственный парагенезис на уровне трещин (3-й порядок разрывов по отношению к магистральному разлому Y-типа). Отметим, что в природе обычно встречаются трещинные сети с неполным набором данных разрывных систем. Однако, даже в этих случаях, трещинные сети по классификации С.Н. Чернышева [17] относятся к хаотическим, так как количество составляющих их систем может достигать 10 и более.

Согласно новому методическому подходу были составлены идеализированные (эталонные) круговые диаграммы-трафареты (назовем их – “эталон 1”), на которых в плоскостях и полюсах изображены трещинные сети, имеющие место в зонах взброса, сброса, правого и левого сдвигов [13, 14]. На каждой эталонной диаграмме (напр., рис. 4) имеются тройственные парагенезисы трещин, соответствующие не только главному сместителю 1-го порядка, но и возможным разнотипным разрывам 2-го порядка, генетически взаимосвязанным вследствие образования в единой геодинамической обстановке – сжатия, растяжения или сдвига. При составлении эталонов применялись параметры, наиболее характерные [13, 20, 24, 25] для зон действия скалывающих напряжений в земной коре: угол между сместителем разлома и осью сжатия – 55° , угол скалывания – 30° (т. е. угол между сопряженными разломами 2-го порядка – 60°), угол между главной и второстепенной системами трещин – 80° .

Эталон правого сдвига построен аналогично левому, но ввиду противоположности смещения представляет его обратное отображение. Другие морфогенетические типы разломов – сбросы и взбросы (надвиги) – не показаны на рис. 4, хотя имеют те же самые наборы систем трещин с одинаковым взаимоположением, но в совокупности уже по-другому расположенные в пространстве, в зависимости от угла падения плоскости главного сместителя и направления смещения по нему.

Разработанная методика включает в себя парагенетический анализ природной трещиноватости, представленной в виде круговых структурных диаграмм на основе статистических массовых замеров трещин. Положение совокупности максимумов на диаграмме сравнивается с эталонным, которое соответствует набору троек-систем трещин, формирующихся во вторичных полях напряжений (имеющих место в разломной зоне 1-го порядка – сдвиговой, надвиговой или сбросовой). Методом подбора выявляется совпадение природной и одной из эталонных трещинных сетей. Итак, суть нового методического подхода состоит в возможности установить морфогенетические характеристики разломной зоны, а также поля напряжений и наборы разрывов 2-го порядка, имевшие место в истории фор-

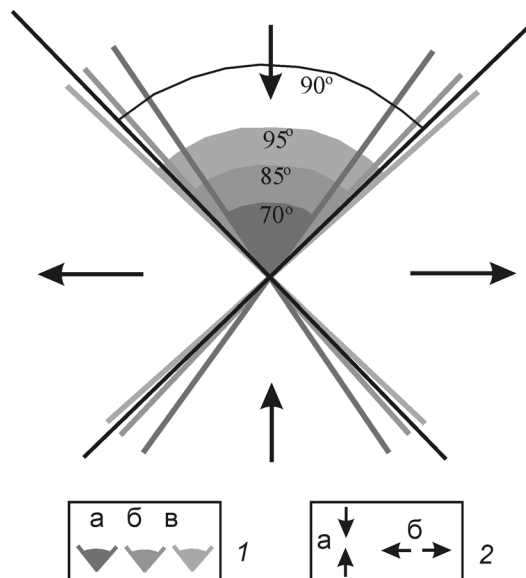


Рис. 5. Угловые взаимоотношения сопряженных систем трещин, изученных вблизи разломов разного морфогенетического типа (по материалам [12, 13]).

1 – средняя величина угла между главной и второстепенной системами в тройственных парагенезисах трещин, сформировавшихся вблизи сместителей сбросового (а), сдвигового (б) и взбросового (в) типов; 2 – оси напряжений: максимального (а) и минимального (б) сжатия.

мирования ее внутренней структуры, используя массовые замеры трещиноватости, в том числе “немой” (без признаков смещений) и хаотической.

Вариации углов скалывания сопряженных трещин в природе

Трещиноватость, как объект детального структурного анализа, обладает некоторыми характерными особенностями, среди которых – широкие вариации угла скалывания вследствие ряда первичных и вторичных причин [11]. Первичными причинами можно считать действие исходного поля напряжений вплоть до образования сколовых трещин и наличие у горного массива определенных структурно-механических свойств, а вторичными – влияние пластических и разрывных дислокаций, возникающих в ходе деформирования.

Отправным положением для проведения работы стали результаты целенаправленного изучения ориентировок сопряженных трещин вблизи сместителей сдвигов, сбросов и надвигов (взбросов) [12, 13]. При этом ориентировка каждого из разломов была определена по материалам государственной геологической съемки, а их морфогенетический тип установлен в ряде коренных выходов классическими структурно-геологическими способами.

Результаты исследования углов между системами сопряженных трещин, полученные эмпириче-

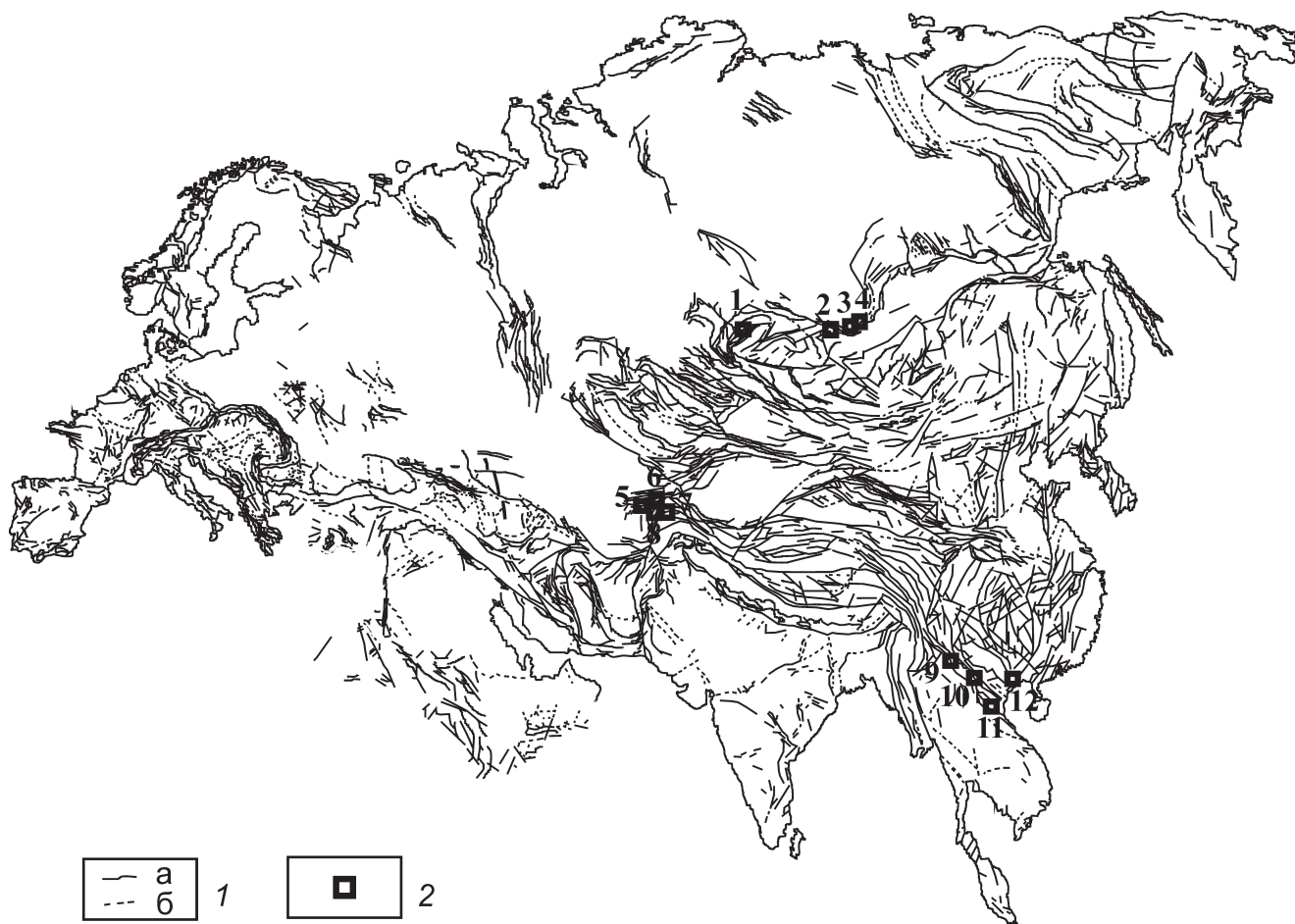


Рис. 6. Положение участков исследования в областях растяжения, сжатия и сдвига, представленное на схеме разломов Евразии [21].

1 – разломы установленные (а) и предполагаемые (б); 2 – участки массовых наблюдений за трещиноватостью и разломами: 1 – Западный Саян, 2–4 – Прибайкалье, 5–8 – зона сочленения Памира и Юж. Тянь-Шаня, 9–12 – Сев. Вьетнам.

ским путем, позволили не только подтвердить наличие, но и установить конкретный вид зависимости величины углов от динамической обстановки их возникновения и развития. Выявлено положение двух систем сопряженных сколов, ассоциирующихся с надвигами, сдвигами или сбросами. Области их распространения располагаются между осями сжатия и растяжения и в принципе контролируются ориентировкой двух плоскостей действия максимальных касательных напряжений (рис. 5). С другой стороны, детальный анализ значений угла между системами сопряженных трещин показал, что он изменяется в пределах $60\text{--}80^\circ$ (среднее значение 70°) в обстановке растяжения, $70\text{--}100^\circ$ (85°) – в обстановке сдвига, и $80\text{--}110^\circ$ (95°) – при сжатии (на рисунке показаны только средние значения углов).

Таким образом, соотношение углов зависит от типа господствующей в пределах изучаемой площади динамической обстановки, так как при сдвиге, растяжении и сжатии имеют место различия в условиях возникновения и развития разрывов. Скорее всего, такой разброс величин объясняется нали-

чием небольшого дополнительного бокового сжатия, свойственного условиям формирования изучаемых деформаций на определенном глубинном интервале земной коры, за счет которого углы между сопряженными сколами изначально отличаются в зонах сбросов, сдвигов и взбросов. Затем эти различия усиливаются в ходе прогрессирующей пластической деформации, причем угол из первоначально острого может стать тупым.

Цель и задачи исследования

Цель работы – уточнить угловые величины в идеализированных парагенезисах разрывов, используя закономерные вариации угла скалывания в природных трещинных сетях.

Задачи исследования:

1. Провести анализ углов между системами сопряженных трещин, соответствующих разломам не только 1-го, но и 2-го порядка, на основе созданной базы данных полевых исследований в различных по геодинамическому развитию регионах.

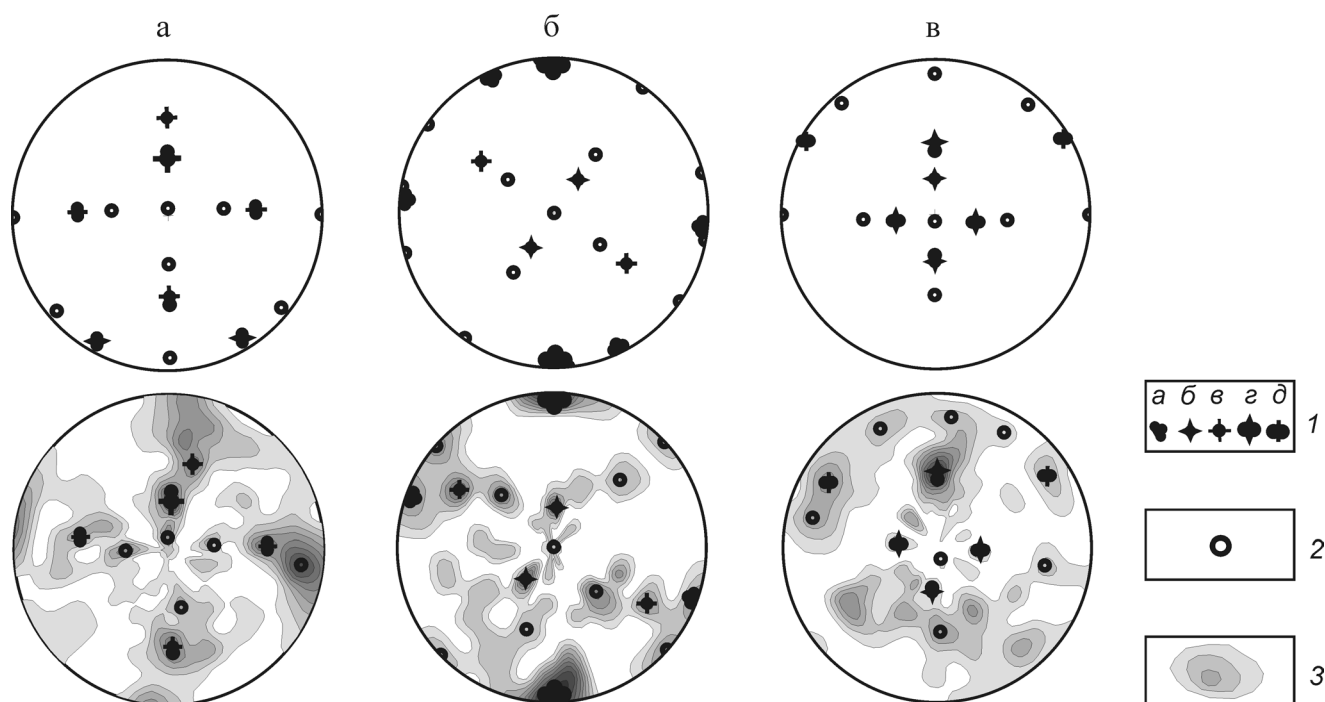


Рис. 7. Интерпретация природных разрывных систем путем совмещения эталонных диаграмм (вверху) с диаграммами трещиноватости (внизу), построенными по точкам наблюдения вблизи разломов разного морфогенезиса: сбросового типа, Зап. Прибайкалье (а); сдвигового типа, Вост. Саян (б); взбросового типа, Вост. Памир (в).

1 – полюсы главных систем трещин в тройственных парагенезисах, соответствующие следующим типам разломов: сдвига (а), взброса (б), сброса (в), сдвига-взброса и взбросо-сдвига (г), сдвига-сброса и сбросо-сдвига (д); 2 – второстепенные и дополнительные системы трещин; 3 – изолинии плотности полюсов трещин.

2. Сопоставить для сравнения эталонные трещинные парагенезисы – первоначальный и скорректированный по результатам анализа – со структурными диаграммами одного из участков Прибайкалья.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для осуществления поставленных задач создана база данных из точек наблюдения вблизи сдвиговых, сбросовых и взбросовых разломных сместителей, располагающихся в пределах Западного Саяна, Южного Тянь-Шаня, Центрального Памира, Прибайкалья и Вьетнама (рис. 6). Сюда вошли только те точки наблюдения, в которых по прямым структурно-геологическим признакам установлено существование сместителя и характер подвижек по его поверхности. Всего, таким образом, было охарактеризовано 40 взбросов, 23 сдвига и 10 сбросов (73 точки). В работе применялись стандартные круговые структурные диаграммы трещиноватости в проекции верхней полусферы, построенные по результатам массовых замеров трещин в точках наблюдений.

В ходе работы методом представленного выше парагенетического анализа определено взаимное положение сопряженных систем трещин, соответ-

ствующих разломам 1-го и 2-го порядков, последние из которых формируются в различных локальных полях напряжений и принадлежат к разным морфогенетическим типам (сдвиг, сброс, взброс, надвиг, в том числе и промежуточные типы – сдвига-сброс, взбросо-сдвиг и др.). Определена ориентировка осей главных нормальных напряжений. Вычислен средний угол между аналогичными сопряженными системами трещин из разных точек наблюдения вблизи разломов каждого морфогенетического типа. Также найдены средние углы между разломами 2-го порядка с использованием отражающей их положение трещиноватости.

Взаимоположение систем опережающих трещин и осей напряжений

В первую очередь необходимо с помощью идеализированного парагенезиса трещин (эталон 1) определить системы разрывов, которые будут использоваться в дальнейшей работе.

Каждая диаграмма из базы данных, следуя методике парагенетического анализа, совмещалась с эталонным трафаретом (рис. 7), соответствующим по пространственной ориентировке и морфогенетическому типу тому разлому, в зоне которого был сделан массовый замер трещин. С помощью трафарета определялось положение сопряженных си-

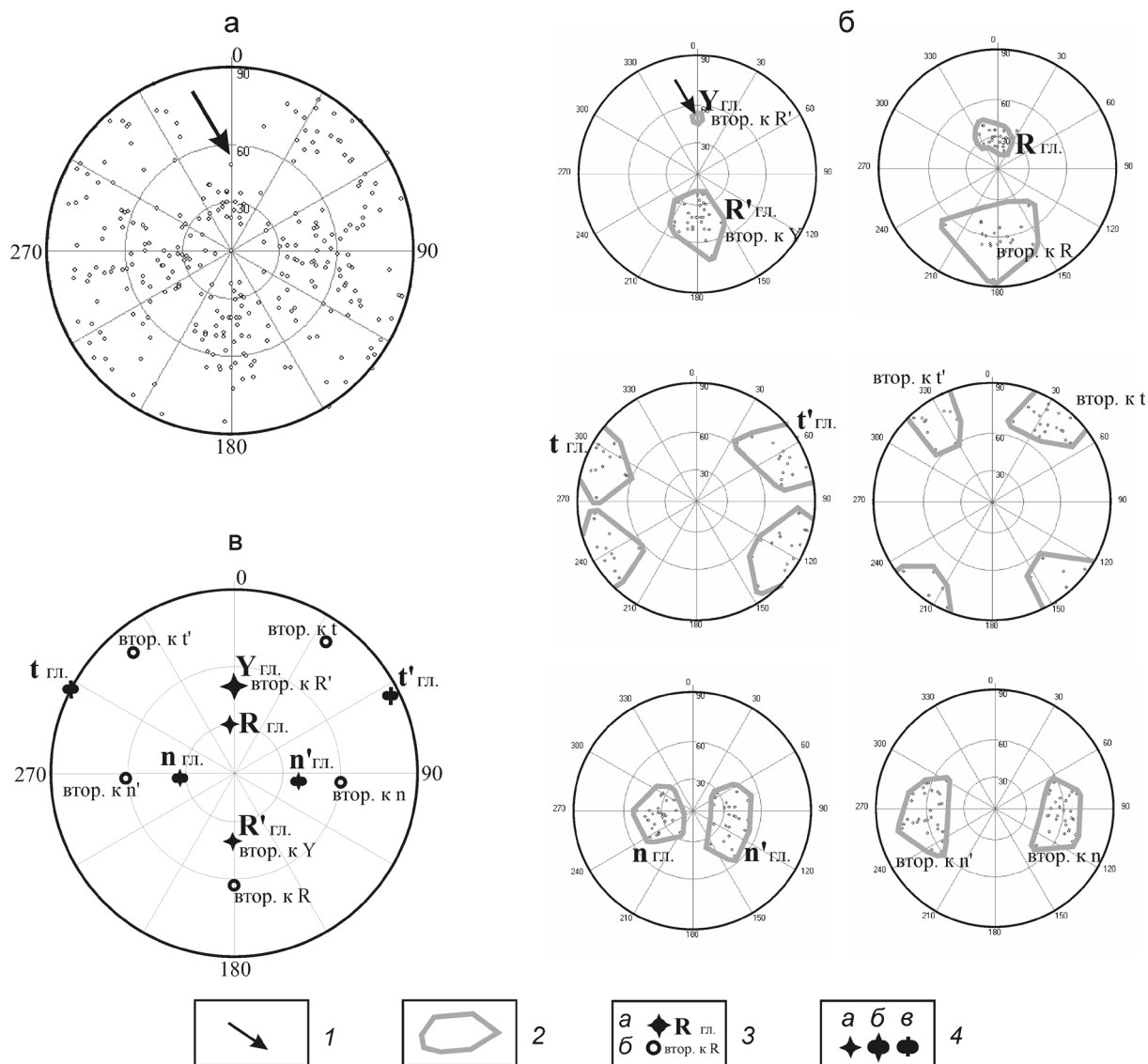


Рис. 8. Результирующие диаграммы для парагенезиса взброса (данные по 33 точкам вблизи взбросовых разломов). а – максимумы систем трещин, соответствующие всем типам разломов (Y, R, R', t, t', n, n'). б – максимумы главных и второстепенных систем трещин отдельно по сериям разломов; в – сводная диаграмма. 1 – стрелка указывает точку, в которую помещены все главные сместители при повороте диаграмм; 2 – разброс ориентировок аналогичных систем трещин; 3 – рассчитанное среднее положение главных (а) и второстепенных (б) систем трещин; 4 – морфогенетический тип разлома: взброс (а), сдвиго-взброс (б), сбросо-сдвиг (в).

систем трещин, которое в целом совпадало с эталонным, но, как правило, на некоторый угол отклонялось от него по причине разнообразия природных условий деформации. Это связано с неоднородностью среды [11], а также активизацией опережающих трещин на более поздних стадиях развития разломной зоны, усложняющей форму отдельных максимумов (направленность разбросов в положении составляющих их трещин). Так, эталонному разрыву иногда соответствует не очень четкий максимум на круговой диаграмме, который становится более определенным при изменении величины окна (10°), используемого при ее построении. В целом на диаграммах анализируемых природных трещинных сетей, как правило, выделялась толь-

ко часть систем эталонной сети трещин. Как и упоминалось ранее, разрывные сети в конкретных разломных зонах обычно не содержат всех разрывов парагенезиса, поскольку происходит прекращение однонаправленного тектонического воздействия на одной из промежуточных стадий развития разлома.

Следует отметить, что на диаграммах также встречаются системы трещин, не относящиеся к данному парагенезису опережающих разрывов. Некоторые из них, сформировались в ином (обычно более древнем) поле напряжений 1 порядка. Другие отражают местные неоднородности массива, в том числе залегание горных пород, что подтверждается полевыми данными. Третьи, возможно, соответствуют опережающим или сопутствующим разрывам рас-

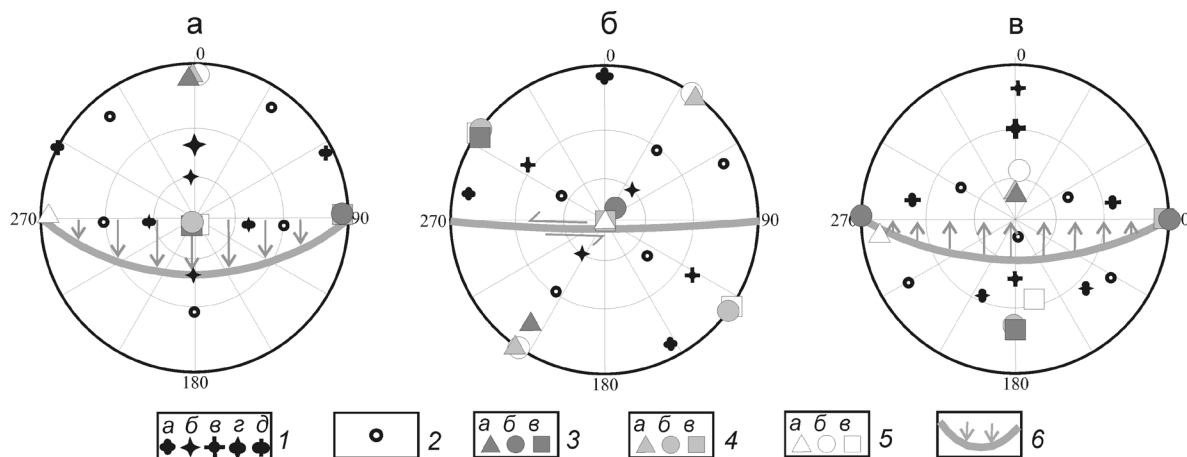


Рис. 9. Положение восстановленных осей напряжений на сводных диаграммах для обстановки сжатия (а), сдвига (б) и растяжения (в).

1 – усредненное положение главных систем трещин, соответствующее разрывам: сдвига (а), взброса (б), сброса (в), сдвиго-взброса и взбросо-сдвига (г), сдвиго-сброса и сбросо-сдвига (д); 2 – усредненное положение второстепенных систем трещин; 3 – оси напряжений, восстановленные по сопряженным разломам R-серии: сжатия (а), промежуточная (б), растяжения (в); 4 – то же для t-серии; 5 – то же для n-серии; 6 – плоскость главного сместителя (Y-тип) и направление смещения по нему.

смаатриваемых разломов. Эти трещины пока не анализируются, так как в данной работе целью является выявление и уточнение угловых взаимоотношений систем именно опережающих сопряженных сколов.

С целью выявления взаимного положения трещинных систем (а также осей напряжений) в пространстве на диаграммах отмечались максимумы полюсов найденных главных и второстепенных систем трещин, соответствующих каждому из эталонных разрывов Y-, R-, R', t-, t', n-, n'-типа. Далее все частные диаграммы были разделены на три группы по морфогенетическому типу главного сместителя и использованы для построения трех сводных диаграмм (соответствующих взбросу, сдвигу и сбросу), которое осуществлялось следующим образом. Диаграммы с помеченными системами вращались на сетке Вульфа так, чтобы все полюсы главных сместителей (Y-тип) были совмещены в одной точке (рис. 8а). При этом из-за различий в падениях главных сместителей все они на сводной диаграмме приводились к одному значению угла (сбросы – 60°, взбросы – 50°, сдвиги – вертикально). Кроме того, для возможности сравнения между собой всех правых и левых сдвигов, правосдвиговые диаграммы были зеркально отображены и представлены как левосдвиговые, поскольку в механическом отношении правый и левый сдвиги подобны.

Анализ результирующих диаграмм данного типа позволил оценить степень разброса в ориентациях всех систем трещин, соответствующих Y-сместителю и мелким разломам в R-, t-, n-сериях (рис. 8б) и в конечном итоге определить их усредненное положение (рис. 8в) путем расчета среднего арифметического значений азимутов падения и углов падения систем.

По сводным диаграммам проведена реконструкция ориентировок осей главных нормальных напря-

жений с использованием метода М.В. Гзовского [4] для каждой серии сопряженных разломов (рис. 9). Если рассматривать оси напряжений, восстановленные по разным сериям разрывов, то у взбросов для всех серий они практически совпадают друг с другом (рис. 9а), у сдвигов в R-серии – имеют незначительное отклонение (рис. 9б), а у сбросов в n-серии – смещены на угол почти 15° от расположенных вместе осей в остальных сериях (рис. 9в). Причина, по-видимому, в небольшом количестве сбросовых точек в базе данных, имеющих, кроме того, неполные разрывные парагенезисы. Следует также учесть, что наиболее благоприятные условия складываются для образования в разломной зоне сколов R- и R'-типов, в меньшей степени t- и t'-типов и наиболее редко – для n- и n'-типов [13]. Исходя из этого, наиболее верным решением будет принять за основное положение осей напряжений для сбросовой ситуации – восстановленное по опережающим разрывам R и t-серий.

В целом, оси напряжений, восстановленные на сводной диаграмме каждого морфогенетического типа, почти не отклоняются от эталонных, кроме случая со сбросом. Ось сжатия расположена под углом 55° к плоскости главного сместителя у взбросов и сдвигов, а у сбросов – под углом 50°, очевидно потому, что в зонах растяжения деформация характеризуется меньшим воздействием дополнительного бокового сжатия, в отличие от зон сдвига и, тем более, зон сжатия.

Величина углов между разломами и трещинами

Дальнейший анализ был направлен на определение углов между сопряженными сколами двух смежных порядков – на уровне трещин (между

Таблица 1. Результаты исследования углов между сопряженными разломами и сопряженными трещинами

Морфогенетический тип разлома 1-го порядка (Y-тип)	Угол между разломами (2-го порядка):		Угол между главной и второстепенной системами трещин (3-го порядка):		Угол между главным сместителем 1-го порядка и осью сжатия
	тип (серия) и морфогенезис разломов	значение угла, °	тип разлома, которому соответствует главная система	значение угла, °	
СБРОС			(Y)	75	50
	R и R' (сброс)	54	(R')	79	
			(R)		
	t и t' (сдвиг-сброс, сброс)	53	(t)	80	
			(t')		
СДВИГ	n и n' (взбросо-сдвиг, сдвиг)	60	(n)	88	55
			(n')		
			(Y)	81	
	R и R' (сдвиг)	53	(R')	82	
			(R)		
ВЗБРОС	t и t' (взброс)	59	(t)	91	55
			(t')		
	n и n' (сброс)	51	(n)	78	
			(n')		
			(Y)	91	
ВЗБРОС	R и R' (взброс)	69	(R')	92	55
			(R)		
	t и t' (сбросо-сдвиг, сдвиг)	56	(t)	82	
			(t')		
	n и n' (сдвиг-взброс, взброс)	69	(n)	94	
			(n')		

главной и второстепенной системами в тройках) и мелких разломов (между главными системами, соответствующими разрывам 2-го порядка R-, t-, n-типов). Значения углов установлены с использованием двух методических подходов.

1-й подход. На каждой диаграмме измерен угол при оси сжатия между найденными путем парагенетического анализа системами трещин. При этом из всех точек отбирались лучшие представители, исходя из большего числа совпадений систем с эталонными, отчетливой выраженности парных максимумов разрывов 2-го порядка, а также отсутствия парагенезисов другого типа. По отобранным точкам у сопряженных систем вычислены средние углы. Поскольку данные для построения диаграмм были собраны в различных природных регионах, выявленные угловые соотношения следует считать усредненными и не содержащими направленного влияния какого-либо из условий деформирования. Этот подход позволил получить достаточно точную величину угла, так как был замерен каждый угол прямо на диаграмме: на результат не влияет фактор возможного смещения пар систем относительно общего положения парагенезиса. С другой стороны, в рамках данного подхода нет привязки этих систем к положению главного сместителя.

2-й подход. Измерение углов осуществлялось между усредненными положениями разрывных систем, представленными на построенных ранее диаграммах – сводных по каждому морфогенетическому типу разломов (рис. 9). Достоинством этого подхода является то, что учитывается именно ориен-

тировка систем в пространстве, из которой можно восстановить среднее положение осей напряжений.

Если сравнивать величины углов между аналогичными системами трещин, полученных с помощью разных подходов, то самые близкие значения оказались у взбросов, тогда как наибольшие расхождения характерны для сбросов. Причина, по-видимому, заключается в разнице количества анализируемых точек: чем их больше, тем точнее результат. Окончательный итог проведенного исследования (табл. 1) учитывает оценки, полученные в ходе обоих подходов. При близких величинах были оставлены значения угла из первого подхода; при отличиях более чем на 3° – рассчитывалось и принималось среднее значение. Ориентировки осей напряжений приняты согласно проведенной реконструкции.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрим установленные при анализе вариации значений углов (табл. 1, рис. 10) между сопряженными разрывами разных порядков – трещинами (3-й порядок) и мелкими разломами (2-й порядок), находящимися в зонах влияния более крупных разломов 1-го порядка – сброса, сдвига и взброса.

Полученные данные подтверждают приведенные ранее сведения о закономерности распределения угловых величин между системами трещин, соответствующих частным разрывам главного сместителя Y-типа [12, 13], по которой средние углы равны: 70° – в обстановке растяжения, 85° – в обста-

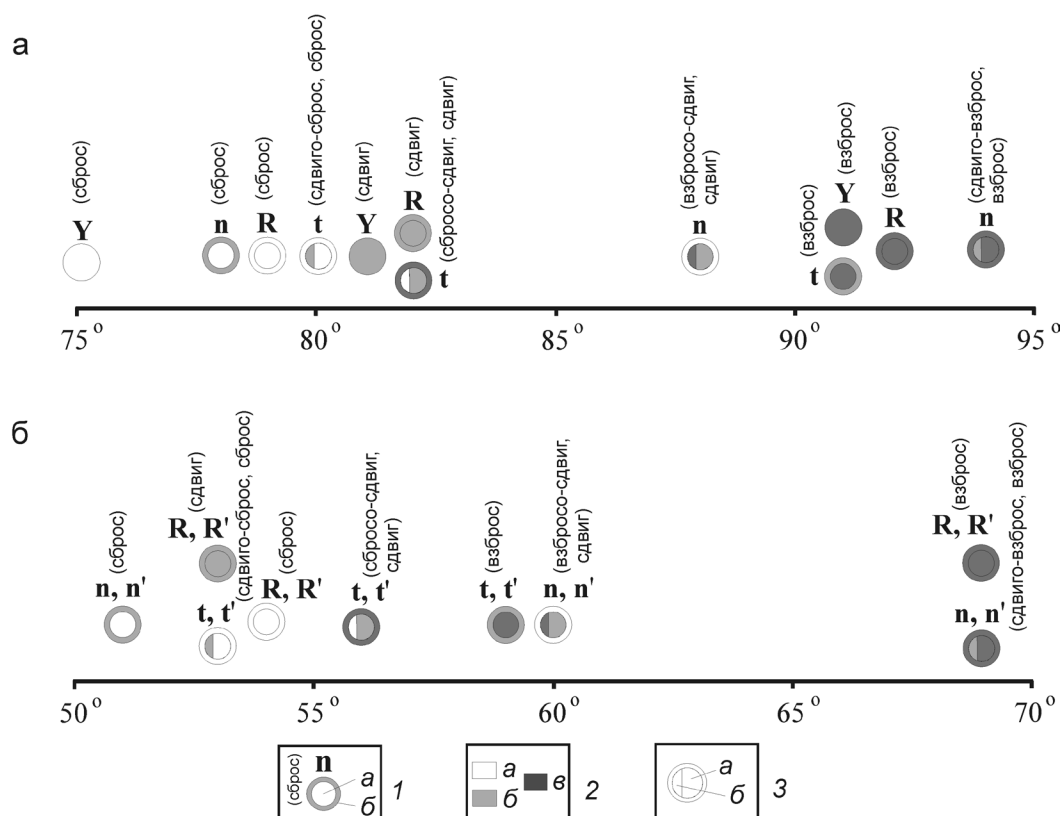


Рис. 10. Величина углов между разрывами разных порядков в различных динамических обстановках.

а – углы между сопряженными системами трещин (разрывы 3-го порядка); б – углы между сопряженными разломами разных типов: R и R', t и t', n и n' (разрывы 2-го порядка). 1 – тип разлома (Y, R, R', t, t', n, n'), которому соответствует главная система трещин в тройственном парагенезисе, сформировавшемся в локальном поле напряжений 2-го порядка (а) в пределах поля напряжений 1-го порядка (б); 2 – тип динамической обстановки: растяжения (а), сдвига (б), сжатия (в); 3 – промежуточные морфогенетические типы разрывов с вертикальной и горизонтальной составляющими, проявленными больше (а) или меньше (б).

новке сдвига, и 95° – при сжатии. В данной работе на конкретном фактическом материале установлены значения, равные соответственно: 75° – 81° – 91° (табл.). В целом углы между сопряженными системами **трещин** (рис. 10а), в зависимости от локальной динамической обстановки, изменяются в интервале от 75° до 94° , причем в некоторых случаях отличие от эталонной величины (80°) достигало 14° .

Углы между системами трещин, относящихся к парам **разломов** 2 порядка R-, t- и n-типов (рис. 10б) изменяются в интервале от 51° до 69° (эталонная величина – 60°), что соответствует литературным данным ($60^\circ \pm 10^\circ$) для наиболее общего случая, отраженного на принципиальных схемах [20, 23–25].

Выяснилось, что разные величины найденных углов между сопряженными **трещинами** (рис. 10а), тяготеют к определенным динамическим обстановкам деформирования, то есть – к морфогенетическому типу разрыва, угол увеличивается в ряду: “сброс–сдвиг–взброс”. Причем даже у промежуточных типов (сдвига-взбросы и взбросо-сдвиги, сдвига-сбросы и сбросо-сдвиги) значение угла стремится к величинам, обусловленным более выраженной компонентой смещения (вертикальной

или горизонтальной). Отмечается влияние на величину угла не только главных, но и локальных полей напряжений, например, возникающих в сдвиговом поле напряжений 1-го порядка локальных полей 2-го порядка – сдвигового, сбросового и взбросового типа, образованные углы в которых различаются по величине. Трещины формируются достаточно быстро на первом этапе развития разломной зоны путем скалывания в относительно небольшом локальном объеме горной породы, то есть в условиях более хрупких, чем разломы, поэтому большую роль здесь играют “местные” поля напряжений.

Первостепенной причиной вариаций угла между сопряженными трещинами является существенная разница условий деформации в зонах сжатия, сдвига и растяжения. Процесс разрушения упругопластичной среды при растяжении происходит быстрее и проще, чем в сдвиговых зонах, основная причина различий заключается в неравнозначных прочностных характеристиках одной и той же среды при воздействии различных типов силовой нагрузки [9]. Разломообразование в зонах сжатия – еще более сложный процесс. Он емок по энергетическим затратам, а разрушению предшествуют бо-

лее длительные периоды накопления напряжений и затяжные стадии пластического течения в масштабах крупных разломов, что не может не влиять на условия образования мелких разломов и локальной трещиноватости в их пределах. Прочностные свойства горных пород в условиях сжимающих напряжений в 8–10 раз выше, чем в условиях растяжения [10]. Зоны сдвига в этом смысле занимают промежуточное положение. Согласно обобщенным литературным данным – экспериментальным и теоретическим (анализ на основе теории прочности Мора) [4, 13], величина угла скалывания возрастает с увеличением всестороннего давления, а с ростом всестороннего давления увеличиваются касательные напряжения, отвечающие за прочность на диаграмме Мора для одного и того же деформируемого материала. Следовательно, имеет место прямая пропорциональность между прочностью и углом скалывания. Итак, полученные в работе вариации углов в обстановках растяжения, сдвига или сжатия, характеризующихся различными прочностными характеристиками горного массива, соответствуют известным закономерностям.

Таким образом, сопряженные трещины изначально формируются под разным углом друг к другу в разных динамических обстановках. Кроме того, при последующей деформации трещины могут претерпевать разворот от оси сжатия в сторону оси растяжения главных нормальных напряжений, поскольку добавляется незначительная пластическая составляющая даже в хрупких условиях. Разворот трещин не велик и не может являться основной причиной больших значений угла между ними, он только немного увеличивает уже образованный угол.

Ситуация с разрывами более низкого порядка (мелкие **разломы** R-t-n-типов) сложнее, так как анализируется угол не прямо между ними, а между системами трещин, отражающих их положение (рис. 106). Следует это учитывать при перенесении выводов по трещинам на более крупные разрывы [9]. Например, разворот трещин при необходимых условиях в процессе деформации может давать некоторую ошибку в определении углов между соответствующими разломами, особенно в обстановках сжатия. К тому же сместители разломов в реальности могут иметь немного извилистую форму, и ориентировки троек-систем трещин (им соответствующие) в таком случае слегка варьируют, увеличивая разброс положений отдельных типов разрывов. Усреднение данных по многим точкам должно снизить эти расхождения. Распределение величин углов у разломов характеризуется меньшей упорядоченностью, но некоторые закономерности повторяются, как у разрывов со сбросовой и взбросовой составляющей, которые тяготеют к меньшим (сбросы) и большим (взбросы) значениям углов.

Итак, основной причиной различия углов у сопряженных разрывов в зонах разломов является ис-

ходная динамическая обстановка, обуславливающая тип деформационного поведения в условиях всестороннего давления. Возникающий в процессе развития разломных зон разворот сколов играет при этом второстепенную роль.

МЕТОДИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

На следующем этапе результаты анализа углов между системами сопряженных сколов исследованы на степень соответствия природным трещинным сетям. Эталонные парагенезисы скорректированы (рис. 11) согласно полученным данным по углам между сопряженными разломами и трещинами, а также установленной ориентировке осей напряжений (табл. 1). Таким образом, построены эталонные трафареты (эталон 2) сетей трещин для случаев левого и правого сдвига, сброса с углом падения главного разломного сместителя 40° , 50° , 60° , 75° , а также взброса с углом падения сместителя 30° , 40° , 50° , 60° , 70° .

Затем первоначальный и исправленный эталоны были сопоставлены с диаграммами, построенными ранее по массовым замерам трещиноватости на одном из участков Прибайкалья [2], расположенном в центральной части Байкальской рифтовой зоны.

Геодинамика территории современного Байкальского рифта, а в частности – центральной его части, отличается проявлением различных по типу и возрасту полей напряжений. В течение длительного периода дорифтового развития (палеозой–мезозой(?)) участок в разное время испытывал субмеридианальное, СЗ-ЮВ и субширотное сжатие, в начальной стадии зарождения проторифта (кайнозой, поздний олигоцен–ранний плиоцен) – субмеридианальное и СВ-ЮЗ сжатие, СЗ-ЮВ растяжение, а также субширотное сдвиговое поле (левый сдвиг), а в стадии активного рифтообразования (кайнозой, поздний плиоцен–голоцен), которая продолжается в настоящее время, – СЗ-ЮВ растяжение [5, 6, 18, 19].

Район полевых работ [2] находился на побережье пролива Малое море (оз. Байкал) на мысе Улирба, который пересекают несколько разломных сместителей северо-восточного простирания, выраженных в рельефе и обозначенных зонами тектонитов. Парагенетический анализ диаграмм (37 точек наблюдения) на основе первоначального эталона с применением геолого-структурных данных (смещения маркирующих слоев отсутствуют) показал, что трещинная структура изученных коренных выходов горных пород могла формироваться в зонах влияния двух разломов – сброса, (представлен одним крупным сместителем) и сдвига (представлен несколькими более мелкими сместителями). По положению тройственных парагенезисов можно обозначить приблизительные границы зон влияния этих разломов. Менее проявлены взбросовые подвижки. Зона сдвигового парагенезиса, которая яви-

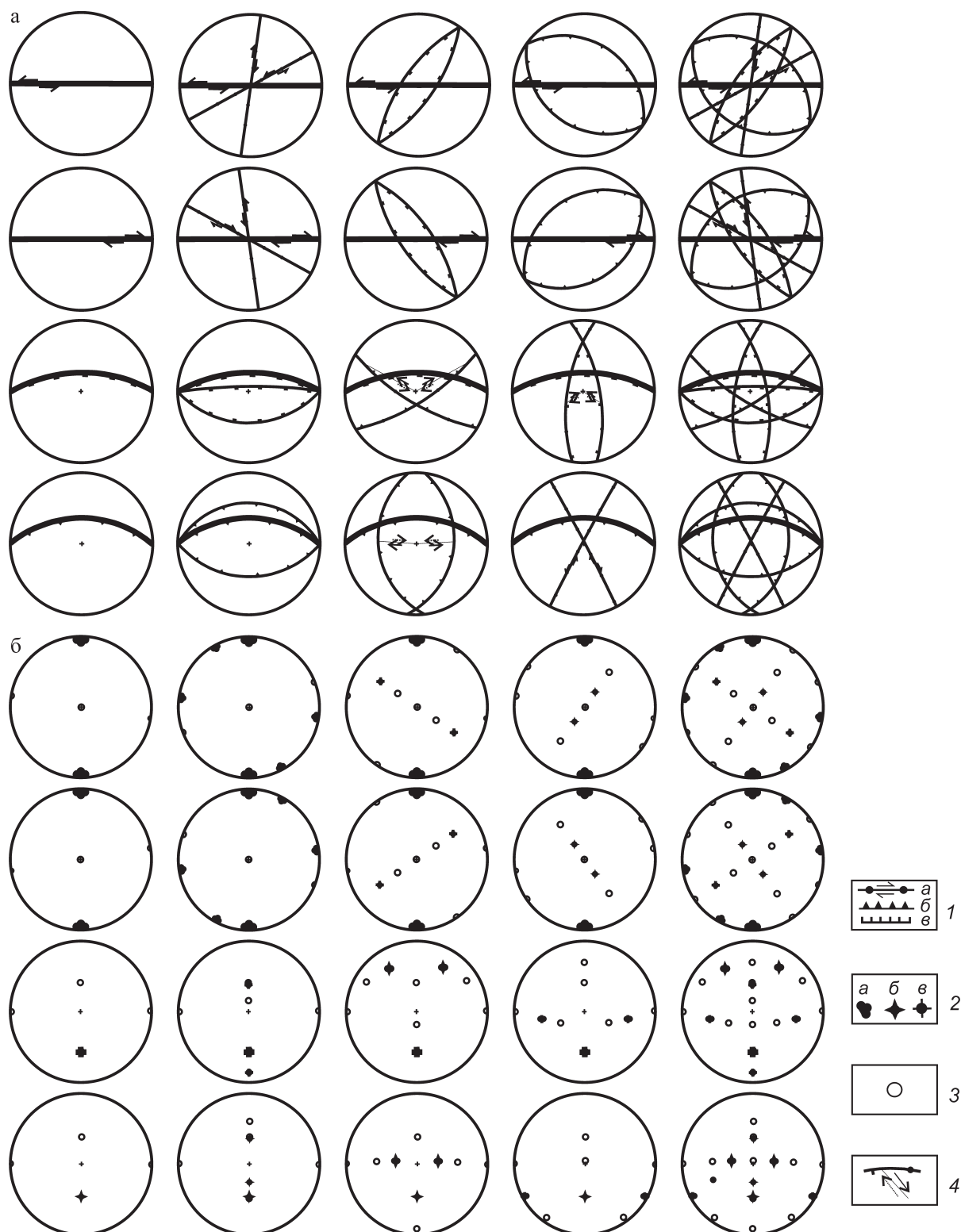


Рис. 11. Идеализированные диаграммы приразломных трещинных сетей (эталон 2), построенные по результатам проведенного в данной статье анализа (табл. 1) для случаев левого сдвига, правого сдвига, сброса под углом 60° , взброса под углом 50° .

а – главный сместитель (Y-тип) и разломы 2 порядка R-, t-, n-типов (в плоскостях); б – тройки систем трещин (в полюсах), соответствующие вышеперечисленным разломам. 1 – плоскости разломов сдвигового (а), взбросового (б), сбросового (в) типов; 2 – главные системы трещин (более крупные значки на диаграммах обозначают систему трещин, совпадающую с главным сместителем 1-го порядка); 3 – второстепенные и дополнительные системы трещин; 4 – линия и направление смещения на плоскости разлома.

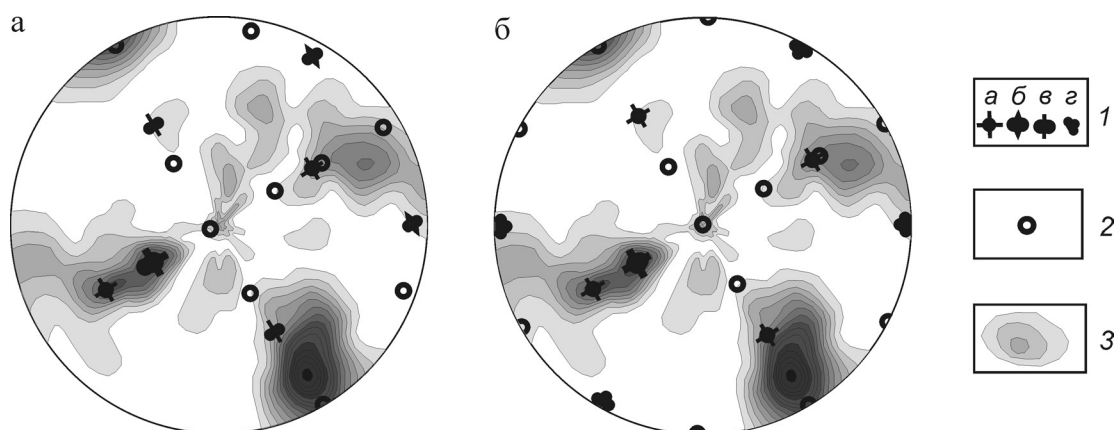


Рис. 12. Схема сравнения эталонов 1 (а) и 2 (б) на одной из диаграмм трещиноватости (сброс, угол падения сместителя – 40°).

1 – эталонные полюсы главных систем трещин в тройственных парагенезисах, соответствующие разрывам: сброса (а), взбросо-сдвига (б), сдвига-сброса (в), сдвига (г); 2 – второстепенные и дополнительные системы трещин; 3 – изолинии плотности полюсов трещин.

лась основным предметом изучения, занимает юго-восточную часть мыса, включая участок детальных исследований, где расположено подавляющее большинство точек наблюдения. Анализ штрихов скольжения на плоскостях трещин северо-восточного простирания показал, что почти во всех точках наблюдения главная система трещин характеризуется углами падения $80\text{--}90^\circ$ и преимущественно субгоризонтальными штрихами, и только в некоторых точках на более пологих системах трещин присутствуют субвертикальные штрихи. Следовательно, в ходе формирования разломной зоны на участке имели место как сдвиговые, так и сбросовые перемещения, но первые играли основную структурообразующую роль. При рассмотрении только сдвиговых решений в интерпретации диаграмм парагенезис левого сдвига найден в 15 точках из 17. Итак, установленным и наиболее значимым в плане трещинообразования следует считать левосдвиговый характер перемещения крыльев разломной зоны, обнажающейся на южной оконечности мыса.

По причине воздействия полей напряжения разного типа и возраста, участок в настоящее время имеет сложное тектоническое строение, поэтому часто на одной диаграмме (точка наблюдения с одним разломным сместителем) проявлены с разной интенсивностью различные парагенезисы (например, сдвига и сброса). Насколько интенсивно выражен на диаграмме тот или иной парагенезис, определялось параметрами, подтверждающими принадлежность систем трещин к конкретным типам разрывов в эталоне. При этом учитывались разбросы максимумов по П.Н. Николаеву [7], величины углов при оси сжатия, наличие всех систем в тройках, соответствующая ориентировка зон тектонитов, трещиноватости и расланцевания, зафиксированных на точке наблюдения, а также штрихи скольжения.

На диаграммы накладывались поочередно оба эталона (1 и 2) (рис. 12) того морфогенетического типа, который наиболее хорошо проявлен на них (с подходящим углом падения главного разломного сместителя). Отмечалось количество максимумов реальных систем трещин, которые ближе к центрам максимумов эталона. По одним системам более точное совпадение имелось у первого эталона, по другим – у второго, так как природные системы трещин имеют некоторый разброс. На эталоне 2 положение некоторых максимумов незначительно (на $1\text{--}3^\circ$) отличались от положения аналогичных систем на эталоне 1, что не позволяло выделить явного преимущества одного из эталонов в точности совпадения с диаграммами. Основное внимание уделялось ориентировкам тех систем трещин, которые дают большее различие между эталонами 1 и 2 (более $4\text{--}5^\circ$). В целом, по всем диаграммам суммарное количество совпадений систем трещин было больше с эталоном 2 (примерно на 20%). Подсчитано также количество совпадений максимумов по каждой точке наблюдения, в итоге более точные соответствия трещинных сетей с эталоном 1 проявлены на семи диаграммах, с эталоном 2 – на двадцати четырех диаграммах.

Сравнительный анализ эталонов показал, что большинство природных трещинных сетей лучше совпадают с эталоном 2, поэтому сделан вывод о положительном опыте использования обновленного идеализированного парагенезиса.

ВЫВОДЫ

1. Результаты проведенного исследования подтвердили ранее установленную зависимость значений углов у сопряженных трещин от основной динамической обстановки их формирования и показали большое влияние на величину угла локальных полей напряжений 2-го порядка. Величина уг-

ла между сопряженными трещинами возрастает в ряду обстановок: растяжение–сдвиг–сжатие, и изменяется в интервале от 75° до 94°. Подобная зависимость установлена у разрывов более крупного ранга – разломов 2-го порядка (угол изменяется в интервале от 51° до 69°). Углы между сопряженными разломами меньше, чем между сопряженными трещинами в силу разницы деформационного поведения крупных и мелких массивов. По итогам реконструкции главных нормальных напряжений, ось сжатия расположена под углом 50° к плоскости главного сместителя у сбросов, а у взбросов и сдвигов – под углом 55°.

2. Применение новых идеализированных диаграмм приразломной трещиноватости с уточненными в данной работе углами показало более точное совпадение эталонных максимумов с природными системами трещин. Рекомендуются использовать новые эталонные диаграммы в интерпретации происхождения трещинных сетей в составе комплексного изучения разломных зон земной коры.

Автор выражает глубокую благодарность д. г.-м. н. К.Ж. Семинскому за постановку темы исследований и предоставленные полевые материалы и коллегам А.С. Гладкову, А.В. Черемных, В.А. Санькову, Ю.И. Днепровскому – за предоставленные полевые материалы.

Работа выполнена при поддержке СО РАН (проекты № 6, 7) программы ОНЗ-7, гос. контракта № 02.740.11.0446.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов В.В. Структурная геология. М.: МГУ, 1986. 248 с.
2. Бурзунова Ю.П. Приразломные трещинные сети: применение новых возможностей парагенетического анализа (на одном из участков западного Прибайкалья) // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия: мат.-лы Всерос. совещ., Иркутск: ИЗКСО РАН, 2009. С. 20–22.
3. Гзовский М.В. Основные вопросы тектонофизики и тектоника Байджансайского антиклинория. Ч. 3, 4. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 544 с.
4. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М., Наука, 1975. 536 с.
5. Логачев Н.А. История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика. 2003. Т. 44, № 5. С. 391–406.
6. Мац В.Д., Уфимцев Г.Ф., Мандельбаум М.М. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и геологическая история. Новосибирск: Гео, 2001. 252 с.
7. Николаев П.Н. Методика тектонодинамического анализа. М.: Недра, 1992. 295 с.
8. Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига / С.И. Шерман, К.Ж. Семинский, С.А. Борняков и др. Новосибирск: Наука, 1991. 262 с.
9. Разломообразование в литосфере. Зоны растяжения. / С.И. Шерман К.Ж. Семинский, С.А. Борняков и др. Новосибирск: Наука, 1992. 240 с.
10. Разломообразование в литосфере. Зоны сжатия / С.И. Шерман К.Ж. Семинский, С.А. Борняков и др. Новосибирск: Наука, 1994. 263 с.
11. Расцветаев Л.М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. Ч. 2. М.: ГИН АН СССР, 1987. С. 173–235.
12. Семинский К.Ж. Соотношения углов между системами сопряженных трещин вблизи сместителей сдвигов, сбросов и надвигов // Докл. АН. 1997. Т. 354, № 3. С. 361–363.
13. Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Гео, 2003. 243 с.
14. Семинский К.Ж., Бурзунова Ю.П. Новый подход к анализу хаотической трещиноватости вблизи разломных сместителей // Геология и геофизика. 2007. Т. 48, № 3. С. 330–343.
15. Семинский К.Ж., Гладков А.С. Новый подход к изучению тектонической трещиноватости в разрывных зонах // Геология и геофизика. 1991. № 5. С. 130–140.
16. Стоянов С. Механизм формирования разрывных зон. М.: Недра, 1977. 144 с.
17. Чернышев С.Н. Трещины горных пород. М.: Наука, 1983. 240 с.
18. Delvaux D., Moyes R., Stapel G. et al. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Pt. I: Palaeozoic and Mesozoic pre-rift evolution // Tectonophysics. 1995. V. 252. P. 61–101.
19. Delvaux D., Moyes R., Stapel G. et al. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Pt. II: Cenozoic rifting // Tectonophysics. 1997. V. 282. P. 1–38.
20. Hancock P.L. Brittle microtectonics: Principles and practice // J. Struct. Geol. 1985. V. 7, № 3-4. P. 437–457.
21. International Tectonic Map of the World (Scale 1 : 15 000 000) / Chief ed. V.E. Khain. М.: Mingeo, 1984.
22. Murrell S.A.F. Natural faulting and the mechanics of brittle shear failure // J. Geol. Soc. London. 1977. P. 175–189.
23. Park R.G. Foundations of structural geology. London: Chapman & Hall, 1997. 202 p.
24. Sylvester A.G. Strike-slip faults // Geol. Soc. Am. Bull. 1988. V. 100. P. 1666–1703.
25. Wilcox R.E., Harding T.P., Seely D.R. Basic wrench tectonics // Am. Ass. Petrol. Geologist Bull. 1973. V. 57. P. 74–96.

Рецензент С.Е. Знаменский

**The angles between conjugate tectonic fracture sets
in standart and natural paragenesis
forming in different dynamic conditions**

Yu. P. Burzunova

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS

The angle values between conjugate shear fractures are specified in standart fault paragenesis based on study of fracturing in crustal fault zones with identified morphogenetic type and known dynamic conditions of their formation. Angle value varies within certain limits and mainly depends on type of stress field acting at the moment of fracture formation. It increases and varies from 75 to 94 degrees in row of extension, shear and compression dynamic conditions. Similar dependence was established also for the faults which are the more large range of the fractures. We suggest using corrected angles for studies of regularities of natural fault structure forming by means of paragenetic analysis of tectonic fracturing.

Key words: *shearing angle, conjugate fracture sets, fracture paragenesis, fault zone, stress field, type of fault.*