# РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

# ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ЗЕМНОЙ КОРЫ

На правах рукописи

Бурзунова Юлия Петровна

# СЛОЖНЫЕ СЕТИ ТРЕЩИН В РАЗЛОМНЫХ ЗОНАХ ЗЕМНОЙ КОРЫ (результаты тектонофизического анализа)

Специальность 25.00.03 – Геотектоника и геодинамика

Диссертация на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель – д. г.-м. н. К. Ж. Семинский

Иркутск 2015

# Оглавление

введен	ИЕ	3				
Глава 1.	ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМУ	1				
1.1.	Терминология	1				
	<b>1.1.1.</b> Разломы и трещины	1				
	1.1.2. Трещинные системы и сети	1				
1.2.	Классификация трещинных сетей	2				
1.3.	Параметры трещинной сети	2'				
Глава 2.	АНАЛИЗ ТРЕЩИННЫХ СЕТЕЙ ТЕКТОНИЧЕСКИ АКТИВНЫХ УЧАСТКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ОСНОВЕ					
	ОПЕНКИ ИХ СЛОЖНОСТИ	3				
2.1.	Количественная оценка степени сложности трешинной сети	3				
2.2.	Пространственная изменчивость степени сложности трешинной					
	сети	4				
2.3.	Сложность и плотность трещинных сетей в разломных зонах	4				
Глава З.	ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ СЛОЖНЫХ СЕТЕЙ ТРЕШИН					
	ВБЛИЗИ РАЗЛОМОВ РАЗНОГО ТИПА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ					
	СТРУКТУРНО-ПАРАГЕНЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА	5				
3.1.	Структурно-парагенетический анализ трешин	5				
	3.1.1. Главные принципы и основы нового подхода					
	к структурно-парагенетическому анализу	5				
	3.1.2. Применение нового структурно-парагенетического метода					
	для изучения приразломных трещинных сетей м. Улирба в	7				
32	Закономерности строения сложных трешинных сетей	,				
	<b>3.2.1</b> Углы межлу сопряженными системами трешин	7				
	<b>3.2.1.</b> 9 глы между сопряженными системами трещин-	, 9				
Глава 4.	ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ СЕТЕЙ ТРЕШИН					
	НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА «ТАЖЕРАН» (ЗАПАЛНОЕ					
	ПРИБАЙКАЛЬЕ)	9				
4.1.	Особенности геологического строения и формирования					
	Тажеранского массива сиенитов в Приольхонье					
4 2	Результаты исследования трешинных сетей.	1(				
	4.2.1. Анализ степени сложности сетей трешин	11				
	4.2.2. Структурно-парагенетический анализ сетей трещин	1				
ЗАКЛЮ	ЧЕНИЕ	13				
Currace -		1				
Список Л	итсратуры	14				

#### введение

#### Актуальность исследования.

Изучение трещин широко применяется при исследовании разломноблокового строения верхней части земной коры. Разломы являются неотъемлемыми структурными элементами геологической карты и других карт, использующихся в решении прикладных задач инженерной геологии, сейсмологии, рудной геологии. С позиций тектонофизики разлом представлен не только полосой проявления тектонитов главного сместителя, но и существенно большим по размеру объемом горных пород – разломной зоной, – в пределах которой имеют место генетически связанные с его формированием разрывные и пластические деформации, в т.ч. и разрывы самого мелкого масштабного ранга – трещины. Повышенная плотность разломов и трещин характерна для тектонически активных областей, структура которых формируется в несколько этапов, различающихся по интенсивности и типам напряженного состояния коры. Как следствие, трещиноватость в таких регионах имеет сложное строение, отличаясь от смежных территорий повышенной плотностью и многообразием разрывных систем [Чернышев, 1983; Dershowitz, Einstein, 1988].

Характерные для наиболее подвижных участков земной коры сложные трещинные сети принято называть **хаотическими** [*Рац, Чернышев, 1970*]. Они формируются в процессе последовательного наложения друг на друга сравнительно простых сетей мелких разрывов (трещинных парагенезисов) при изменении напряженного состояния в массиве горных пород [*Чернышев, 1983*]. При этом образуются блоки разнообразной формы, а трещинная сеть приобретает множество ориентировок разрывов и их систем. Другими словами, процесс образования подобных сетей в принципе является закономерным, но полученная в его результате сложная структура трещинной сети, не имеющая элементов симметрии (в отличие от других типов сетей [*Чернышев, 1983*]), приобретает хаотический облик. Такие сети трещин формируются в различных полях напряжений, что в приложении к разломным зонам характерно для отдельных этапов их развития или имеет место в генетически связанных между собой второстепенных полях напряжений одного определенного этапа. Необходимо подчеркнуть, что под термином «хаотическая сеть трещин» в данной работе понимается <u>сложная сеть, характеризующаяся множеством</u> <u>ориентировок отдельных трещин и их систем</u> (по [*Чернышев, 1983*]); термин не несет генетического смысла и не имеет отношения к теории хаоса и определению «динамического (или детерминированного) хаоса». В работе также используется понятие «степень сложности трещинной сети», характеризующее количественное разнообразие направлений трещин.

Выбор диссертационной работы обоснован темы необходимостью разработки современных способов детального исследования сложных [Чернышев, 1983]) сетей (хаотических по трещин, которые вызывают наибольшие трудности при структурной интерпретации, но имеют широкое распространение в разломных зонах земной коры. Тектонофизический анализ сложной трещиноватости, базирующийся на механизмах формирования разрывных сетей, перспективен В плане выявления закономерностей внутреннего строения и напряженного состояния разломных зон, определения их местоположения, морфогенезиса и этапности формирования. Подобная информация важна для геодинамических реконструкций и имеет практическое значение в связи с контролем разломами рудных месторождений и очагов землетрясений. Изучение степени сложности трещинных сетей может быть полезно и при гидрогеологических исследованиях для оценки степени проницаемости массивов горных пород.

Цель работы – установить закономерности строения сложных сетей тектонических трещин, а также отработать и дополнить методику их структурно-парагенетического анализа, как одного из эффективных способов картирования границ и особенностей внутренней структуры разломных зон.

# Задачи исследования.

1. Провести на примере различных регионов тектонофизический анализ сложности трещинных сетей с помощью серии количественных параметров их строения, полученных на основе обработки массовых замеров трещин.

2. Определить характер изменчивости степени сложности трещинных сетей в зависимости от типа неоднородностей в горных породах, местонахождения в разных крыльях разлома, расположения в регионах, различных по тектоническому режиму (отдельные участки Байкальского рифта и юга Сибирской платформы).

4

3. Изучить на базе применения структурно-парагенетического анализа трещиноватость в зонах разломов с установленным морфогенетическим типом и выявить особенности строения эталонных трещинных сетей, определяющиеся динамической обстановкой их формирования.

4. Применить структурно-парагенетический метод изучения сложных сетей трещин для участка «Тажеран» в Приольхонье (Западное Прибайкалье) и на основе тектонофизической интерпретации результатов установить главные закономерности формирования его разрывной структуры, реконструировать разноранговые поля напряжений и построить карту разломных зон.

Районы и объекты исследования – разломные зоны, расположенные в Прибайкалье (центральная часть Байкальского рифта и смежные территории Сибирской платформы), Средней Азии (зона сочленения Памира и Южного Тянь-Шаня) и Индокитае (межплитная граница Реки Красной).

Главный предмет исследования – сложные сети приразломных трещин, которые, правило, образуют различное как количество направлений, отличающихся ПО интенсивности проявления В породном массиве И преимущественно не имеющих видимых признаков смещений.

# Фактический материал, методы исследования и личный вклад автора.

В работе использованы структурно-геологические материалы, основу которых составляли массовые замеры трещиноватости. Автором собраны данные на 192 станциях наблюдения (около 18 тыс. измеренных ориентировок трещин, структурно-геологическое описание коренных выходов) на разных участках Прибайкалья в течение полевых сезонов 2008-11 гг. Основная часть использованных в работе массовых замеров трещиноватости, а также радонометрические измерения предоставлены сотрудниками лаборатории тектонофизики Института земной коры СО РАН, которым автор выражает глубокую благодарность. Автором произведена полная обработка И тектонофизическая интерпретация всего фактического материала – 724 трещинные сети (от 50 до 110 трещин в каждой). Главным способом анализа являлся новый структурно-парагенетический подход на основе сравнения природных и идеализированных (эталонных) трещинных сетей [Семинский, 1994, 2003, 2005; Семинский, Бурзунова 2007; Семинский, Черемных, 2011], в методику которого автором внесены полезные дополнения.

#### Защищаемые положения:

1. Трещинные сети в горных породах тектонически активных регионов по сложности строения делятся на две большие группы – хаотические и системные, причем первые существенно преобладают по распространенности, а степень их сложности повышается в районах с многоэтапной историей перемещений по разломам. Достоверной оценкой степени сложности разрывной сети является средняя интенсивность максимума на диаграмме трещиноватости (I<sub>cp</sub>), которая у хаотической сети не превышает 5 % (при количестве замеров близком к ста).

2. Сети трещин вблизи сместителей сбросов, сдвигов и взбросов (надвигов) отличаются величиной угла между системами сопряженных сколов, а также их наборами, образующимися в зонах разломов под действием второстепенных полей напряжений. Корректировка углов между сколами в эталонных парагенезисах трещин, используемых в ходе структурно-парагенетического анализа, повышает достоверность выявления разломных зон при их картировании.

3. Разломная структура участка «Тажеран» в Приольхонье, согласно данным структурно-парагенетического анализа сложных сетей трещин, сформировалась под воздействием пяти региональных полей тектонических напряжений разного возраста, наиболее интенсивными из которых были палеозойское СЗ-ЮВ сжатие и позднекайнозойское растяжение в том же направлении.

#### Новизна исследования.

Впервые проведена комплексная оценка степени сложности трещинных сетей некоторых тектонически активных регионов на основе применения серии параметров, интегрально отражающих количество, интенсивность проявления и взаимную ориентировку систем трещин в породном массиве: энтропия трещиноватости, средняя интенсивность максимума и величина самого интенсивного максимума на диаграмме трещиноватости, общее количество и количество значимых максимумов. При сравнительно простом определении на основе данных массового замера трещиноватости они характеризуют степень нарушенности горных пород вследствие действия разнотипных полей напряжений.

Показано, что достоверным и сравнительно простым в определении трещинной сети показателем степени сложности является средняя интенсивность максимума (I<sub>cp</sub>) на структурной диаграмме трещиноватости. При количестве замеров трещин, близком к ста, хаотические сети характеризуются величиной I<sub>ср</sub> менее 5 %. Степень сложности сетей трещин повышается в районах с большей тектонической активностью. Выявлено, что висячие крылья высокой раздробленностью, разломов отличаются не только но И повышенными величинами степени сложности трещинных сетей, что обусловлено спецификой второстепенных полей напряжений. На примере разнотипных горных пород Приольхонья на количественной основе показано влияние структурно-вещественных неоднородностей на степень сложности сетей трещин.

Автором при детальном исследовании большего по количеству статистического материала подтверждено существование зависимости величины угла между сопряженными системами трещин от динамической обстановки их формирования. Установлены величины этих углов для систем, составляющих основу разрывных сетей в зонах сбросов, взбросов и сдвигов, что повышает эффективность исследования их внутреннего строения в рамках структурно-парагенетического анализа. Кроме того, показано подобие в строении трещинных сетей вблизи взбросов и сдвигов (в отличие от сбросов), обусловленное сходным набором разрывов 2-го порядка и аналогичными величинами угла между восстановленной осью максимального напряжения сжатия и сместителем.

Впервые проведено детальное исследование трещиноватости участка локализации Тажеранского сиенитового массива в Приольхонье (применен метод структурно-парагенетического анализа), В результате которого восстановлены региональные поля напряжений, принадлежащие разным этапам тектонического развития района. На базе тектонофизического подхода предложен параметров, повышающих достоверность определения ряд относительного возраста И масштабного уровня региональных полей напряжений. Составлена карта разломных зон участка, одни из которых представляют зоны повышенной трещиноватости, а другие – зоны тектонитов, располагающихся в основном по периферии интрузива.

7

# Практическая значимость.

Количественная оценка степени сложности (I<sub>cp</sub>) трещинных сетей может быть рекомендована в качестве одной из составляющих геолого-структурного анализа для регионов с многоэтапной историей развития. Предложенные в работе диаграммы-трафареты с уточненными углами между системами разрывов позволяют более однозначно интерпретировать сети трещин в составе комплексного изучения разломных зон земной коры.

Структурно-парагенетический метод, усиленный анализом степени сложности повсеместно распространенных сетей трещин, может быть рекомендован к применению в рамках геологической съемки для картирования разломных зон и особенностей их строения. Даже в слабо обнаженных регионах этот метод позволяет на основе исследования небольших участков получить информацию о положении и типе разломных зон, ориентировке разрывов 2-го порядка, а также реконструировать локальные и региональные стресс-тензоры с предварительной оценкой относительной последовательности их воздействия.

# Апробация работы.

Результаты работ докладывались на Всероссийских молодежных конференциях по строению литосферы и геодинамике (Иркутск, 2005; 2009; 2013), Всероссийских совещаниях по геодинамике, разломообразованию и сейсмичности литосферы (Иркутск, 2005; 2009; 2012), Всероссийском научном симпозиуме по кайнозойскому рифтогенезу (Иркутск, 2010), Молодежной тектонофизической школе-семинаре (Москва, 2013).

Количество опубликованных автором или при его участии научных работ – 19, из них 9 – в рецензируемых журналах, рекомендованных перечнем ВАК Минобрнауки РФ.

# Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложена на 151 странице, содержит 55 рисунков и 11 таблиц. Список литературы включает 124 наименования.

Автор выражает глубокую признательность д.г.-м.н. К.Ж.Семинскому за постановку темы исследований и общее научное руководство, а также за предоставленные полевые материалы. Кроме того, автор искренне благодарен д.г.-м.н., профессору С.И.Шерману, д.г.-м.н. А.М.Мазукабзову и к.г.-м.н.

В.А.Санькову за ценные советы и замечания по сути проведенного исследования; к.г.-м.н. А.В.Черемных, к.г.-м.н. А.С.Гладкову и к.г.-м.н. О.В.Луниной – за конструктивное обсуждение работы и предоставленные полевые материалы; к.г.-м.н. А.А.Боброву и аспиранту А.С.Черемных – за действенную помощь в проведении экспедиционных работ в течение нескольких полевых сезонов и за предоставленные полевые материалы; А.А.Тарасовой, Р.М.Зарипову, аспирантам старшим лаборантам А.А.Решиловой, З.В.Яковенко – за помощь в сборе полевых материалов, к.г.м.н. А.В.Андрееву, к.г.-м.н. М.А.Даниловой – за дружескую и моральную поддержку. Искренняя благодарность адресуется сотрудникам лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН – за ценные советы, обсуждения и критику, за поддержку и помощь в подготовке работы, а также сотрудникам кафедры динамической геологии МГУ за ценные советы и замечания к работе.

## Глава 1

#### ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМУ

Трещиноватость, распространенная повсеместно, является важной характеристикой породных массивов, исследование которой позволяет, в частности, получить информацию о строении и формировании более крупных разрывов в земной коре – разломов. Это, в свою очередь, открывает возможность решения ключевых вопросов тектонического развития регионов, имеющих практическое и теоретическое значение [Чернышев, 1983]. Основные задачи анализа трещин в комплексе полевых тектонофизических работ заключаются в том, чтобы охарактеризовать региональные и локальные поля тектонических напряжений на различных этапах деформации породного массива, определить деформационные режимы, кинематические характеристики перемещений блоков, типы разломов и др. [Гинтов, 2005 и др.]. Методики анализа трещин доступны для быстрого освоения и не требуют специального оборудования. При сборе фактического материала используются инструменты стандартных структурно-геологических наблюдений. Трещины распространены практически во всех горных породах, кроме легко сыпучих и проведения разномасштабных размываемых, что дает возможность профильных и площадных исследований.

#### 1.1. Терминология

#### 1.1.1. Разломы и трещины

Среди разрывных нарушений земной коры выделяют разломы и трещины, которые различаются по масштабу, особенностям строения и закономерностям Обстановки формирования. развития этих широко распространенных разрывных структур, а также задачи их изучения отличаются в каждом конкретном случае. Это является основанием для рассмотрения в начале особенностей рассматриваемых диссертации трактовки терминов известными разработками области исследователями, своими В разрывообразования.

Согласно В.А.Невскому [1979], разломы представлены крупными разрывными нарушениями сложного строения с длительной многоэтапной историей развития, тогда как трещины – это самые многочисленные разрывы в породах, характеризующиеся размерами от микроскопически малых до десятков и первых сотен метров, а также имеющих достаточно простое внутреннее строение и короткую историю развития. Несмотря на отмеченные различия, по данным признакам затруднительно провести отчетливую грань между крупными трещинами и мелкими разломами; она в известной мере условна.

По мнению И.П.Кушнарева и других исследователей разломы отличаются от трещин, прежде всего, присутствием зон брекчированных и милонитизированных пород в их полостях [*Кушнарев, 1977*]. При этом тип тектонита указывает на глубинный уровень его формирования [*Sibson, 1977; Шерман, 1977, Метаморфизм ..., 2001*]. Трещины характеризуются обычно отчетливыми, поддающимися измерению, смещениями рассекаемых ими геологических границ (контактов тел или других разрывов) [*Кушнарев, 1977*].

Многие, особенно зарубежные, исследователи под разломами понимают разноранговые разрывы со смещениями, тогда как у трещин их либо нет, либо они имеют незначительную величину [*Материалы по тектонической терминологии, 1964; Hancock, 1985*]. Грань между разломом и трещиной в этом случае условна, так как возможность распознать факт смещения зависит от его размера и методов наблюдения разной точности [*Геологический словарь, 2012*].

отечественной тектонофизики C позиций различия между **ДВУМЯ** рассматриваемыми разрывов имеют не качественный, видами а количественный характер [Гзовский, 1963; 1975; Семинский и др., 2005]: трещины имеют размеры до 100 м и величину смещения до 100 мм; более разрывные нарушения классифицируются крупные как разломы. По терминологии Международного общества механики горных пород (International Society for Rock Mechanics), в качестве трещин принято описывать только структуры небольшого размера, наблюдаемые в обнажении горных пород, т.е. мезотектонического масштаба («макротрещины» по [Рац, Чернышев, 1970], «трещинные мезоструктуры» по [Konn, 2004]), при этом сюда не включают микротрещины, которые определяются рассматриваются И отдельно [Геологический словарь, 2012].

11

При выделении трещин или разломов в данной работе были учтены главные из вышеназванных критериев. Так, подавляющее большинство задокументированных при полевом исследовании трещин имело видимый размер от 0,05 до 10-15 м. Лишь в редких случаях по ним фиксировались смещения с незначительной амплитудой. Наличие тектонитов у разрыва, как признак перемещающихся относительно друг друга блоков, позволяло определять его как разломный сместитель.

Важной характеристикой трещины в свете проведенного исследования являлся ее тип, который обусловлен механизмом формирования разрыва. По способу образования и морфологическим признакам трещины в горных породах делятся на два типа – трещины скола (или скалывания) и трещины отрыва («shear fracture, shear joint» и «extension fracture, joint» по [Pluijm, Marshak, 2004; Jaeger at. al., 2007; и др.]). Трещины скалывания образуются под действием максимальных касательных напряжений, а отрыва – под действием максимальных нормальных растягивающих напряжений; при этом напряжения должны превышать пределы прочности горных пород. соответственно, на скалывание или отрыв [Гзовский, 1963; Невский, 1979; Михайлов, 1984; Белоусов, 1986 и др.].

Выделяются следующие особенности морфологического проявления трещин скалывания [Кушнарев, 1977]. Они характеризуются гладкими стенками, значительной протяженностью по простиранию и падению (десятки метров), иногда имеют тонкую пленку глинки трения и по ним изредка можно заметить небольшие смещения контактов тел. В последнем случае на их поверхностях могут быть заметны штрихи и борозды скольжения. Такая морфология обусловлена скалывающей (срезающей) деформацией пород. Мелкие трещины скалывания (до первых метров) прямолинейны И представлены правильными геометрическими плоскостями [Невский, 1979]. Исключения составляют трещины скалывания с первичной кривизной [Гзовский, 1956]: сглаженные дуговидные тектонические поверхности раздела горных пород, которые обычно развиваются в местах чередования слоев с резко различной вязкостью. По трещинам скалывания всегда происходят продольные смещения, но в подавляющем большинстве случаев их обнаружить не удается из-за отсутствия маркеров [Невский, 1979].

Трещины отрыва обладают [Кушнарев, 1977; Невский, 1979] неровными краями, извилистыми и шероховатыми поверхностями, иногда занозистыми и раковистыми, с множеством мелких и крупных угловатых выступов и углублений, вследствие чего замер элементов залегания отрывных трещин Отрывы нередко встречает затруднения. обычно имеют небольшую протяженность (до первых десятков метров); продольных смещений пересекаемых ими контактов тел не наблюдается.

Зияние у обоих типов трещин обычно не велико и измеряется долями миллиметра, хотя оно может быть увеличено под действием последующих тектонических и экзогенных процессов. Расположение трещин двух разных типов в пространстве также имеет особенности и отличия. Трещины отрыва распределяются в горных породах более или менее равномерно, расчленяя их на сравнительно равновеликие блоки. Трещины скола размещаются весьма неравномерно, сгущаясь в удаленных друг от друга деформационных зонах разного масштаба. Как правило, это зоны действия скалывающих напряжений разломного и неразломного типа (зоны скалывания), возникающие между двумя смещающимися друг относительно друга смежными блоками земной коры Гинтов, 2005; Семинский, Черемных, 2011]. Основываясь на особенностях морфологии отрывов и сколов, а также закономерностях их размещения в породном массиве, можно достаточно уверенно различать эти типы трещин непосредственно в обнажениях [Невский, 1979; Пэк и др., 1982], что и использовалось нами при полевых исследованиях.

Следует отметить, что в литературе существует понятие о «гибридных» трещинах, которые считаются переходным звеном между трещинами скола и отрыва [*Hancock, 1985; Ramsey and Chester, 2004*]. Такие трещины, следуя диаграмме Мора, формируются при дополнительном растяжении перпендикулярно плоскости разрыва [*Семинский, 2003*], а скалывание является транстенсивным. «Гибридные» трещины специально не рассматриваются в данной работе, поскольку она посвящена трещинам в разломных зонах, которые в подавляющем большинстве возникают при транспрессивном скалывании [*Sibson, 1998*].

#### 1.1.2. Трещинные системы и сети

Совокупность трещин массиве горных пород называют В Трещины трещиноватостью. обычно образуют «системы» группы, обладающие общими особенностями расположения трещин [Белоусов, 1986]. Обычно в одну систему объединяют параллельные трещины [Рац, Чернышев, 1970; Невский, 1979; Чернышев, 1983; и др.], однако под системой может пониматься и иное сочетание трещин. Например, по Г.Клоосу на куполе интрузивных пород трещины составляют две системы – систему радиальных и систему концентрических трещин.

В современной зарубежной литературе (например [Twiss, Moores, 1992; Hancock, 2000; Pluijm, Marshak, 2004; Mandl, 2005; и др.]) для группы параллельных трещин принято понятие «joint set»; термином «joint spectrum» называют совокупность трещин с вариациями ориентировок не более 45°. Прямолинейные трещины с гладкой поверхностью, входящие в состав группы «set» или «spectrum» С примерно одинаковым шагом, называются систематическими – «systematic joints». Они могут прослеживаться на большие расстояния. В противоположность им, несистематические трещины - «nonsystematic joints» – часто имеют неровную изогнутую шероховатую поверхность и непостоянный шаг. Они являются приповерхностными разрывами, которые формируются в процессе выветривания и эрозии и часто ограничиваются по простиранию более древними систематическими трещинами. По-видимому, первым (systematic) в отечественной терминологии соответствуют сколовые тектонические, а вторым (non-systematic) – отрывные экзогенные трещины (генетические типы трещин рассматриваются ниже в п.1.2).

Две или более групп параллельных трещин (joint sets) составляют «system» (комплекс, совокупность, система – англ.) [Hancock, 2000; Pluijm, Marshak, 2004; и др.]. Это понятие соответствует отечественному определению «трещинная сеть», которое является ключевым в данном исследовании и далее будет рассмотрено более подробно. По данным ISRM (International Society for Rock Mechanics) одной из геометрических характеристик трещиноватости в горных породах является число систем трещин (number of joint sets). При этом выделяются: во-первых, цельные массивы с редкими случайными (random)

трещинами, во-вторых, объемы горных пород. разбитые одной или несколькими системами трещин (set) с наличием или отсутствием случайных (random) трещин, и, в-третьих, в значительной степени раздробленная (crushed) трещинами порода. В работе [Dershowitz, Einstein, 1988] рассматриваются различные модели совокупностей трещин (joint system models), в которых расположение трещин может быть упорядоченным (regular deterministic), как например, параллельные трещины в системах, или стохастическим (stochastic – случайный, вероятностный). При этом подчеркивается, что обычно в природе встречается стохастическое взаимоположение трещин.

Представленные особенности зарубежной выше терминологии учитывались на отдельных этапах проведенной работы. Однако базовыми для нее являлись определения системы трещин и сети трещин, принятые в отечественной геологии. Система трещин – это множество трещин, примерно параллельных друг другу. Понятие является геометрическим и не содержит генетического смысла [Рац, Чернышев, 1970]. Параллельность трещин может реализоваться на большой площади (например, трещины в осадочном чехле платформы) либо в сравнительно локальном объеме породного массива. Множество мелких разрывов, совместно развитых в той или иной части массива, образует пространственную сеть трещин, которая состоит из нескольких (как правило, не менее трех) систем, а также хаотически ориентированных трещин, не группирующихся в системы [Рац, Чернышев, 1970]. Трещиноватость – более общий термин, означающий совокупность трещин.

Фактическим материалом для структурного анализа трещинных сетей является статистический массовый замер элементов залегания трещин, который в нашем случае характеризовался определенной спецификой.

(или площадь) обнажения Интервал горных на пород, котором производится массовый замер трещин, зависит от задач исследования и варьирует от 0,5 до 100 м и более [Чернышев, 1983; Schulz, Evans, 2000; и др.]. Используемый В данной работе структурно-парагенетический анализ трещиноватости (см. главы 3 И 4) предполагает измерение подряд определенного количества трещин без пропусков. Как следствие, размер площадки зависел от плотности трещин, но в большинстве случаев не превышал 10 м<sup>2</sup>.

Количество трещин в замере зависит от сложности разрывной сети и от задач исследования [*Невский, 1979; Чернышев, 1983; Михайлов, 1984*]. Оптимальным для решения задач полевой тектонофизики является 100 измерений в одной точке наблюдения [*Белоусов и др., 1997; Семинский, 2003*]. Для сравнения диаграмм предпочтительнее использовать массовые замеры с одинаковым количеством трещин.

Для каждой трещины, кроме элементов залегания, по-возможности, фиксировались следующие геолого-структурные особенности: тип, ранг, вторичная минерализация на стенках трещины, следы смещений. Для сети трещин оценивались геометрические параметры (расстояние между трещинами в системе, плотность трещин и др.). Массовый замер проводился отдельно для каждого однородного по структурно-вещественным свойствам участка скального массива (крыло складки, разломная зона на фоне слабонарушенных пород, участки с различной текстурой в интрузивных или метаморфических образованиях, отдельный слой в осадочных толщах и т.д.) [*Невский, 1979; Чернышев, 1983; Billi at al., 2003; Agosta et al., 2010; Caine et al., 2010; Guerriero et al., 2010; и др.*].

Приемы структурного анализа трещиноватости широко известны из методической литературы. В основу исследования, представленного в диссертации, положен анализ, главным образом, круговых структурных диаграмм (стереограмм), наглядно отражающих строение трещинных сетей в локальном объеме горных пород [Невский, 1979; Чернышев, 1983; Михайлов, 1984; Николя, 1992; Ragan, 2009; и др.]. Круговая диаграмма строится по данным массового замера элементов залегания трещин (в идеале – 100 штук). Для графического отображения ориентировок трещин использованы сферические координаты (рис. 1 А, Б), точнее – их проекция с верхней полусферы на плоскость. В связи с тем, что в работе большое значение придается угловым соотношениям между трещинными системами, для построения круговых диаграмм используется стереографическая равноугольная проекция Вульфа (рис. 1).

Любая разрывная плоскость на диаграмме отображается в виде проекции ее плоскости (рис. 1 В). При большом количестве изучаемых плоскостей (статистический анализ сети трещин) используют не саму плоскость, а нормаль к плоскости, которая на диаграмме представляется в виде точки (рис. 1 Г). Эта точка – проекция нормали, или **полюс** плоскости, – однозначно определяет пространственное положение плоскости трещины, т.к. характеризуется двумя координатами – азимутом и углом падения [*Родыгин*, 1981].

Полюсы трещин на отдельных участках диаграммы образуют сгущения (рис. 1 Д), свидетельствующие о существовании в коренном выходе системы трещин. Для большей наглядности и удобства сравнения трещинных сетей производится дальнейшая обработка точечного рисунка, целью которой является получение диаграммы в изолиниях относительной плотности полюсов трещин (рис. 1 Е). Уровни изолиний и интенсивность максимумов рассчитываются в процентах от общего количества трещин; при этом обычно [*Михайлов, 1984*] используется величина окна палетки равная 10° (1% площади круговой диаграммы). Так, при массовом замере в количестве 100 штук одна изолиния соответствует одной трещине при шаге между изолиниями 1%.



Рис. 1. Построение круговых структурных диаграмм трещиноватости.

А, Б – полярная (нормальная) азимутальная сетка координат в равноугольной проекции Вульфа с шагом по азимутам и углам 10° (А) и 30° (Б);

В, Г – изображение пространственной

ориентировки трещины в виде плоскости (В) и полюса плоскости (Г) в проекции верхней полусферы;

Д, Е – круговая диаграмма трещиноватости на основе массового замера трещин (100 штук) виде точечной в диаграммы полюсов (Д) и в виде диаграммы изолиний относительной плотности полюсов (шаг между уровнями изолиний 1%) (Е).

Для повышения информативности (в зависимости от задач исследования трещинных сетей) на диаграмму наносят ориентировку слоистости или сланцеватости пород, плоскость контакта пород, положение разломных сместителей (зон дробления), зон повышенной трещиноватости, данные о признаках смещений по трещинам (штрихи, борозды, смещения маркирующих слоев) и другую информацию [*Невский, 1979; Расцветаев, 1987; Billi, 2003; Agosta et.al., 2010; и мн. др.*].

Построение диаграмм трещиноватости автоматизировано в различных программных комплексах. Одним из них является «Структура», использованная исследованиях. Данная В наших программа создана математиками А.А.Бибичевым и Е.А.Левиной на основе методических приёмов, выбранных для автоматизации сотрудниками лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН А.И.Мирошниченко, К.Ж.Семинский) (А.С.Гладков, на основе опыта многолетних исследований трещиноватости. Программа позволяет менять величину окна палетки при расчете плотностей и уровней изолиний, что дает возможность получать более или менее детальный рисунок изолиний с разным количеством максимумов для одной и той же трещинной сети. Следует отметить, что для сравнения диаграмм между собой необходимо использовать одинаковую величину окна, которая в данном исследовании равнялась 10°.

Использование круговых диаграмм позволяет единообразно подойти к выделению и характеристике систем трещин, образующих разрывную сеть в массиве горных пород. Каждая совокупность примерно одноориентированных разрывов характеризуется частотой расположения трещин, степенью рассеяния по простиранию и углам падения, масштабом и особенностям размещения в породах [Невский, 1979]. На круговых диаграммах системы выделяются как максимумы в местах сгущения изолиний на фоне их разрежения или отсутствия. Центр максимума фиксирует среднее значение угла и азимута падения трещин данной системы. Размер площадки (площадь максимума), занимаемой на диаграмме рассматриваемой системой, характеризует степень изменчивости ориентировки составляющих ее трещин. Величина максимума (значение плотности) отражает количество измеренных трещин данной системы. В диссертации используется понятие – «интенсивность максимума», означающее количество трещин в системе, выраженное в процентах к общему В.А.Невский [1979] количеству. выделяет «концентрированные» И «рассеянные» системы трещин. На круговых диаграммах первые из них выделяются наличием максимума с достаточно высокой интенсивностью и весьма небольшим (15-20°) разбросом полюсов трещин по простиранию и

падению. Для вторых характерен большой по площади «расплывчатый» максимум с разбросом полюсов трещин до 40-50° и более.

Таким образом, система характеризуется интенсивностью (плотностью) и разбросом полюсов трещин. В связи с тем, что система – это, прежде всего, множество трещин, при их выделении на диаграмме ключевую роль играет величина интенсивности максимума. Например, низкая интенсивность максимума при большом или малом разбросе полюсов (рис. 2 а, б) не позволяет определить этот максимум как систему; скорее, он относится к фоновой трещиноватости. С другой стороны, высокая интенсивность даже при существенном разбросе дает «рассеянную» систему (рис. 2 в), тогда как при малом разбросе полюсов трещин (рис. 2 г) – это однозначно четкая «концентрированная» система.



Рис. 2. Интенсивность и разброс максимума на круговой диаграмме, рассматриваемые в отношении правомерности выделения системы трещин. Стрелкой указано положение максимумов, которые выбраны для примера: максимумы с низкой (а, б) и высокой (в, г) интенсивностью, с большим (а, в) и малым (б, г) разбросом.

В литературе и практических исследованиях используются разные подходы к выделению систем трещин на диаграммах. Один из них – это простой визуальный отбор максимумов С наибольшей плотностью (интенсивностью). Кроме способы, того, существуют основанные на количественной основе.

А.Ф.Грачев и И.Б.Морозов [Грачев, Морозов, 1993] исходят из того, что ориентировка трещин в системе должна подчиняться нормальному закону распределению Мизеса или Фишера. Следовательно, выделяются только те системы, которые в процессе проверки с помощью компьютерной программы соответствуют данному распределению. Л.Д.Кноринг [Кноринг, 1969] считает системой такую совокупность трещин, направления которых в данной точке в момент их образования принадлежат одному и тому же распределению

Фишера. Однако при этом автор полагает, что последующие пластические деформации могут привести к нарушению ориентационного распределения трещин, принадлежащих одной системе, или к изменению положения сети трещин в целом. Нарушается в первую очередь симметричный характер распределения.

Т.П.Белоусов с соавторами [Белоусов и др., 1997] при выделении систем этапе обработки удаляет из выборки фоновые трещин на первом (внесистемные) трещины со значением полюсной плотности, не превышающим некоторого заданного уровня. На втором этапе обработки (подтверждающий анализ данных) уточняется число систем трещин, и устанавливаются их количественные характеристики методами автоматической классификации (кластерный анализ). В итоге остаются наибольшие по плотности максимумы. С другой стороны, В.А.Невский [Невский, 1979], основываясь на опыте изучения разрывной структуры рудных месторождений, считал, что при решении вопросов происхождения трещин не следует удалять начальные изолинии низкой плотности, так как при этом искажается общий рисунок диаграммы, что существенно снижает ее информативность.

Таким образом, выбор способа выделения систем трещин зависит от целей и задач исследований. В данной работе, ориентированной на исследование сложных сетей трещин, К происхождения анализу привлекались все максимумы, выделяющиеся на диаграмме при охарактеризованных выше параметрах ее построения и особенностях массового замера трещиноватости. Исключение составляли максимумы с самой низкой интенсивностью (1-2 трещины), т.к. согласно базовой статистике замера (100 трещин), они не могут считаться системой. Следует отметить, что в ряде случаев эти незначимые «системы» были представлены крупной трещиной или плоскостью со штрихами скольжения, что учитывалось в ходе дальнейшего структурного анализа. Также принимается вероятность существования на месте незначимого максимума полноценной системы трещин – в другом масштабе изучения (большее количество трещин в замере при большей площадке для массового замера).

## 1.2. Классификация трещинных сетей

Трещины можно классифицировать по геометрии и по генезису. Данная работа посвящена особенностям строения приразломных трещинных сетей, для понимания которых существенное значение имеют закономерности ориентировки и взаимного сочетания мелких разрывов. В связи с этим вначале необходимо рассмотреть **геометрические классификации** трещин и их совокупностей. В них, кроме параметров отдельных трещин (форма, размер, положение в пространстве), может учитываться взаимное расположение разрывов (углы между системами трещин, расстояния между параллельными трещинами) и степень расчленения массива на отдельные блоки сетью трещин [*Чернышев, 1983*].

Простую геометрическую классификацию трещинных сетей предложили М.В.Рац и С.Н.Чернышев на основе анализа эмпирических данных [*Рац, Чернышев, 1970*]. Все многообразие сетей трещин сводится в основном к трем типам (рис. 3):

а) системные сети, образованные n (n = 1, 2, 3 ...) различно ориентированными системами трещин; б) хаотические сети, когда трещины не группируются в системы или, что в сущности то же самое, число систем очень велико (n>10); в) полигональные в плане сети, когда все трещины параллельны одной линии (обычно вертикальной) и не группируются в четкие системы, образуя в перпендикулярной к этой линии плоскости (обычно горизонтальной) характерные замкнутые многоугольники с числом сторон в среднем более четырех.



Рис. 3. Основные типы сетей трещин по М.В.Рацу [Рац, Чернышев, 1970]. Пояснение в тексте.

Кроме приведенных «чистых» типов, по мнению авторов классификации, в породном массиве встречаются смешанные сети, когда на решетку одного из описанных типов накладывается сеть другого типа. При этом наиболее характерным случаем является сочетание хаотической и системной сетей, когда

системы выделяются на фоне хаоса. Системная и хаотическая сети могут также накладываться на любой из типов полигональной сети. Перечисленные структурные ситуации не исчерпывают всего многообразия встречающихся в природе сетей трещин, однако другие их типы встречаются относительно редко и могут считаться экзотическими (например, сфероидальная и ветвистая сети) [*Рац, Чернышев, 1970*].

Впоследствии С.Н.Чернышев [Чернышев, 1983] рассмотрел трещинные сети в зависимости от типа напряженного состояния массиве горных пород, являющегося причиной формирования трещиноватости. На основе анализа соотношений главных нормальных напряжений выделено четыре типа сетей трещин (табл. 1), которые частично совпадают с теми, которые были выявлены ранее эмпирическим путем (рис. 3). Систематизируя сети, С.Н.Чернышев обращает внимание на условия образования трещин, которые в общем виде В выражаются тензором напряжений. тектонофизике наиболее распространенной характеристикой напряженного состояния является ориентация осей главных напряжений, действующих В трех взаимно перпендикулярных направлениях [Шерман, Днепровский, 1989; и др.]. В массиве горных пород реализуются все три возможных сочетания величин главных нормальных напряжений: 1) три главных нормальных напряжения равны ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ); 2) равны два из трех главных нормальных напряжений  $(\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3)$  или  $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ ; 3) три главных нормальных напряжения различны  $(\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3).$ 

С.Н.Чернышеву [Чернышев, 1983]. Согласно выявленные типы напряженного состояния при условии их постоянства в пространстве и времени реализуются в трех типах сравнительно простых по строению сетей трещин: сфероидальная, полигональная и системная. Смену напряжений в локальном объеме пород с течением времени автор классификации выделяет как четвертый тип напряженного состояния, который формирует сложную сеть трещин, характерную для наиболее подвижных частей земной коры. Это хаотическая асимметричная сеть трещин, образующаяся при последовательном наложении генераций разновозрастных трещин (без залечивания). Каждая из четырех сетей имеет свой тип отдельности и принципиально отличную группу симметрии (табл. 1). В процессе формирования трещинных сетей IV типа при нескольких наложениях полей напряжений общих элементов симметрии не

остается, блоки становятся асимметричными (IV в табл. 1). Опыт инженерногеологических изысканий свидетельствует о доминировании в породном массиве на поверхности и в подземных горных выработках системных и хаотических сетей трещин [*Чернышев*, 1983].

Таблица 1

Наименование сети трещин и графическое изображение	Схематическое изображение сети трещин на круговых диаграммах трещиноватости	Напряженное состояние массива, создающее трещины	Группа симметрии	Описание трещин, сети трещин, создаваемых сетью отдельностей	Место реализации
Сфероидальная І		$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$	Бесконечное количество элементов симметрии бесконечного порядка	Трещины отрыва в форме концентрически вложенных сфер и радиально-секущих плоскостей, образуют сфероидальную, шаровую, скорлуповатую отдельности.	в шаровых лавах, в зоне выветривания, при взрыве
Полигональная, осесимметричная II ГГГГ Станая		a) $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ b) $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$	Конечное количество элементов симметрии бесконечного порядка и бесконечное количество элементов симметрии конечного порядка	В условиях растяжения – трещины отрыва (а), в условиях сжатия (б) – трещины скола по образующей цилиндра (конуса), осью которого служит ось σ <sub>1</sub> .	В трещинах столбчатой отдельности эффузивов, трещинах усыхания осадочных слоев, в черепаховой структуре на соляных куполах (при растяжении), в зажатых слоях складчатых структур (при сжатии)
Системная, равноугольная Ш	+	$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$	Конечное количество элементов симметрии конечного порядка	Трещины отрыва и скола, ограничивающие блоки призматической формы	на складках продольного сжатия, у разрывов, в зоне эрозионной разгрузки и др. Наиболее распространенная сеть в массивах.
Хаотическая, асимметричная IV		Смена различных напряженных состояний во времени	Элементы симметрии отсутствуют	Сеть образуется при последовательном наложении генераций трещин. Блоки в массиве асимметричны.	В зонах дробления, у разрывов, у контакта интрузивов, в зоне выветривания, т.е. в наиболее подвижных частях земной коры

Основные типы трещинных сетей (по [Чернышев, 1983] с изм.)

Сеть трещин, как закономерно организованная совокупность мелких разрывов в заданном объеме горных пород, обычно включает трещины

различного генезиса. Большинство из них развивается унаследованно, причем причиной активизации может быть воздействие сил существенно разной природы. Существует серия генетических классификаций трещин, главные из которых приведены в монографии С.Н.Чернышева [Чернышев, 1983]. Наиболее часто в этих классификациях встречается разделение сетей трещин на первичные (петрогенетические), тектонические и экзогенные. Некоторые авторы [Невский, 1979, Чернышев, 1983] дополнительно выделяют техногенные сети, связанные с деятельностью человека. Иногда трещины делят на тектонические и нетектонические [Корсаков, 2009], при этом тектонические особенности. присущие преимущественно имеют трещинам скола (протяженные и выдержанные по ориентировке, прямолинейные, охватывают несколько пачек слоев, образуют системы трещин), а нетектонические – трещинам отрыва (извилистые, часто не выходят за пределы слоя).

В.А.Невский предложил наиболее полную классификацию трещин в горных породах (табл. 2) с развернутым описанием генетических типов [*Невский*, 1979]. Несмотря на их разнообразие, большинство генетических Таблица 2

А. Трещины широко распространенные	Б. Трещины локально		
(тип трещин, где встречаются)	распространенные		
	(тип трещин)		
1. Тектонические	1. Диапировых куполов		
(в любой геологической обстановке)	2. Гравитационные		
2. Обусловленные механической	3. Ydapa		
активностью внедряющихся	4. Связанные со взрывными работами		
магматических расплавов	5. Локального изменения объема горных		
(в интрузивах, вулкано-плутонах, вулканах	пород		
центрального типа, кальдерах проседания,	6. <b>Выветривания</b>		
куполах, штоках, крутопадающих	7. Разгрузки		
трещинных интрузивах, трубках взрыва,	8. Сложного сочетания контракции и		
над питающими каналами лакколитов и	тектонических деформаций		
лополитов)	9. Пластовых срывов		
3. Термической контракции			
(в магматических породах)			
4. Литогенетические – контракции за			
счет обезвоживания			
(в недислоцированных осадочных толщах			
платформенного чехла и чехла срединных			
массивов)			

Группировка трещин горных пород по степени их распространенности и генезису (по [*Невский*, 1979])

типов имеют локальное распространение и встречаются только в специфической геологической обстановке (табл. 2 Б). В верхней части земной коры наиболее широко развиты тектонические трещины и первичные – трещины термической контракции, трещины, связанные с механической активностью внедряющейся магмы, а также литогенетические (контракции за счет обезвоживания) (табл. 2 А).

Анализ широко распространенных генетических типов трещин по В.А.Невскому (табл. 2 А) с позиций геометрической классификации С.Н.Чернышева (табл. 1), а также с учетом типа формирования и морфологии трещин (скалывание, отрыв), позволяет выделить 4 основные группы.

1. Тектонические трещины. Возникают под действием напряжений, вызванных формированием структурных элементов земной коры при тектонических процессах. В большинстве они являются трещинами скалывания, реже отрывами (1-3 % по [*Невский, 1979*]). Образуют в основном системные и хаотические сети [*Рац, Чернышев, 1970*].

2. Трещины, обусловленные механической активностью внедряющихся магматических расплавов. Кольцевые, радиальные, дуговидные и прямолинейные трещины скалывания и отрыва [*Невский*, 1979]. Образуют в основном сфероидальные сети.

3. Трещины термической контракции. Трещины отрыва, образуют столбчатую, плитчатую и шаровую отдельности [*Невский*, 1979]. Чаще всего это полигональные трещинные сети [*Рац, Чернышев, 1970*].

4. Литогенетические трещины. Трещины отрыва, образуют в основном столбчатую отдельность [*Невский*, 1979]. Обычно это полигональные сети [*Рац*, *Чернышев*, 1970].

Некоторые исследователи [Кноринг, 1969; и др.] считают, что подавляющее большинство трещин имеет тектоническую природу, тогда как трещины нетектонического происхождения заметного влияния на общий характер трещиноватости не оказывают. Поскольку в данной работе предметом исследования являются трещинные сети в разломных зонах, а участки исследований расположены в тектонически активных районах (складчатые пояса), то согласно [Невский, 1979; Чернышев, 1983; и др.], изучаемая нами трещиноватость является преимущественно <u>тектонической</u> (по генезису), <u>сколовой</u> (по типу формирования), <u>системной</u> или <u>хаотической</u> (по геометрии

сети). Первичная трещиноватость в виде полигональных и сфероидальных сетей, отчетливо выделяющихся в породном массиве, на участках исследований практически не встречалась. Исходя из этого, в диссертации рассматриваются два типа трещинных сетей тектонического происхождения: простая системная сеть и сложная (хаотическая) по [Чернышев, 1983]) сеть (рис. 4).



Рис. 4. Примеры системной (А) и хаотической (Б) трещинной сети (Прибайкалье): 1 – изображение трещиноватости на фотографии коренного выхода горных пород; 2 – схемы сетей трещин; 3 – диаграммы трещиноватости в изолиниях относительной плотности полюсов трещин (100 замеров; стереографическая равноугольная проекция Вульфа; верхняя полусфера; величина окна 10°).

Сложные (внешне хаотические) сети трещин формируются в процессе последовательного наложения друг на друга сравнительно простых системных сетей (трещинных парагенезисов) мелких разрывов при изменении напряженного состояния в массиве горных пород [Чернышев, 1983]. При этом образуются асимметричные блоки, а трещинная сеть становится сложной и внешне неупорядоченной по ориентации разрывов. Другими словами, формирование подобных сетей является закономерным, но полученная в результате сложная структура трещинной сети, не имеющая элементов симметрии (в отличие от других типов сетей [Чернышев, 1983]), приобретает

хаотический облик. Для системной сети характерны визуально четкие обособленные друг от друга системы с достаточно высокой плотностью на относительно «чистом» фоне (рис. 4 А). Хаотическая сеть состоит из единичных трещин и множества различно ориентированных систем с разной интенсивностью (рис. 4 Б).

М.В.Рац полагает, что наибольшее практическое значение имеют системные сети, и в инженерно-геологическом приложении бесполезно рассматривать массивы, разбитые более чем 3-5 системами трещин: при большом числе систем массив может считаться квазиизотропным, а сеть трещин – хаотической [*Рац, Чернышев, 1970*]. Это в существенной степени справедливо для оценки физико-механических свойств геологической среды. В то же время, необходимо отметить, что сложные по строению хаотические сети в тектонически активных регионах имеют повсеместное распространение. Как следствие, их исследование во многих случаях является единственно возможным путем для реконструкции полей палеонапряжений, картировании разломных зон и определении кинематики блоковых перемещений.

Для исследования системных сетей, имеющих достаточно простое строение, существуют различные методики, описанные в работах М.В.Гзовского, Л.Д.Кноринга, М.В.Раца, С.Н.Чернышева, В.Н.Даниловича и других авторов. В настоящее время существует необходимость детального исследования сложно построенных и трудно интерпретируемых хаотических сетей, особенно в разломных зонах, что имеет и научный, и практический интерес в связи с инженерной деятельностью человека.

## 1.3. Параметры трещинной сети

В отличие от системной трещиноватости, рассмотренной в публикациях многих исследователей, оценка состояния сложных сетей трещин встречает определенные трудности, начиная с момента выделения таких сетей. Как правило, для каждой точки наблюдений это осуществляется по внешнему облику сети в полевых условиях или по круговой структурной диаграмме, т.е. визуально и в известной мере субъективно. Это связано с тем, что понятия «сложная (хаотическая)» и «системная» сеть [Чернышев, 1983] имеют некоторую неоднозначность по причине отсутствия эффективного численного

показателя сложности сети трещин. В то же время такой показатель может быть предложен, поскольку, вследствие наложения разновозрастных генераций мелких разрывов, сети тектонических трещин составляют последовательный ряд от наиболее системной (3-4-х четких системы) до самой сложной хаотической (множество систем и единичных трещин) сети. Для выполнения поставленной задачи необходимо в первую очередь рассмотреть известные параметры трещинных сетей, которые в той или иной степени отражают степень их сложности.

Как известно, трещинные сети различают по числу и ориентации систем, по плотности трещин и другим количественным параметрам. Анализ литературных источников показал, что все они могут быть разделены на две группы, каждая из которых отражает сходные характеристики строения трещинной сети.

<u>1-я группа параметров</u> характеризует частоту (плотность) расположения трещин.

**Плотность (частота) трещиноватости** (в зарубежной литературе – density, frequency) – количество трещин на единицу длины, площади, объема. Плотность трещиноватости замеряется без учета ориентации трещин.

Густота трещин той или иной системы (в зарубежной литературе – spacing [Dershowitz, Einstein, 1988 и др.]) – параметр, по сути, подобный предыдущему. Определяется как расстояние между соседними трещинами в одной системе [*Рац, Чернышев, 1970*]. В некоторых случаях, в зависимости от задач исследования, отдельно замеряются расстояния между мелкими, средними и крупными трещинами основных систем в обнажении.

**Объемная плотность трещиноватости** – рассчитывается как сумма значений густоты каждой системы трещин [*Лунина и др., 2002, Семинский и др., 2005*]. Данный параметр является упрощенной характеристикой трещинной сети, т.к. не учитывает единичные трещины, а также системы с малой плотностью, которые трудно выделить визуально.

**Интенсивность трещиноватости** (intensity, по [*Wheeler*, *Dixon*, 1980]) – площадь трещин на единицу объема породного массива.

Взвешенная плотность трещиноватости (weighted joint density, по [*Palmstrom*, 1996]) – характеризует степень трещиноватости и размерность блоков в массиве горных пород. Расчет данного параметра основан на

измерении угла между каждой трещиной и дневной поверхностью или осью буровой колонки в скважине.

**Интенсивность проявления тройки систем трещин** на диаграмме трещиноватости [*Семинский, Гладков, 1991, Семинский, 2003*]. Данный параметр используется как мера степени деформации, которую претерпел локальный объем горной породы в одном поле напряжений, реализовавшемся в образовании парагенезиса из трех систем примерно перпендикулярных трещин. Показатель вычисляется по формуле:

 $I = i_{\text{Makc}}(i_{\text{cp}} + i_{\text{Muh}})/(i_{\text{Makc}} + i_{\text{cp}} + i_{\text{Muh}})$  (1);

где і – величины максимумов (в процентах) на диаграмме трещиноватости, соответствующие первой (наиболее интенсивной), второй (средней по интенсивности) и третьей (наименее интенсивной) системам трещин, образующих тройку. Величина I позволяет в отличие от простого среднего арифметического, учитывать при анализе вес каждого из максимумов, что необходимо при сравнении троек друг с другом. Закономерные по большому счету изменения интенсивности проявления троек систем трещин в пределах многих изученных разломных зон свидетельствуют о возможности успешного использования данного параметра в качестве меры деформации природного массива. Для исследования полей напряжений данный показатель более информативен, чем простая плотность трещиноватости, так как рассчитывается по трещинам, образовавшимся в одном поле напряжений.

Удельная трещиноватость [*Королев, 1951*] – параметр, определяющийся путем подсчета количества трещин на проложении 1 метра по трем координатам; в итоге берется средняя цифра.

Насыщенность горных пород мелкими трещинами - оценка размера минимального блока пород, ограниченного трещинами [*Невский*, 1979]. Достоинство показателя – простота подсчета при полевых работах.

<u>2-я группа параметров</u> характеризует разнообразие в ориентировках (азимут падения и угол падения) трещин, принадлежащих одной сети.

**Число систем трещин** (или показатель системности трещиноватости) – параметр, определяющийся простым подсчетом количества систем трещин в обнажении горных пород или максимумов полюсов трещин на круговой диаграмме.

Фрактальный показатель [Лунина и др., 2002] – параметр, который позволяет одновременно учитывать количество, длину трещин, их взаимное расположение в пространстве. Служит дополнительным информативным показателем для описания сложности геометрии трещинной сети, а также оценки степени нарушенности горных пород. Фактическим материалом для фрактального анализа служат фотографии коренных выходов, которые переводятся цифровую форму. Анализ выполняется В С помощью компьютерной программы [Программа..., 2014], а его результаты используется для районирования изучаемой территории на участки, характеризующиеся аналогичной степенью сложности трещинной сети, показателем которой является фрактальная размерность (фрактальный показатель). Достоинство анализа состоит в возможности описывать одним числом как простые, так и сложные структуры, что значительно упрощает их сравнение.

**Информационная энтропия трещиноватости** горных пород (Н) может применяться как показатель неопределенности при выделении систем трещин [Шеннон, 1963]. Информационная энтропия – это мера вероятности осуществления какого-либо макроскопического состояния или показатель неопределенности опыта, который может иметь разные исходы [*БСЭ, Т. 30*]. Эта количественная мера используется во многих областях знаний. В работе [*Черемных, 2007*] применяется формула (2) для вычисления информационной энтропии или энтропии Шеннона [*Шеннон, 1963*], как суммы вероятностей попадания какого-либо количества трещин в каждый і-й интервал массива данных:

$$H = -\sum_{i=1}^{n} p_i \log_2 p_i$$
 (2);

где  $p_i = \frac{n_i}{n_{obut}}$ ;  $n_i$  – количество трещин в і-й ячейке,  $n_{obut}$  – общее количество

трещин в замере.

Для расчета параметра Н используются элементы залегания трещин – азимут и угол падения; для достоверной статистики достаточно 100 трещин. Массив данных разбивается на интервалы, кратные по азимутам и углам падения (окно или ячейка подсчета). Для интервала, равного 18°, азимутальный круг (360°) разбивается на 20, а угловой сектор (90°) – на 5 ячеек. Таким образом, всего анализируется 100 интервалов группирования данных, что соответствует количеству замеров трещин. По формуле (2) с помощью компьютерной программы «Hu&Df 1.0» [Программа..., 2014] рассчитывается вероятность попадания трещин в каждый интервал и конечное суммарное значение информационной энтропии.

Энтропия равна нулю, если все трещины имеют одинаковую (либо очень близкую – в пределах одного окна) ориентировку; В ЭТОМ случае неопределенность в информации отсутствует. Энтропия имеет максимальное значение (равное 4,6 при количестве трещин равном ста), если все трещины равномерно распределены по азимутам и углам падения (одна трещина в одной ячейке), то есть трещиноватость является сложной (хаотической по [Чернышев, 1983]). Следует отметить, что имеется возможность варьирования величиной и, соответственно, количеством интервалов группирования [Черемных, 2007]. кратность интервала 90°. Данному условию Основное условие – это удовлетворяет величина интервала равная 15° (144 ячейки), 18° (100 ячеек), 22,5° (64 ячейки), 30° (36 ячеек), 45° (16 ячеек). Величина энтропии в значительной степени зависит от количества интервалов, изменение которого обосновано только при различии в количестве анализируемых трещин. Для сравнительного анализа значений информационной энтропии трещиноватости разных породных массивов расчет должен производиться единообразно: равное количество трещин и одинаковое количество интервалов группирования. Итак, информационная энтропия трещиноватости позволяет охарактеризовать горные породы по степени их нарушенности разноориентированными трещинами.

Практически все представленные выше параметры были в большей или меньшей степени использованы для характеристики трещинных сетей в разломных зонах земной коры, являвшихся объектами данного исследования. В то же время наибольший интерес для анализа структуры системных и сложных сетей представляют параметры II-й группы. Показатель хаотических системности (число систем трещин) в определенной мере характеризует сложность разрывной сети: чем больше систем, тем более хаотическая сеть. Он не учитывает плотность трещин и их пространственные взаимоположения, но Фрактальный анализ прост В определении. использует оцифрованные фотографии трещиноватости, по сути – только видимую в определенной плоскости часть трещинной сети, что ограничивает использование данной определения сложности объемно-пространственной методики ДЛЯ как

характеристики трещиноватости. Значение энтропии на основе данных об элементах залегания каждой трещины в сети дает возможность более точно в количественном отношении определить сложность трещинной сети (хаотическая или системная) в конкретном объеме горных пород.

Таким образом, из рассмотренных параметров информационная энтропия (в основном), а также показатель системности будут использоваться в дальнейшей работе. Они рассчитываются на основе статистического массового замера трещин, который дает наиболее полную информацию о пространственной структуре трещинной сети.

# Глава 2

# АНАЛИЗ ТРЕЩИННЫХ СЕТЕЙ ТЕКТОНИЧЕСКИ АКТИВНЫХ УЧАСТКОВ ЗЕМНОЙ КОРЫ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ИХ СЛОЖНОСТИ

В главе представлены результаты изучения пространственной изменчивости сложности сетей трещин на разных по тектоническому строению земной коры, в том числе – в пределах разломных участках 30H. Первоочередной задачей выбор сравнительный являлся И анализ количественных показателей степени сложности сетей мелких разрывов. Для этого вначале были исследованы структурные диаграммы и определены расчетные параметры, отражающие сложность трещинных сетей. Затем анализировалась зависимость сложности сетей от их принадлежности к регионам с разной степенью тектонической активности.

#### 2.1. Количественная оценка степени сложности трещинной сети

Переход от визуальной субъективной оценки строения трещинных сетей к количественным критериям степени их сложности осуществлялся путем статистического исследования различных параметров с итоговым выбором наиболее оптимального из них.

Для исследования особенностей строения природных сетей трещин создана база данных геолого-структурных наблюдений в тектонически активных и смежных с ними участках земной коры, где доминирует тектоническая трещиноватость – Средняя Азия (Памир и Тянь-Шань), Вьетнам, Саяны, Прибайкалье (рис. 5). Массовые замеры трещин были проведены в разное время сотрудниками Института земной коры СО РАН С.И.Шерманом, К.Ж.Семинским, В.А.Саньковым, А.С.Гладковым, О.В.Луниной, А.В.Черемных, А.С.Черемных и автором. Для исключения ошибок при сопоставлении замеров с разным числом замеров из базы данных отобрано 650 точек наблюдения с количеством измеренных трещин в пределах 100±10 штук. По всем точкам построены круговые диаграммы трещиноватости В соответствии с методическими приемами, реализованными в программном

комплексе «Структура» (см. глава 1). Для каждой из них определялись значения параметров, характеризующих сложность строения трещинной сети: информационная энтропия и общее количество максимумов (показатель системности). Кроме того, были подсчитаны средняя интенсивность максимума на диаграмме, величина самого интенсивного максимума, количество значимых максимумов и другие параметры. Особенности каждого из параметров, рассчитанных с помощью программ «Hu&Df 1.0» [Программа..., 2014] и «Структура» [Семинский, 2003], рассмотрены ниже.



Рис. 5. Местоположение участков исследования трещиноватости, представленное на схеме разломов Евразии [*International..., 1984*].

1 – разломы установленные (а) и предполагаемые (б); 2 – участки массовых наблюдений за трещиноватостью и разломами.

1. <u>Информационная энтропия трещиноватости</u> **Н**, как количественный показатель степени неопределенности (или упорядоченности) при выделении систем трещин, рассчитана на основе массового замера и 100 интервалов группирования данных (формула (2), глава 1).

2. <u>Средняя интенсивность максимума на диаграмме</u>  $I_{cp}$  представляет среднее арифметическое значений плотности выделяющихся максимумов. В расчет не входят величины максимумов, которые ограничены одной изолинией,

что соответствует замеру одной трещины. Такие «слабые» максимумы в значительной мере влияют на результат подсчета, причем не исключена вероятность их случайной регистрации (ошибка при замере или при записи в полевой дневник). Значение средней интенсивности максимума повышается при увеличении интенсивности максимумов и уменьшении общего количества систем.

3. <u>Величина самого интенсивного максимума на диаграмме</u>  $I_{макс}$  в первом приближении имеет большие значения в простых трещинных сетях и меньшие – в визуально сложных сетях трещин. В частных случаях (система трещин по слоистости или сланцеватости) данный параметр может значительно превышать интенсивность остальных максимумов на диаграмме.

4. <u>Количество значимых максимумов (с интенсивностью выше средней) на</u> <u>диаграмме</u> N<sub>3нач</sub> – величина относительная, поскольку зависит от значения средней интенсивности. Как правило, чем больше средняя плотность максимумов, тем меньше значимых систем. В целом, в системных сетях меньше значимых максимумов, чем в хаотических сетях.

5. <u>Общее количество максимумов</u> **N**<sub>общ</sub> (или показатель системности – глава 1). В работе также использовался параметр **N**, представляющий количество максимумов без учета «слабых», ограниченных одной изолинией.

Кроме перечисленных параметров, с помощью программы «Структура» рассчитывались средняя площадь максимума на диаграмме, сумма площадей максимумов и др. В ходе последующей обработки выяснилась очень слабая связь этих параметров со сложностью трещинных сетей, поэтому их анализ далее не приводится.

Энтропия трещиноватости по определению должна наиболее полно учитывать пространственную ориентировку систем и отдельных трещин. Данное положение подтвердилось в ходе представленной ниже визуальной оценки диаграмм: по сравнению с другими параметрами значение энтропии наиболее полно отражает уровень сложности структурного рисунка.

Визуальный анализ диаграмм состоял в экспертной оценке характера и степени сложности рисунка изолиний, причем для получения наиболее достоверного результата он проводился двумя способами. В первом случае производилась раздельная оценка интенсивности систем и «фоновой» трещиноватости. Каждая из двух характеристик оценивалась от 0 до 2 баллов с

крайними вариантами: 0 – хаотическая сеть, 2 – системная сеть. Второй способ состоял в общей оценке диаграммы по пятибалльной шкале: 1 балл (хаотическая сеть) – на рисунке полюсов трещин имеется практически сплошное равномерное поле точек, не группирующихся в системы; 2 балла – на фоне хаотической сети присутствуют группы из нескольких трещин, которые можно считать не очень значимыми системами; 3 балла – системы слабые или средние по интенсивности, но занимающие большую площадь на фоне незначительного количества хаотически расположенных трещин; 4 балла – интенсивные системы на фоне незначительного количества хаотических трещин; 5 баллов (системная сеть) – четкие системы при практически полном отсутствии фоновой трещиноватости. В целом, главным критерием для более системной сети являются четкие сконцентрированные максимумы на относительно «чистом» фоне. Опыт исследований включал проведение нескольких повторных оценок и в итоге показал, что результаты применения двух способов визуального анализа сопоставимы друг с другом.

Далее для базы массовых замеров из 650 точек наблюдения были проанализированы корреляционные связи между экспертными оценками (в баллах) и величинами параметров трещинных сетей, перечисленными выше и характеризующими в той или иной мере степень их сложности. Как видно из табл. 3, наибольшая корреляция выявлена с тремя параметрами: энтропия, величина самой интенсивной системы на диаграмме и средняя интенсивность максимума, причем для параметра Н получен наиболее высокий коэффициент корреляции. Таким образом, визуальная оценка структурного рисунка диаграмм подтвердила, что наиболее точным показателем уровня сложности сети трещин является значение энтропии.

Таблица 3

Параметр трешищой сети	Коэффициент	
параметр трещинной сети	корреляции	
Энтропия (Н)	-0,65	
Величина самого интенсивного максимума (Імакс)	0,63	
Средняя интенсивность максимума (I <sub>ср</sub> )	0,61	
Количество максимумов (без учета «слабых» максимумов) (N)	-0,52	
Количество значимых максимумов (N <sub>знач</sub> )	-0,51	
Общее количество максимумов (N <sub>общ</sub> )	-0,49	

Коэффициенты корреляции значений визуальной оценки диаграмм с параметрами трещинных сетей
На следующем этапе исследования были построены графики изменения значений перечисленных выше параметров трещинных сетей, а также их общие тренды (рис. 6 Б, В, Г, Д, Е) относительно графика убывания значений энтропии (рис. 6 А) по всем точкам наблюдения из базы данных.



Рис. 6. Графики (и линии тренда) значений средней интенсивности максимума (Б), величины самого интенсивного максимума (В), количества максимумов (без учета «слабых») общего количества максимумов (Γ), (Д), количества значимых максимумов (Е) на трещиноватости, диаграмме построенные относительно графика убывания величин энтропии (А).

По оси Х – точки наблюдения (650 шт.), по оси Y – параметры трещинных сетей: энтропия (А), средняя интенсивность максимума на диаграмме В % (Б), величина самого интенсивного максимума в % (В), количество максимумов (без учета «слабых») (Г), общее количество максимумов количество (Д), значимых максимумов (Е).

Цифры над графиком: 1 – хаотические сети, 2 – хаотические и системные сети, 3 – системные сети.

Характер изменчивости графика энтропии (рис. 6 А), судя по трендам, примерно повторяется на графиках средней интенсивности максимума (рис. 6

Б) и самого интенсивного максимума (рис. 6 В). Это подтверждается имеющейся корреляцией между этими параметрами и энтропией (в табл. 4, соответственно, коэффициенты 0,79 и 0,74).

Таблица 4

Коэффициенты корреляции энтропии с другими параметрами трещинной

сети
------

	Коэффициент	
Параметр трещинной сети	корреляции с	
	параметром	
	энтропия (Н)	
Средняя интенсивность максимума (Іср)	-0,79	
Величина самого интенсивного максимума (Імакс)	-0,74	
Количество максимумов (без учета «слабых»	0.65	
максимумов) (N)	0,05	
Общее количество максимумов (N <sub>общ</sub> )	0,59	
Количество значимых максимумов (N <sub>знач</sub> )	0,54	

В правой части трех первых графиков (рис. 6 А, Б, В) наблюдается характерный переходный интервал, где значения параметров Н, I<sub>ср</sub> и I<sub>макс</sub> резко изменяются. Диаграммы трещинных сетей с правой стороны от данного интервала имеют системный, а слева – сложный, визуально хаотичный рисунок. Внутри переходного интервала встречаются и хаотические, и системные рисунки. В левой нижней части графика убывания значений энтропии (рис. 6 А) наблюдается еще один перегиб, отделяющий самые высокие значения энтропии от остальных. Рисунок этих диаграмм еще более хаотичный: основные системы трещин практически не выделяются.

В табл. 5 представлены усредненные граничные значения интервалов, выделенных для каждого из анализируемых параметров в соответствии с рис. 6. Следует отметить, что усредненное значение параметра «общее количество максимумов» для сложных (хаотических) трещинных сетей равно 10 и выше (табл. 5), что соответствует определению «хаотических сетей» М.В.Раца [*Рац, Чернышев, 1970*] (глава 1). Если при полевом исследовании обнажения визуально отчетливо выделяются 3 (и менее) значимых системы, то данная сеть является системной (рис. 6 Е и табл. 5).

Таким образом, в соответствии с результатами анализа массовых замеров трещин установлено, что энтропия, средняя интенсивность максимума и величина самого интенсивного максимума на круговой диаграмме наиболее

полно на количественном уровне отражают степень сложности трещинной сети.

Таблица 5

	Средние (трендовые) значения параметров по				
Параметры	интервалам				
трещинной сети	Хаотические	Переходнь	Системные		
	сети	ОТ	до	сети	
Энтропия (Н)	3,4 и более	3,4	3,15	3,15 и менее	
Средняя интенсивность	5	5	6 1	64 и болоо	
максимума (I <sub>cp</sub> ), %	З и менее	5	0,4	0,4 и облее	
Величина самого					
интенсивного максимума	11 и менее	11	16	16 и более	
(I <sub>макс</sub> ), %					
Количество максимумов	10 и более	0.5	8	8 H MAIIAA	
(без «слабых») (N)	ТОИООЛСС	),5	0	о и менее	
Общее количество	12 и более	12	10	10 и мацаа	
максимумов (N <sub>общ</sub> ), шт.	12 H 00JICC	12	10	то и менее	
Количество значимых	Л и более	35	28	3 и менее	
максимумов (N <sub>знач</sub> ), шт.	+ n 00100	5,5	2,0	Э и менее	

Граничные значения параметров хаотических и системных сетей

Методика сравнения трещинных сетей по значению энтропии требует одинакового числа трещин во всех массовых замерах, равного количеству ячеек группирования для расчета параметра Н (144, 100, 64, 36 или 16), однако на практике это условие по объективным причинам не всегда выполняется. В небольшом обнажении горных пород с малой плотностью трещиноватости необходимое количество трещин (в идеале – 100 штук) не может быть измерено. В противоположность этому, средняя интенсивность максимума (I<sub>cp</sub>) на диаграмме, рассчитанная в процентах, позволяет сравнивать точки с разным количеством измеренных трещин. Согласно приобретенному опыту, при числе трещин более 80 шт. такое сопоставление является достоверным. Кроме того, параметр I<sub>ср</sub> имеет наиболее тесную корреляционную связь с энтропией (табл. 4). В связи с этим именно средняя интенсивность максимума на диаграмме анализировалась далее на предмет использования данного параметра в качестве основного для экспрессной оценки степени сложности трещинной сети. По результатам визуальной оценки (рис. 7), малые величины I<sub>ср</sub> соответствуют наличию большого количества максимумов малой интенсивности (хаотическая сеть) и наоборот, большие значения параметра отражают существование меньшего количества сравнительно интенсивных максимумов (системная сеть).



Рис. 7. Результаты количественной оценки степени сложности трещинных сетей в разных точках наблюдения: диаграммы трещиноватости и значение средней интенсивности максимума I<sub>cp</sub> (в %) (примеры взяты из общей базы данных).

Согласно графику распределения величин средней интенсивности максимума в порядке возрастания (рис. 8), при значении  $I_{cp}$  менее 5,0 сеть является сложной хаотической, если параметр  $I_{cp}$  более 6,4 – сеть системная. В переходном интервале значений (от 5,0 до 6,4) для повышения точности оценки можно дополнительно включить в анализ значение самого интенсивного максимума (если оно равно или более 14 – сеть может считаться системной). Таким образом, степень сложности трещинной сети может быть успешно определена по параметру средней интенсивности максимума на диаграмме. Применение данного подхода к оценке трещинных сетей изучаемой базы данных показало, что большинство из них (88%) относится к хаотическим. Следовательно, эти сети имеют широкое развитие в тектонически активных регионах, поскольку именно в их пределах расположена большая часть точек наблюдения.



Проведенное исследование, базирующееся на материалах предшественников и результатах собственного анализа, показало, что при отсутствии необходимости в проведении массового замера существует возможность приближенного определения принадлежности трещинной сети к одной из групп (хаотические или системные), а также экспрессной оценки степени сложности при сравнении трещинных сетей из разных точек наблюдения. Для этого можно определить общее количество ориентировок трещин в обнажении горных пород (если более 10 – сеть хаотическая) и число наиболее отчетливо выраженных значимых систем (если 4 системы и более – сеть хаотическая). Для сопоставления трещиноватости в разных точках наблюдения достаточно оценить три параметра: общее количество систем, количество значимых систем и плотность наиболее интенсивной системы (количество трещин на единицу длины). Это позволяет выявить участки относительно большей или меньшей степени сложности трещинных сетей, отражающей деформирование массивов горных пород в одном (системные сети) или нескольких (хаотические сети) полях напряжений.

## 2.2. Пространственная изменчивость степени сложности трещинной сети

Величина средней интенсивности максимума на диаграмме отражает степень сложности трещинной сети в виде характерного структурного рисунка на сферической диаграмме. В отличие от параметров густоты трещин (например, плотности трещин на единицу длины или площади), которые связаны, прежде всего, с интенсивностью деформаций [Кноринг, 1969], степень сложности тектонической трещиноватости в большей мере характеризует этапность (стадийность) геологического развития породного массива в период хрупкого деформирования. Так, причиной образования более сложной (хаотической) сети может быть существование нескольких типов разновозрастных полей напряжения. Менее сложная сеть (системная) чаще всего обусловлена воздействием одного поля напряжений.

Рассмотрим изменчивость степени сложности сетей трещин на участках земной коры с разным уровнем тектонической активности – на территории Сибирской платформы, а также в зоне ее примыкания к Саяно-Байкальскому складчатому поясу, где в позднекайнозойское время развивается Байкальский рифт (рис. 9, табл. 6). Анализ степени сложности проведен по материалам исследований трещиноватости на пяти профилях, отличающихся размером и



Рис. 9. Местоположение профильных участков исследования степени сложности трещинных сетей (космоснимки из программы Google Earth). Пунктиром показан краевой шов Сибирской платформы.

Таблица 6

# Общая характеристика профилей изучения сложности трещинных сетей в Прибайкалье

Название профиля	Местоположение профиля	Длина профи- ля	Среднее значение по профилю параметра І <sub>ср</sub>	Средне- квадр. отклонение	
Зима –	на территории Сибирской				
Иркутск	платформы, проходит вдоль	240 км	4,7	0,98	
TT	трассы Московского тракта				
Иркутск –	на юге Сибирской платформы, от				
Большая	плотины І ЭС в г. Иркутске вдоль	60 км	3,8	0,85	
Речка	иркутского водохранилища, не				
Тургеневка –	р области соцпенения Сибирской				
Крестовский	платформы и Саяно-Байкальского				
repetitionenini	складчатого пояса от с Тургеневка	70 км	5.3	1,24	
	(платформа) до побережья оз.	/0100	0,0		
	Байкал (рифтовая зона)				
Улирба —	в центральной части Байкальской				
MPC	рифтовой зоны на территории				
	Приольхонского плато,	9 км	4,7	1,13	
	перпендикулярно осевой линии				
	Байкальского рифта				
Улан-Хада	вдоль полуострова Улан-Хада в				
(HO3 – CB)	районе пролива Ольхонские	3 км	4.6	0.7	
	ворота, параллельно осевой линии	5 100	1,0	0,7	
	рифтовой зоны	ł			

детальностью изучения: г. Зима – г. Иркутск, г. Иркутск – пос. Большая речка, с. Тургеневка – мыс Крестовский, мыс Улирба – пос. МРС, полуостров Улан-Хада (ориентация профиля – ЮЗ-СВ) в проливе Малое море (рис. 9). Все точки наблюдения, входящие в состав профилей, имеются в общей базе данных. Самый протяженный профиль – «Зима-Иркутск» (примерно 240 км), самый короткий – вдоль полуострова «Улан-Хада» (3 км). Все профили, кроме последнего, расположены вкрест простирания Байкальской рифтовой зоны.

В точках наблюдения анализировался параметр – средняя интенсивность максимума на круговой диаграмме трещиноватости (I<sub>cp</sub>). По профилям графики изменения данного параметра и линейный тренд, построены отражающий изменение сложности сетей вдоль профиля (рис. 10). Несмотря на разный масштаб исследований и значительные вариации I<sub>ср</sub> по каждому профилю (обусловленные комплексом факторов), можно проследить изменение его значений, используя усредненный линейный тренд. По всем профилям наблюдается тенденция уменьшения величины I<sub>ср</sub> (то есть увеличения сложности трещинных сетей) по направлению к оси Байкальского рифта. При этом для продольного к оси рифта профиля «Улан-Хада» в среднем сохраняется постоянство значений I<sub>ср</sub>. На профиле «Тургеневка-Крестовский» наблюдаются самые большие вариации значений I<sub>ср</sub> (сложности трещинных сетей), а также максимальная амплитуда тренда I<sub>ср</sub>. Это обусловлено тем, что профиль расположен в районе взаимодействия различных по своему строению крупных блоков земной коры, с одной стороны, относящихся к мощной и стабильной Сибирской платформе, а с другой, – представленных более нарушенными (в т.ч. и в кайнозое) породами Саяно-Байкальского складчатого пояса. На профиле «Улирба-МРС», целиком расположенном в пределах рифтовой зоны, степень сложности трещинных сетей повышается по направлению от периферийной части рифта к его оси.

Проведенное исследование показало, что сложность трещинных сетей характеризуется закономерной пространственной изменчивостью. В целом, на профилях разной протяженности и с разной детальностью исследования трещиноватости сложность повышается по направлению от платформы к рифту, а в его пределах – от краевой части к осевой. Более хаотические трещинные сети формируются в пределах тектонически активных участков, для

которых характерно существование нескольких этапов деформации, имевших место в истории взаимодействия двух крупных блоков земной коры.



Рис. 10. Изменение степени сложности трещинных сетей по профилям, расположенным на участках с разной степенью тектонической активности.

По оси X – расстояние (в км); по оси Y – средняя интенсивность максимума I<sub>cp</sub> (в %), характеризующая сложность сетей трещин.

1 – график и линейный тренд параметра I<sub>cp</sub>; 2 – границы интервала (5-6,4%), разделяющего системные и хаотические сети.

#### 2.3. Сложность и плотность трещинных сетей в разломных зонах

Как известно, разломы в поле тектонической трещиноватости выделяются повышенными значениями плотности мелких разрывов [Чернышев, 1983; Разломообразование..., 1992; Caine et al., 2010; и dp.]. Эта мера густоты или частоты трещин часто используется при геолого-структурных исследованиях. Плотность трещин D (или плотность трещиноватости) обычно измеряется как количество трещин на погонный и/или квадратный метр, реже – кубический метр. Введение в структурный анализ количественных показателей степени сложности разрывных сетей позволяет исследовать их взаимосвязь с плотностью трещин, что имеет важное значение для оценки специфики нарушенности породного массива в разломных зонах земной коры.

Вначале анализировалась связь между параметрами сложности И плотности вне зависимости от расположения в разломных зонах. Подсчет коэффициента корреляции для величин I<sub>cp</sub> и D, характеризующих 138 точек наблюдения, показал отсутствие зависимости между данными параметрами. Изучение выборки свидетельствует, что имеются точки с одинаковой степенью сложности, но существенно разной плотностью трещин, и, наоборот, одинаковую плотность трещин могут иметь и хаотические, и системные сети. С одной стороны, в наиболее общем случае эти параметры независимы, так как контролируются разными факторами. Степень сложности трещинных сетей повышается в тектонически более активных районах с многоэтапной историей тектонического развития (п. 2.2). В пределах участков земной коры, испытавших однотипные деформации, наблюдаются простые системные сети. Плотность трещин в обоих случаях может быть и низкая, и высокая в зависимости от величины приложенных напряжений [Кноринг, 1969; и др.].

С другой стороны, в зонах разломов, имеются причины для увеличения обоих параметров – степени сложности трещинных сетей и плотности мелких разрывов. Во-первых, значительные напряжения и деформации увеличивают плотность трещин. Во-вторых, в развивающейся разломной зоне могут возникать разнотипные поля напряжений 2-го порядка, смена которых во времени приводит к последовательному развитию нескольких генераций трещин, вследствие чего формируется хаотическая трещиноватость. Кроме того, причиной усложнения трещинных сетей может быть активизация древней

зоны разлома в новом поле напряжений 1-го порядка, отличном по типу от первоначального. На вариации обоих параметров также влияют структура и текстура горных пород (крупнозернистые и мелкозернистые, массивные и слоистые, полосчатые и т.д.). Например, сланцеватость в метаморфических породах могут отразиться на диаграмме в виде одного крупного максимума на фоне не очень интенсивных систем. При этом высокая плотность трещин не свидетельствует о близости активного разломного сместителя. Влияние структуры и текстуры пород на степень сложности трещинных сетей будет рассмотрена в главе 4.

Исследование характера взаимоотношений двух параметров – плотности трещин (D) и степени сложности (на примере средней интенсивности максимума I<sub>cp</sub>) было проведено для зон разломов, локализующихся в пределах участков, которые отличались размером и детальностью наблюдений. Первый участок расположен в Западном Прибайкалье (в структурном отношении – на территории Байкальского рифта), а точнее – на побережье пролива Малое море – юго-восточная оконечность мыса Улирба (рис. 11).



Рис. 11. Местоположение участка исследования «Улирба».

Скальный массив мыса Улирба нарушен несколькими разломными сместителями (рис. 12), которые субпараллельны Приморскому разлому – крупному рифтообразующему сбросу, расположенному примерно в 4 км к северу-западу (рис. 11). Участок характеризуется 100%-ой обнаженностью горных пород в береговом склоне, что позволило провести исследования разрывной структуры с необходимой детальностью. Профиль АБ задан перпендикулярно простиранию основных разломных сместителей и характеризуется длиной около 300 м. В анализе использованы данные по плотности трещин D (шт. на пог. м), массовые замеры трещин, характеристики зон нарушенности горных пород (зоны тектонитов – дробление, глинка трения, милонитизация, а также зоны рассланцевания), согласно структурногеологической документации, проведенной в разные годы К.Ж.Семинским, А.В.Черемных и автором.



Рис. 12. Схема разрывных нарушений, зафиксированных при геолого-структурных наблюдениях на южной оконечности мыса Улирба.

1 – горизонтали рельефа (через 2 м); 2 – оси разломных сместителей; 3 – линии, по которым на профиль АБ спроецированы зоны дробления (голубой) и рассланцевания (серый), косой штриховкой между двумя линиями показаны зоны с наибольшей мощностью; 4 – точки геолого-структурных наблюдений, проведенных в 2007-2011 гг.

Вблизи зон тектонитов, как и следовало ожидать, наблюдается увеличение плотности трещин (рис. 13-1), обусловленное повышенными деформациями.

Распределение значений степени сложности трещинных сетей не так однозначно. Большинство точек наблюдения характеризуются сложными трещинными сетями (22 хаотических и 6 системных). Вблизи разломных сместителей встречается и системная, и хаотическая трещиноватость (рис. 13-2). Возможная причина вариаций степени сложности трещин в таких случаях – специфика нарушенности разных крыльев разлома (рассматривается ниже).



Рис. 13. Результаты изучения разрывной структуры (трещины и разломы) горных пород по профилю АБ (мыс Улирба):

1 – графики значений плотности трещин (D) и линия тренда по точкам скользящего среднего; 2 – график средней интенсивности максимума (I<sub>ср</sub>) на диаграмме.

Условные обозначения: 1 – зоны «рыхлых» тектонитов разной мощности, косой штриховкой между двумя линиями показаны зоны с наибольшей мощностью; 2 – зоны рассланцевания; 3 – уровень среднего по профилю значения плотности трещин (а) и участки с повышенной плотностью трещин (б); 4 – границы интервала, разделяющего системные и хаотические сети; 5 – точки наблюдения, в которых трещинная сеть является системной.

По результатам анализа связи параметров D и I<sub>ср</sub> в целом по профилю корреляционной зависимости не установлено (коэффициент корреляции равен - 0,2). Тем не менее, на участке более детальных исследований сложности трещинных сетей в южной части профиля АБ (рис. 14) имеется тенденция к обратной зависимости рассматриваемых величин, вероятно, по причине повышенной плотности зон тектонитов. Коренные выходы горных пород, в которых развита системная трещиноватость, характеризуются малой

плотностью трещин, а в местах развития хаотической трещиноватости часто фиксируется высокая плотность трещин.



Рис. 14. Участок детальных исследований трещинных сетей на м.Улирба (коэффициент корреляции между двумя параметрами равен - 0,3).

Если рассмотреть по отдельности группы трещинных сетей в зависимости от наличия вблизи зон тектонитов (рис. 15), можно увидеть, что вне таких зон встречаются сети и системные и хаотические, но все они имеют плотность трещин ниже среднего значения по участку ( $D_{cp}$ ). Вблизи зон также встречаются системные и хаотические (в основном) сети, имеющие большую плотность трещин. То есть вблизи разломных сместителей наблюдаются в целом (средние величины подсчитаны по 28 точкам наблюдения) более сложные и более густые сети ( $I_{cp} = 6,1\%$ ; D = 18 тр./пог.м), по сравнению с остальными сетями трещин ( $I_{cp} = 5,1\%$ ; D = 10 тр./пог.м).



Рис. 15. График зависимости степени сложности трещинной сети от плотности трещин на участке Улирба в точках вне (1) и вблизи (2) зон тектонитов. По оси Y – средняя интенсивность максимума на диаграмме I<sub>ср</sub> (в %).

Далее необходимо рассмотреть приразломные трещинные сети относительно их расположения в разных крыльях тектонического нарушения. Полученные закономерности иллюстрируются на примере трех разломов (под номерами 1, 2 и 3 в табл. 7), вкрест простирания которых сделаны массовые

замеры трещин: в непосредственной близости от зоны тектонитов, а также на расстоянии нескольких метров от нее в лежачем и висячем крыльях. Для каждой точки наблюдения определены параметры трещинной сети: средняя интенсивность максимума на диаграмме (I<sub>cp</sub>), интенсивность максимальной системы трещин (I<sub>макс</sub>), плотность трещин (D) на погонный и/или квадратный метр (при наличии данных).

Таблица 7

		Положение			Ι	)
Разлом, его мощность и	Точка точки набл.	т	т	тр./	тр./	
местоположение	набл.	относительно	I <sub>cp</sub>	I <sub>макс</sub>	пог.	$M^2$
		разлома			М	
1. Зона дробления и рассланцевания	b1008	лежачее крыло	10,5%	18%	10	-
мощностью 3 м; расположена ближе						
к северо-западному окончанию	b1007	зона	6,3%	21%	21	48
профиля АБ						
2. Зона дробления, рассланцевания,	S0779N	лежачее крыло	5,6%	20%	-	41
милонитизации мощностью 8 м;	S0779Z	зона	6,5%	14%	-	63
находится на продолжении профиля	507705		5 604	1204		25.5
АБ к северо-западу в 300 м	307793	висячее крыло	5,0%	12%	-	23,3
3. Зона дробления, рассланцевания и	R7-1a4	лежачее крыло	7,75%	14%	12	23
милонитизации мощностью 0,5 м;	R7-1-7	лежачее крыло	6,4%	12%	14	13
расположена на юго-восточном	b0819	зона	5%	11%	14	36
окончании профиля АБ	R7-1z	зона	5,1%	8%	14	36
	R7-1nw	висячее крыло	4,7%	8%	12	20

Примеры хаотических и системных трещинных сетей в разных крыльях разлома

Как видно из табл. 7, наблюдается увеличение степени сложности трещинных сетей (уменьшение параметров  $I_{cp}$  и  $I_{Makc}$ ) по направлению от лежачего к висячему крылу разломного сместителя, что особенно отчетливо проявлено для разлома №3. В последнем случае точки наблюдения расположены на близком расстоянии друг от друга, и, таким образом, получен практически непрерывный массовый замер на протяжении около 15 м. Это позволило детально изучить вариации параметров сложности и плотности трещинной сети вкрест разлома (рис. 16).

Итак, на участке Улирба связь между параметрами плотности и сложности трещинной сети обнаруживается в местах интенсивной нарушенности массива разломными смесителями. При этом имеет место зависимость степени сложности сети от ее местоположения в лежачем или висячем крыле разломного сместителя.



Рис. 16. Плотность и сложность трещинных сетей в разломной зоне №3 (поперечный профиль).

1 – зона тектонитов.

Вторым участком для исследования вариаций параметров D и I<sub>cp</sub> в зоне разлома являлся профиль с. Тургеневка – мыс Крестовский в Западном Прибайкалье (рис. 17).



Рис. 17. Местоположение профиля Тургеневка – мыс Крестовский на территории Западного Прибайкалья.

Особенностью данного профиля является его расположение в зоне сочленения различных по нарушенности крупных блоков земной коры, разделенных Приморским разломом. Протяженность профиля – около 70 км. Структурно-геологические исследования [*Семинский и др., 2012*] проводились в более мелком масштабе, чем на предыдущем профиле. Точки наблюдения распределены неравномерно, большая часть из них расположена юго-восточнее Приморского разлома (Приольхонская краевая ступень).

Судя по верхнему графику (рис. 18 А), плотность трещин хорошо отражает более и менее нарушенные блоки и межблоковые зоны, что отмечалось ранее



Рис. 18. Особенности нарушенности трещинами и разломами пород вдоль профиля с. Тургеневка – мыс Крестовский:

А – график значений плотности трещин (D);

Б – график средней интенсивности максимума (I<sub>cp</sub>) на диаграмме;

В – геологический разрез с разрывными нарушениями, в т.ч. крупными сбросами (по [*Семинский и др., 2012*] с изм.).

1 – среднее значение по профилю плотности трещин; 2 – границы интервала, разделяющего системные и хаотические сети; 3 – точки наблюдения, в которых трещинная сеть является системной; 4 – проекция крупных разломов на графиках.

[*Семинский и др., 2012*]. Рассмотрим распределение вдоль профиля степени сложности трещинной сети. В пределах более нарушенной Приольхонской ступени наблюдаются в среднем более сложные трещинные сети (рис. 18 Б). В платформенной части профиля хаотическая сеть трещин имеет место в местах проявления разрывных нарушений, составляющих зону Прихребтового сброса (рис. 18 Б, В). В целом графики свидетельствуют об обратной зависимости изучаемых параметров: на участках с низкими значениями I<sub>ср</sub> (более сложные трещинные сети) плотность трещин D выше (горные породы более раздроблены).

Анализ параметров трещинных сетей вблизи крупных региональных (Прихребтовый, Приморский, Морской) разломов свидетельствует 0 существовании определенной закономерности. В лежачем крыле при повышенной или пониженной плотности трещин наблюдаются менее сложные трещинные сети (высокие значения средней интенсивности максимума); в висячем крыле при повышенной плотности трещин имеют место более сложные сети. Таким образом, проведенное исследование, с одной стороны подтвердило известные данные о повышенных концентрациях трещин в висячих крыльях тектонического нарушения [Лобацкая, 1987: Разломообразование..., 1992; Brogi, 2008; и др.], а с другой, - позволило расширить характеристику нарушенности выводом ИХ 0 наличии разноориентированной трещиноватости.

Итак, на примере исследований в двух различных масштабах (профиль на мысе Улирба (300 м) и профиль м. Крестовский – с. Тургеневка (70 км)) показано существование взаимосвязи сложности и плотности трещинных сетей в разломных зонах, а также закономерных вариаций степени сложности сетей трещин в разных крыльях разломных сместителей. Большая сложность трещинных сетей в разломах по отношению к блокам и в их висячих крыльях по сравнению с лежачими закономерно объясняется тем, что, кроме, высокой интенсивности деформаций, для этих участков коры характерна и более сложная история смены полей тектонических напряжений. В этом плане трещинной «степень сложности сети» может служить полезной дополнительной характеристикой породного массива при его структурном анализе.

По результатам исследования сложности трещинных сетей можно сделать следующие выводы.

Все многообразие трещинных сетей изученных районов (в основном, это – тектонически активные регионы) по сложности строения делится на две большие группы: хаотические и системные. Для количественной оценки степени сложности разрывной сети можно использовать несколько параметров, наиболее эффективным из которых является средняя интенсивность максимума на структурной диаграмме трещиноватости (I<sub>cp</sub>). Хаотические сети характеризуются величиной I<sub>cp</sub> равной менее 5 % при количестве трещин в массовом замере, близком к 100 шт.

В исследованных районах, принадлежащих к активизированной части складчатого пояса и южной окраине Сибирской платформы, хаотические трещинные сети существенно преобладают по распространенности (88%), причем степень их сложности повышается в районах с многоэтапной историей тектонического развития. Именно для этих регионов количественная оценка степени сложности может быть рекомендована в качестве одной из необходимых составляющих структурного анализа.

Количественная оценка степени сложности трещинной сети может применяться в комплексе с плотностью трещин. В зонах разломов обычно наблюдаются повышенные значения обоих параметров – плотность трещин (определяет интенсивность деформации) и степень сложности трещинной сети (характеризует многоэтапность геологического развития), – но при этом висячие крылья разломов отличаются более сложными часто хаотическими сетями мелких разрывов. Данное положение справедливо для разломов разного ранга при исследованиях разного масштаба. Анализ степени сложности и плотности трещиноватости можно использовать совместно с другими способами изучения трещинных сетей для более полного исследования истории развития структуры активизированных участков земной коры, в том числе разломных зон. Характерно, что они позволяют получить важную информацию о структурообразовании даже в условиях отсутствия данных о тектонических подвижках.

### Глава 3

## ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ СЛОЖНЫХ СЕТЕЙ ТРЕЩИН ВБЛИЗИ РАЗЛОМОВ РАЗНОГО ТИПА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СТРУКТУРНО-ПАРАГЕНЕТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

В данной главе исследуются строение приразломных сложных сетей трещин и их особенности, связанные с величиной угла между сопряженными системами трещин и проявленностью разрывов 2-го порядка в разломной зоне. В качестве предмета изучения использованы трещинные сети некоторых участков Прибайкалья, которые в большинстве своем имеют тектоническое происхождение и сложную внешне хаотическую структуру (глава 1 и 2). Они характеризуются множеством разноориентированных систем трещин, что требует особого подхода к исследованию. Один из новых методов структурно-парагенетического анализа трещин создан в лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН специально для изучения подобных разрывных сетей [*Семинский, 1994, 2003, 2005; Семинский, Бурзунова, 2007; Семинский, Черемных, 2011*]. Прежде, чем исследовать с его помощью особенности трещиноватости в разломных зонах, необходимо рассмотреть содержание этой разновидности анализа трещин.

### 3.1. Структурно-парагенетический анализ трещин

Существует множество методик исследования трещин в связи с определением напряженного состояния земной коры. В специализированных обзорах [Шерман, Днепровский, 1989; Ребецкий, 2002; Гинтов, 2005; Сим, 2009; и др.] они делятся на две основные группы – кинематические методы, использующие видимые признаки смещений на поверхностях мелких разрывов (борозды, штрихи скольжения), и <u>структурно-парагенетические</u> методы, основанные на изучении определенных пространственных совокупностей трещин. Каждая группа методов имеет свои преимущества и особенности применения; наиболее эффективным [*Расцветаев, 1987; Гинтов, 2005*] является комплексное использование подходов из обеих групп.

Методы кинематического анализа развивали О.И.Гущенко, Ж.Анжелье, Ю.Л.Ребецкий и другие исследователи. В основе методов этой группы лежат следующие положения. Направление перемещения сразу после возникновения скола должно совпадать с направлением максимального касательного напряжения на плоскости разрыва, действовавшего перед его возникновением. В процессе упругопластического деформирования преобразование части упругих деформаций в необратимые может осуществляться как за счет сдвигов по вновь образующимся разрывам, так и за счет смещения берегов уже существующих разрывов разного масштабного уровня. Плоскость разрыва при этом может не совпадать с плоскостью наибольших касательных напряжений. Отказываясь от жесткой связи ориентации плоскости активизированного разрыва с ориентацией главных осей тензора напряжений, методами данной группы устанавливается однозначная связь кинематических характеристик сколовых разрывов с параметрами искомого тензора [Ребецкий, 2002]. В методах кинематического анализа используются численные и графические способы восстановления тензора тектонических напряжений. Исходными для реконструкций материалами являются структурно-кинематические данные о сколовых трещинах: ориентировка и следы смещений – зеркала, борозды и В штрихи. некоторых методиках используются механизмы очагов землетрясений. Кроме установления ориентации главных осей тензора напряжений, имеется возможность определить и соотношение величин главных напряжений, характеризующееся коэффициентом Лоде-Надаи. Структурный анализ трещиноватости, несущей какую-либо геологическую информацию о кинематике перемещения, восстанавливает тектонические события, связанные, главным образом, со стадиями тектонического перемещения материала, а не с актом его разрушения [*Расцветаев*, 1987].

Следы смещений на трещинах встречаются в массивах скальных пород не часто и не повсеместно. Для исследования широко распространенной в горных породах «немой» (не имеющей кинематических маркеров) трещиноватости, в том числе для изучения происхождения сложных хаотических трещинных сетей, можно использовать характеристики совместно развитых мелких разрывов (взаимная ориентировка, тип разрыва И т.д.) рамках В парагенетических методов.

Парагенетический анализ тектонических структур вошел в практику исследований, благодаря разработкам А.В.Пейве геологических И А.В.Лукьянова [Разломы..., 1963; Лукьянов, Щерба, 1972; и др.], и в настоящее время широко применяется для изучения напряженно-деформированного состояния земной коры. По определению [Гинтов, 2005], структурный парагенезис (парагенез) – это совместное (пространственное) нахождение определенных структурных форм, закономерно возникших одновременно или последовательно в ходе единого деформационного процесса. Структурные парагенезисы и их ансамбли, обладающие характерными структурными рисунками, позволяют судить о тектонических движениях и деформациях, происходящих в толщах горных пород [Расцветаев, 1987; Лукьянов, 1991, 2002; Копп М.Л., 1997; и др.]. Тектонические нарушения в одном парагенезисе могут быть разной морфологии и ориентировки, но всегда близкого местоположения, возраста и генезиса [Расцветаев, 1987]. Нередко основной изучаемого структурного парагенезиса является частью закономерное сочетание разрывных нарушений (трещин и разломов), как совокупности разнотипных разрывов, объединенных общими условиями образования.

Парагенетические методы исследования разрывных нарушений различных масштабных уровней развивали М.В.Гзовский, А.В.Лукьянов, П.Н.Николаев, В.Н.Данилович, С.И.Шерман, Л.М.Расцветаев, М.Л.Копп, М.А.Гончаров, О.Б.Гинтов, Л.А.Сим, К.Ж.Семинский и другие авторы. Парагенезисы структур обладают многоранговым (иерархическим) строением И характеризуют деформации разных размеров – от региональных до микроскопических [Структурные..., 1997]. Для выяснения регионального поля напряжений применяется анализ не только региональных структурных рисунков, но и мезоструктурных рисунков **(B** качестве составляющей структурнокинематических наблюдений) [Konn, 2004]. Региональные и локальные парагенезы характеризуются в основном наборами складчатых и разрывных структур, образовавшихся при механической деформации и течении толщ горных пород [Лукьянов, 2002]. В полевой тектонофизике [Гинтов, 2005] используются в основном только те структурные парагенезисы, которые могут изучаться в натурных условиях (как правило, это – мезоструктурные формы), позволяющие выполнить точные геометрические построения и количественные расчеты. Это – большинство типов разрывов (от небольших трещин до зон

скалывания) и некоторые типы складок, тесно связанных со смещениями по разрывам. В данной работе исследуются трещинные парагенезисы, массовое площадное изучение которых дает возможность перейти к характеристике разломных парагенезисов и зон скалывания разломного ранга.

Как было показано в предыдущей главе, трещинные сети по сложности строения делятся на системные и хаотические. Для изучения системной трещиноватости применяют известные методики, основанные на анализе трещинных парагенезисов. Например, классический метод М.В.Гзовского – реконструкция полей напряжений на основе данных о сопряженных системах тектонических трещин [Гзовский, 1963, 1975]. Сопряженными трещинами называют пересекающиеся под некоторым углом одновозрастные трещины, возникшие в одном поле тектонических напряжений [Гзовский, 1975]. Это простейший парагенезис трещин. Кроме того, используется статистический метод П.Н.Николаева (выделение сопряженности разрывов на основе анализа разброса максимумов трещиноватости) [Николаев, 1992], метод поясов трещин В.Н.Даниловича [Данилович, 1961] и его последующая модернизация [Шерман, Плешанов, 1980; Шерман, Днепровский, 1989].

В отличие от системных, более сложные хаотические сети широко распространены В тектонически активных регионах. Поскольку ОНИ характеризуются наличием множества систем и отдельных по-разному ориентированных трещин, их интерпретация представляет сложную задачу. Для изучения сложных (внешне хаотических) приразломных трещинных сетей разработан новый методический подход к структурно-парагенетическому анализу трещиноватости [Семинский, 1994, 2003, 2005. 2014, 2015; Семинский, Бурзунова 2007; Семинский, Черемных, 2011], который заключается в сравнении природной сети трещин с эталонными трещинными сетями (см. ниже в п. 3.1.1). Далее для краткости структурно-парагенетический метод может называться «парагенетическим».

При описании методического подхода используются понятия «разлом», «трещина», «разрыв», причем считается, что в механическом смысле они эквивалентны. Первые два термина отличаются размерами (рангом) структур, в то время как третий в этом отношении нейтрален [*Стоянов*, 1977].

Порядок структур определяется как признак только генетической соподчиненности и в принципе не учитывает размеры структур. В силу этого в

данной работе структурами второго (или вообще более высокого) порядка, следуя [Стоянов, 1977], называются 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 преемственность порядков, то есть взаимоотношения структурных элементов 1го и 2-го порядков друг с другом аналогичны тем, которые возникают в разломной зоне между разрывами двух любых смежных порядков. Разрывы 1го и 2-го порядков называют также главными и второстепенными разрывами [Геологический словарь, 2012].

Необходимо также отметить, что в новом подходе анализируются в основном опережающие (по [Чернышев, 1983; Семинский, 2003]) разрывы, как структуры 2-го порядка, возникающие в разломной зоне до появления в ее порядка) сместителя (разрыва 1-го пределах магистрального И эволюционирующие в дальнейшем. Преимущество использования разрывов данного типа состоит в том, что они неизбежно образуются на первой стадии разрывообразования и формируют достаточно широкую зону. Затем эти разрывы получают дальнейшее развитие, так как наследуются сопутствующими и, частично, оперяющими разрывами, которые образуются, соответственно, в результате перемещений в пределах основной части зоны разлома и в результате трения при движении неровных поверхностей блоков вдоль формирующегося магистрального сместителя [Семинский, 2003]. 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.

# 3.1.1. Главные принципы и основы нового подхода к структурно-парагенетическому анализу

В основе нового методического подхода лежат известные закономерности разрывообразования на уровне разломов [Гзовский, 1963; Стоянов, 1977;

*Hancock, 1985; Park, 1997 и др.*] и особенности деформации скалывания на уровне трещиноватости [*Семинский, Гладков, 1991; Park, 1997*].

тектонофизическим Согласно представлениям [Семинский, 2003], внутренняя структура разломной зоны формируется в полях напряжений 2-го порядка, которые существуют в отдельные моменты ее развития и закономерно сменяют друг друга при переиндексации осей напряжений в одном и том же объеме горных пород. Переиндексация осей главных нормальных напряжений - это изменение относительной величины напряжений при сохранении пространственного положения направлений их действия. Поля напряжений 2-го порядка отличаются друг от друга по типам и интенсивности проявления и второстепенных являются причиной формирования разрывов в зонах скалывания. Например, в зоне сдвигового разлома, кроме левых и правых сдвигов, могут возникать сбросы и взбросы 2-го порядка. Одним из примеров закономерной смены напряженного состояния являются данные инструментальной сейсмологии, которые позволяют установить переориентировку осей  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  в ходе единого сейсмического акта, иногда с интервалом в несколько минут или секунд [*Расцветаев*, 2002].

Сначала рассмотрим закономерности развития крупных разломов, у которых разрывами 2-го порядка являются более мелкие разломы (рис. 20). Наиболее полный набор структурных элементов 2-го порядка, формирующихся в разломной зоне (рис. 20 в), составил по материалам многих авторов П.Ханкок 1985]. Самые известные и наиболее часто [Hancock, встречающиеся опережающие разрывы 2-го порядка – это сопряженные сколы Риделя – R и R' (R-серия на рис. 20), которые могут быть представлены нарушениями разных рангов: небольшими сколами длиной в первые десятки см и разломами протяженностью первые км – десятки км [Гзовский, 1975]. В наиболее распространенном в природе случае [Sylvester, 1988; Park, 1997] угол между системами сопряженных сколов составляет около 60°. Занимающая положение его биссектрисы ось сжатия обычно ориентируется под углом (50±5)° к общему простиранию зоны скалывания, что обусловлено небольшим, характерным для разломов земной коры транспрессивным эффектом (дополнительное боковое сжатие).

Кроме сколов Риделя, при развитии структуры разломной зоны за счет переиндексации осей главных нормальных напряжений в условиях

осесимметричного напряженного состояния при транспрессивном скалывании формироваться опережающие сопряженные могут сколы В других пространственных ориентировках (t-серия и n-серия), и, следовательно, другого морфогенетического типа. Например, в зоне левого сдвига пара сопряженных разрывов R-серии (левый и правый сдвиги) формируется в том же поле напряжений, что и будущий главный (Ү-тип) левосдвиговый сместитель. В свою очередь сопряженные сколы п-серии (сбросы) и t-серии (взбросы) образуются, когда, соответственно, меняются местами промежуточная ось напряжений с осью минимального или максимального сжатия (рис. 20 г). В сочетании со сколами Риделя разрывы n- или t-типа образуют «пирамиду разрывной скалывания (сжатия или растяжения)»; данная модель





Рис. 20. Структурные элементы зоны скалывания (на примере зоны левого сдвига): а – модель по [*Riedel, 1929*] с изменениями; б – схема напряжений и структур по [*Стоянов, 1977*]; в – схема по [*Hancock, 1985*] с упрощениями; г - типы опережающих сопряженных разрывов 2-го порядка 1-й (R), 2-й (n) и 3-й (t) серий, образующиеся в левосдвиговой зоне скалывания при переиндексации осей напряжений по [*Семинский,* 2005]; д – упрощенная схема основных разрывных элементов в разломной зоне. 1 – магистральный сдвиговый сместитель; 2–5 – структуры 2-го порядка: 2 – сдвиги, 3 – взбросы, 4 – сбросы, 5 – разрывы растяжения (а) и оси складок (б); 6 – оси главных нормальных напряжений (выход на верхнюю полусферу) – максимального (а), промежуточного (б) и минимального (в) сжатия. тектонической деформации имеет большое распространение в земной коре складчатых и рифтовых областей [*Расцветаев, 1987*]. Все разрывы (Y-, R-, t-, n-типов) представляют единый парагенезис, т.к. составляют единую зону и генетически взаимосвязаны формированием в одной динамической обстановке (для рассмотренного примера – левый сдвиг).

То же в механическом отношении будет характерно для взбросовой или сбросовой разломных зон, но в зонах их влияния второстепенные разрывы R-, t-, n-серий принадлежат к другим морфогенетическим типам в соответствии с их иным расположением относительно земной поверхности (табл. 8).

Таблица 8

		Сопряженные разрывы 2-го порядка			
Разрывы 1-го и 2-го порядков	Разрыв 1-го порядка	азрыв 1-го Переиндексация (смена) осей главных нормальных напряжений минимального (1), промежуточного (2) и			
		максимального (3) сжатия			
		I	(1) и (2)	(2) и (3)	
Обозначение	Y	<b>R</b> и <b>R'</b>	tиť	<b>n</b> и <b>n'</b>	
Mandara	взброс	взброс	сбросо-сдвиг, сдвиг	сдвиго-взброс, взброс	
морфогенетический тип	сдвиг	сдвиг	взброс	сброс	
	сброс	сброс	сдвиго-сброс, сброс	взбросо-сдвиг, сдвиг	

Морфогенетические типы опережающих разрывов

В отличие от крупных дизъюнктивов, в зонах мелких разломов разрывными структурами **2-го** порядка являются **трещины**, имеющие определенные особенности образования, которые рассматриваются ниже.

В мелких разломных зонах разрывообразование происходит сравнительно быстро, и трещины развиваются только на ранней стадии процесса, после чего формируется магистральный сместитель [Семинский, 2003]. Как следствие, небольшой разлом представляет главным образом зону повышенной трещиноватости, которая окружает поверхность главного смещения. Процесс переиндексации осей напряжений на уровне трещин имеет свои закономерности, которые были выявлены в ходе многолетних исследований струткуры разнотипных разломных 30H (сжатия, растяжения, сдвига) [Семинский, Гладков, 1991; Разломообразование..., 1992; Семинский, 1994; Структурные..., 1997 и др.]. Основной особенностью строения трещинной сети в мелких зонах является то, что под воздействием тектонических сил в горных породах наиболее часто образуется структурный парагенезис из трех примерно ортогональных систем трещин (тройка систем трещин), который встречается как самостоятельно, так и в составе более сложных совокупностей мелких разрывов.

Две системы из тройственного парагенезиса являются классическими сопряженными (по [Гзовский, 1975]) сколами (сколы Риделя) (рис. 21 А) – это главная И второстепенная системы трещин. Термины «главная» и «второстепенная» в применении к системам трещин в тройках обозначают не порядок разрывов, а их отношение к положению сместителя разлома: главная система трещин совпадает с ориентировкой разлома в пространстве [Невский, 1979]. Угол (при оси сжатия) между главной и второстепенной системами в среднем равен около  $80^\circ$ , хотя его величина может варьировать от  $60^\circ$  до  $110^\circ$  и более в зависимости от условий формирования (тип горной породы, глубина, динамическая обстановка и т.д.). Вариации данного угла являются главным предметом обсуждения в п. 3.2.1. Значение угла между трещинными сколами Риделя в среднем (80°) больше, чем в аналогичных сколах более низкого порядка – разломах (60°), так как при трещинообразовании в обстановке объемного сжатия имеет место более упругая реакция пород на приложенную Действительно [Разломообразование..., 1991; и др.], нагрузку. степень пластичности поведения деформируемого массива повышается с увеличением его объема (и с рангом разрыва) и с уменьшением скорости деформирования, а такие мелкие структуры, как трещины, образуются при сравнительно быстром хрупком разрушении горных пород.



Рис. 21. Формирование тройственного парагенезиса трещин: главной и второстепенной систем (А), а также дополнительной системы (Б).

 1 – оси главных нормальных напряжений – минимального (а), промежуточного (б) и максимального (в) сжатия;
2 – дополнительная система трещин.

Формирование главной и второстепенной систем трещин (рис. 21 А) приводит к дополнительному локальному напряженному состоянию и

переиндексации осей напряжений, когда меняются местами ось минимального сжатия и промежуточная ось главных нормальных напряжений [Семинский, 2003]. Новое напряженное состояние частично снимается образованием третьей - дополнительной – системы трещин (рис. 21 Б) по типу отрыва, занимающей поперечное положение к «новой» оси минимального сжатия (то есть относительного «растяжения») и первым двум системам трещин. При условии постоянства действия внешних сил, накапливающиеся напряжения в горном массиве будут сниматься за счет перемещений по сети возникших трещин, в том числе и по трещинам дополнительной системы, обуславливая тем самым наблюдаемую в природе ее двойственную (сколово-отрывную) морфологию. Наиболее активно процесс формирования трех примерно ортогональных систем трещин реализуется при осесимметричном напряженном состоянии, когда упругая реакция породного массива имеет место при относительно большом всестороннем давлении в верхней части земной коры примерно до глубины 10 км, исключая близповерхностные условия залегания горных пород с наличием [Шерман, 2002; истинного растяжения Семинский, 2003]. Третья дополнительная система трещин генетически связана со сколами главной и второстепенной систем, так как формируется в одном поле напряжений (при условии наличия явления переиндексации осей напряжений), что позволяет говорить о существовании тройственного парагенезиса систем трещин.

Тройственный парагенезис (тройка примерно перпендикулярных систем трещин) (рис. 22) часто встречается в природе [Разломообразование..., 1992; Schulz, Evans, 2000]. Так, он составляет основу трещинной структуры зоны влияния разлома и имеет ориентировку, которая связана с положением плоскости сместителя В пространстве. Тройка систем трещин может развиваться обособленно (в этом случае в обнажении горных пород наблюдается системная трещинная сеть) или являться частью более сложной (хаотической) трещинной сети в зоне разлома.

Тройки систем трещин образуют кубическую, параллелепипедальную, ромбоидальную отдельность в массиве горных пород (рис. 22, 23 A) и характерные структурные рисунки на диаграмме трещиноватости в виде трех примерно перпендикулярных систем трещин (рис. 23 Б).



Рис. 22. Примеры проявления тройственного парагенезиса систем трещин в массивах метаморфических пород Прибайкалья.



С.Н.Чернышев, исследуя пересечения трещин, установил, что четырехлучевые пересечения трещин с преобладанием четырехугольных (72%) «ячеек» чаще всего встречаются именно В тектонической трещиноватости (рис. 24) [Чернышев, 1983].



Рис. 24. Схематичное изображение примеров системных сетей трещин (Монголия, Иран) (по [Чернышев, 1983]), на которых отчетливо проявлен тройственный парагенезис мелких разрывов.

Кроме описанной выше тройки систем трещин в породных массивах могут встречаться и другие совокупности систем трещин: пирамида скалывания (две пары сопряженных сколов), три ортогональные системы отрывов в слоистых горизонтально залегающих осадочных толщах, две системы сопряженных сколов с острым углом между ними и системой отрыва перепендикулярно оси растяжения (в самой верхней части коры), различные парагенезы оперяющих структур, пояса разных типов и другие [*Pacцsemaes, 1987; Белоусов и др., 1997; Гладков, Семинский, 1999; Schulz, Evans, 2000*]. Тем не менее, в разломных зонах примерно до глубин 10 км (исключая близповерхностные толщи) в условиях всестороннего сжатия чаще всего формируется тройственный парагенезис из двух систем сколовых трещин и одной системы трещин сколово-отрывного типа, расположенных ортогонально друг к другу.

Особенность трещинообразования в виде троек систем трещин является основой для анализа в новой разновидности парагенетического метода [*Семинский, 2003*]. В строении крупной разломной зоны (рис. 25 в) принимают участие мелкие разломные зоны 2-го порядка (второстепенные) с типичной для них трещинной сетью (тройственный парагенезис систем трещин на рис. 25 а, б), сформированной в поле напряжений 2-го порядка. Трещиноватость в области действия нескольких таких второстепенных полей напряжений в зоне одного крупного разлома, представляет совокупность тройственных парагенезисов и образует сложную внешне хаотическую трещинную сеть (рис.

25 г). Данный случай имеет место, когда каждому мелкому разлому 2-го порядка (R-, t-, n-типов), а также частным сместителям более крупной структуры 1-го порядка (Ү-типа) соответствует тройственный парагенезис на уровне трещин. При наложении троек систем трещин друг на друга в массиве горных пород трещинная сеть становится сложной и визуально беспорядочной (глава 1, рис. 4 Б). В этих случаях трещинные сети по классификации С.Н.Чернышева относятся к хаотическим [Чернышев, 1983], так как количество составляющих их систем может достигать десяти и более. При этом зачастую наблюдается поперечная зональность строения крупной разломной зоны в сетей: вблизи разломного сместителя отношении разрывных обычно наблюдаются хаотические сети, а на периферийных частях разломной зоны – простые системные сети (тройка систем трещин) [Разломообразование..., 1992; *Caine et al.*, 2010].



Рис. 25. Схема внутреннего строения мелкой (а) и крупной (в) левосдвиговой разломной зоны (по [*Семинский*, 2003] с изм.) и характерные для них трещинные сети (б, г).

1 – область распространения разрывов 2-го порядка в разломной зоне; 2 – магистральный сдвиговый сместитель; 3, 4, 5 – сдвиги, взбросы и сбросы 2-го порядка – трещины (а) или разломы (в); 6 – разрывы растяжения; 7 – реперы, смещенные по разрывам. Одинаковыми цифрами на круговых диаграммах (б, г) указаны тройки систем трещин.

Для интерпретации сложных сетей трещин разработаны эталонные (идеализированные) трещинные сети, характерные для разломных зон

разного морфогенетического типа [*Семинский, 2003*]. За основу взята модель парагенезиса разломной зоны (1-ый порядок) (рис. 26 А), состоящая из главного разломного сместителя (Y) и сопряженных пар опережающих разломов 2-го порядка R-, t-, и п-серий (рис. 20). В модели каждому из этих разломов на уровне трещиноватости соответствует тройственный парагенезис, а их совокупность представляет собой идеализированную трещинную сеть для разломной зоны (эталон трещинной сети) (рис. 26 Б). При составлении эталонов использованы параметры, наиболее характерные [*Wilcox et al., 1973; Hancock, 1985; Sylvester, 1988; Семинский, 2003*] для зон действия скалывающих напряжений в земной коре: угол между сместителем разлома и осью сжатия –  $55^{\circ}$ , угол между сопряженными разломами 2-го порядка –  $60^{\circ}$ , угол между сопряженными разломами трещин –  $80^{\circ}$ .

Таким образом, **эталонные трещинные сети** представлены в виде кругового трафарета в проекции верхней полусферы – для удобства сравнения с диаграммами природной трещиноватости, на котором разными значками показаны магистральный разломный сместитель, более мелкие разломы 2-го порядка и соответствующие им тройки систем трещин (рис. 26 Б).



Рис. 26. Схема составления идеализированной диаграммы (эталона) трещинной сети для зоны левостороннего сдвига.

А – главный сместитель (Y) и разломы 2-го порядка (R, t, n), показанные на круговой диаграмме в виде плоскостей (слева) и их полюсов (справа).

Б – эталонная диаграмма, представляющая полную совокупность троек систем трещин (полюсы), главные системы которых соответствуют разломам в парагенезисе разломной зоны (А).

1, 2 – плоскости (1) и полюсы (2) разломов сдвигового R- и R'- (а), взбросового t- и t'- (б) и сбросового n- и n'- (в) типов; 3 – главные системы трещин; 4 – второстепенные и дополнительные системы трещин.

Эталоны составлены для всех типов разломов (сброс, взброс, надвиг, левый и правый сдвиг) с разными значениями угла падения разломного сместителя. Эталон правого сдвига построен аналогично левому (рис. 26 Б), но ввиду противоположности смещения представляет его обратное отображение. Другие морфогенетические типы разломов – сбросы и взбросы (надвиги) – не представлены на рис. 26. Они опубликованы в монографиях [*Семинский, 2003; Семинский и др., 2005*] и имеют те же наборы систем трещин с одинаковым взаимоположением. Однако их совокупности по-разному ориентированы в пространстве, согласно отличиям в каждом конкретном случае углов падения плоскости главного сместителя и направлений смещения по нему.

Новый подход к структурно-парагенетическому анализу заключается в сравнении природной трещиноватости и эталонных трещинных сетей с целью восстановить напряженное состояние, при котором происходило разрывообразование. На структурную диаграмму природной трещинной сети (рис. 27 А) накладываются различные эталоны (например, на рис. 27 Б – эталон трещинной сети левосдвиговой зоны), из которых выбирается наиболее подходящий по совокупности совпадающих систем трещин (рис. 27 В). В итоге



Рис. 27. Структурно-парагенетический анализ круговой диаграммы и его результаты на примере трещинной сети из левосдвиговой разломной зоны.

А, Б, В – природная (А) и эталонная (Б) трещинные сети и их сопоставление (В); Г – структурные элементы зоны скалывания; Д – реконструкция поля напряжений.

1 – полюсы главных систем трещин, соответствующих сопряженным разрывам 2-го порядка – сдвига (а), взброса (б) и сброса (в); 2 – полюсы второстепенной и дополнительной систем трещин; 3 – простирание главного сместителя (Y) и разломов 2-го порядка (R, R', t, t', n и n') – сдвигов (а), взбросов (б) и сбросов (в) в зоне скалывания; 4 – оси главных нормальных напряжений: минимального (а), промежуточного (б) и максимального (в) сжатия (выход на верхнюю полусферу).

определяется **решение** структурно-парагенетического анализа: ориентировка и морфогенетический тип зоны скалывания (разломной зоны), входящие в ее состав структуры 2-го порядка (в природе обычно встречаются трещинные сети с неполным набором данных разрывных систем) (рис. 27 Г), а также поле напряжений 1-го порядка, в котором сформировалась данная трещинная сеть (рис. 27 Д).

В новом методическом подходе, как и в парагенетическом анализе Л.М.Расцветаева [*Pacцветаев, 2002*], структурные рисунки интерпретируются как суммарный итог деформации, как результат сложной совокупности закономерно сменяющих друг друга тектонических полей напряжений, связанных общей направленностью единого тектодинамического процесса, но основной акцент сделан на исследование опережающих разрывов. Массовое площадное изучение трещинных парагенезисов позволяет определить закономерности возникновения и развития не только самих трещин, но и выявить механизм формирования более крупных структурных форм.

Структурно-парагенетический анализ рассматриваемого типа проводится в два этапа. **Первый** этап осуществляется согласно приведенному выше описанию и заключается в реконструкции для одного коренного выхода особенностей напряженного состояния локального объема горных пород, а также в установлении его принадлежности к зоне разлома 1-го порядка, характеризующегося определенным типом и пространственной ориентировкой (рассматривается ниже в п. 3.1.2). **Вторым** этапом является поранговый анализ [*Семинский, Черемных, 2011*], в процессе которого происходит переход от локального поля напряжений к региональному, от трещинного парагенезиса к разломному (рассматривается в главе 4). В целом новый подход дает возможность на основе статистических замеров ориентировок трещин определить напряженное состояние и парагенезис разрывов зон скалывания разных масштабных уровней.

## 3.1.2. Применение нового структурно-парагенетического метода для изучения приразломных трещинных сетей м. Улирба в Прибайкалье

Структурно-парагенетический анализ приразломных трещинных сетей с применением нового методического подхода был апробирован в ходе

исследования внутреннего строения серии конкретных разломных зон Прибайкалья. Он не требует специального оборудования, доступен для быстрого освоения и может использоваться при изучении практически любых коренных выходов горных пород. Сбор исходного полевого материала производится вместе со стандартным геологическим описанием обнажения горных пород при картировании разломных структур.

Участок исследований, рассматриваемый здесь в качестве примера, расположен в Западном Прибайкалье на побережье озера Байкал на мысе Улирба (рис. 11, глава 2). Ранее (глава 2) он был описан при изучении распределения по профилю восточного берега параметров «степень сложности» и «плотность» трещинных сетей. Мыс пересекают несколько разломных сместителей северо-восточного простирания, выраженных в рельефе и представленных зонами тектонитов (рис. 28 вверху). Два из них попадают на участок детального исследования трещиноватости (рис. 28 внизу). Геологоструктурные наблюдения на мысе Улирба проводились с 2007 по 2011 г.г. (материалы К.Ж.Семинского, А.В.Черемных и автора) и включали массовые замеры трещин (по 50-100 штук) в 37 пунктах наблюдения. В процессе обработки построены круговые структурные диаграммы трещиноватости. Задачами исследования были: определение морфогенетического типа разломных зон на детальном участке, уточнение их границ и выявление особенностей внутренней структуры. Эти задачи решаются в ходе первого этапа парагенетического анализа трещинных систем, который был проведен на базе интерпретации диаграмм и данных о присутствии в коренных выходах более крупных разрывных нарушений.

Изучение круговых диаграмм показало, что для коренных выходов на мысе Улирба характерно широкое развитие парагенезисов из трех примерно перпендикулярных систем трещин, которые обычно составляют основу разрывных сетей вблизи разломных сместителей. Следуя методике парагенетического анализа трещиноватости (п. 3.1.1, рис. 27), положение совокупности максимумов на каждой из диаграмм сравнивалось с эталонными трафаретами, которые соответствуют идеализированному набору троек систем трещин, формирующихся во второстепенных полях напряжений в разломной зоне 1-го порядка – сдвиговой, сбросовой или взбросовой (надвиговой). Таким

образом, для каждой точки был найден наиболее подходящий эталон определенного типа.



Рис. 28. Результаты структурно-парагенетического анализа трещиноватости при исследовании разломных зон детального участка. На врезке (вверху) - мыс Улирба (Западное Прибайкалье).

1 - зоны тектонитов на врезке (а) и на карте (б) (по [*Семинский и др., 2008*]), а также их номера; 2 - участок детальных исследований; 3 - точка наблюдения (а) и структурная диаграмма трещиноватости в этой точке (б) с наложенными эталонными трафаретами, соответствующими обстановкам растяжения (А) и сдвига (Б); 4 – трещинные сети, парагенетический анализ которых показал решение левого (а) и правого (б) сдвигов, сброса (в), взброса (г); 5 – трещинные сети, в которых простирание главной системы трещин в парагенезисе ориентировано субпараллельно (а) и вкрест (б) простирания зон тектонитов.
Как правило, на диаграммах анализируемых трещинных сетей выделялась только часть систем, составляющих эталонную сеть трещин. Об этом же упоминает Л.М.Расцветаев: «Структурный рисунок разрывного парагенезиса всегда отличен от теоретического структурного рисунка значительно меньшей полнотой и существенной неравномерностью развития различных элементов, а менее строгой упорядоченностью пространственный часто И ИХ взаимоотношений» [*Расцветаев*, 1987]. Одной из причин является прекращение однонаправленного тектонического воздействия на одной из промежуточных стадий развития разлома. На диаграммах природной трещиноватости также встречаются трещины и системы трещин, не относящиеся к данному парагенезису опережающих разрывов. Некоторые из них, сформировались в ином (обычно более древнем) поле напряжений 1 порядка. Другие, возможно, соответствуют оперяющим или сопутствующим разрывам рассматриваемых разломов. Третьи отражают локальные неоднородности массива, в том числе залегание горных пород (с которым часто связана первичная трещиноватость), что подтверждается полевыми данными. Также возможно экзогенное или техногенное происхождение некоторых систем и отдельных трещин.

Как выяснилось в процессе изучения сложных трещинных сетей на некоторых участках Байкальской рифтовой зоны [Бурзунова, 2009, 2013], в пределах одной структурной диаграммы обычно проявлено несколько решений парагенезисов трещин. Одно-два из них выражены более четко и являются наиболее достоверными, что характерно и для участка на мысе Улирба. Степень достоверности решения определялась ПО ряду структурных параметров, таких как, например, величина угла между сопряженными системами трещин (по [Семинский, 1997] и др.), интенсивность максимумов главной тройки систем трещин в решении (по [*Семинский, Гладков, 1991;* Семинский, 2003]), разбросы максимумов (по [Николаев, 1992]), распределение на диаграмме трещин скалывания и отрыва. Что касается типа мелких разрывов, то главная и второстепенная сопряженные трещинные системы (по [Гзовский, 1963]) являлись сколовыми, а дополнительная система, в силу двойственной природы (по [Семинский, 2003]), характеризовалась отрывной морфологией, хотя иногда и содержала штрихи скольжения на плоскостях. Кроме того, рассматривалась степень соответствия совокупности систем трещин эталонному набору, анализировалось наличие разрывов 2-го порядка. В

73

качестве дополнительного подтверждения достоверности решения принимались во внимание структурные особенности коренного выхода горных пород – элементы залегания пород, контактов и небольших интрузивных тел (жилы, дайки), крупных трещин, зон трещиноватости, зон тектонитов (дробление, глинка трения, милонитизация, рассланцевание), маркеры смещений (штрихи, борозды, зеркала скольжения, сдвиги маркирующих слоев).

По суммарной оценке параметров трещинного парагенезиса оценивались преимущества какого-либо решения относительно других в данной точке наблюдения. Например, высокая оценка достоверности определенного решения может поле свидетельствовать 0 TOM. ЧТО напряжений, В котором сформировалась соответствующая совокупность трещин, было более интенсивным, более продолжительным по времени или более поздним по времени проявления. Системы трещин на диаграммах обычно по-разному задействованы в полученных при ее анализе решениях: система может принадлежать только одному парагенезису, а может быть проявлена в двух решениях вследствие активизации ее в HOBOM поле напряжений при благоприятной ориентировке. Некоторые были системы трещин не задействованы ни в одном парагенезисе.

Таким образом, в процессе парагенетического анализа трещиноватости мыса Улирба проведена реконструкция локальных полей напряжений, в которых были сформированы трещинные парагенезисы. Выявлены типы зон скалывания, простирание которых в большинстве точек ориентировано либо субпараллельно (СВ-ЮЗ) либо перпендикулярно (СЗ-ЮВ) зонам тектонитов, в связи с чем, вынесенные на карту наиболее достоверные решения разделены на группы по двум ориентировкам простирания. Среди полученных решений доминируют тройственные парагенезисы, у которых ориентировка наиболее интенсивно развитых трещин (главной И второстепенной) систем свидетельствует о деформировании горных пород в зонах влияния разломов с вертикальным (сброс, рис. 28 А) или горизонтальным (сдвиг, рис. 28 Б) направлением смещения крыльев.

Рассмотрим участок детальных исследований, где расположено большинство точек наблюдения (рис. 28). Найденные решения структурнопарагенетического анализа свидетельствуют о том, что трещинная структура зон разломов (I и II сместители) могла формироваться при лево- или правосдвиговых перемещениях крыльев. При этом парагенезис левого сдвига найден в большинстве точек (14 из 16 сдвиговых решений). Менее проявлены сбросовые и взбросовые подвижки. Следовательно, установленным и наиболее значимым в плане трещинообразования следует считать левосдвиговый характер перемещения крыльев двух изучаемых разломов, которые, судя по распространенности решений, являются сместителями одной разломной зоны, обнажающейся на южной оконечности мыса Улирба.

Реконструкция поля напряжений в пределах левосдвиговой разломной зоны показала незначительные вариации ориентировок восстановленных осей главных нормальных напряжений. Исследование величины углов при оси сжатия между главной и второстепенной сопряженными системами трещин в точках с решением левого сдвига свидетельствует о том, что более острые углы наблюдаются в зоне дробления I (рис. 28), тогда как в зоне II – большие по величине, что может быть признаком более длительного периода ее формирования.

Кинематические данные, собранные В ходе полевых наблюдений, подтверждают результаты, полученные при структурно-парагенетическом анализе. Изучение немногочисленных штрихов скольжения на плоскостях трещин северо-восточного простирания показало, что на крутопадающих трещинах присутствуют преимущественно субгоризонтальные штрихи, а на более пологих – субвертикальные. Следовательно, в ходе формирования разломной зоны детального участка имели место как сдвиговые, так и сбросовые перемещения, но первые играли основную структурообразующую роль, поскольку в большинстве точек наблюдения главная система трещин характеризуется углами падения 80–90°.

Таким образом, с помощью структурно-парагенетического анализа были определены приблизительные границы разломной зоны южной оконечности мыса Улирба и установлен левый сдвиг как основной характер подвижек. Приведенный пример свидетельствует, что парагенетический анализ приразломных трещинных сетей может успешно дополнять другие методы исследования разломных зон, так как он эффективен даже в условиях отсутствия структурных данных о тектонических подвижках.

75

## 3.2. Закономерности строения сложных трещинных сетей, формирующихся в различных динамических обстановках

Строение трещинных сетей зависит от многих факторов, одним из которых является динамическая обстановка формирования трещиноватости. Из пяти «элементарных геодинамических обстановок» [Введение..., 2005] в земной коре наиболее распространены три, характеризующиеся горизонтальной либо вертикальной ориентировкой осей главных нормальных напряжений. Это обстановки: сжатия, горизонтального горизонтального растяжения, горизонтального сдвига в вертикальной плоскости (далее упоминаются как сжатие, растяжение, сдвиг). Соответственно выделяются три группы разрывов по морфогенетическому типу (надвиги и взбросы, сдвиги, сбросы). Для исследования трещинных сетей, сформированных в условиях определенного напряженного состояния (в зонах сжатия, растяжения, сдвига), из основной базы данных (глава 2) отобраны только те точки наблюдения, в которых по прямым структурно-геологическим признакам установлено существование разломного сместителя и характер подвижек по его поверхности, то есть достоверно известен морфогенетический тип разлома и динамическая обстановка формирования разломной зоны. Всего, таким образом, были выбраны 23 точки вблизи сдвиговых разломов, 10 точек – вблизи сбросовых и 40 точек – вблизи взбросовых и надвиговых разломов, располагающихся в районах Западного Саяна, Южного Тянь-Шаня, Центрального Памира, Прибайкалья И Вьетнама. Для каждой точки наблюдения проведен парагенетический анализ, в ходе которого найдено положение всех составляющих парагенезис разрывов, что позволило изучить следующие особенности и характеристики трещинных сетей: углы между сопряженными системами трещин, положение осей напряжений, встречаемость систем трещин, соответствующих разным сериям разрывов 2-го порядка.

#### 3.2.1. Углы между сопряженными системами трещин

При апробировании парагенетического анализа на примере трещиноватости в разломных зонах Прибайкалья было замечено, что отклонения главной и второстепенной сопряженных систем природных сетей трещин от эталонных при сопоставлении круговых диаграмм и трафаретов часто носит систематический характер. Более того, они однотипны вблизи разломов одного морфогенетического типа. В связи с тем, что это может быть связано с различием угла скалывания в разных динамических обстановках формирования сдвигов, сбросов и взбросов, данный параметр трещинных сетей был исследован более детально.

Угол (главной между сопряженными системами трещин И второстепенной в тройке (п. 3.1.1)) в момент их формирования равняется удвоенной величине угла скалывания (α), т.е. угла между разрывом и осью максимального сжатия (рис. 29). Одной из характерных особенностей трещиноватости, как объекта детального структурного анализа, является то, что величина α варьирует вследствие ряда причин [*Расцветаев*, 1987]. Такими причинами можно считать наличие у породного массива определенных структурно-механических свойств, тип и продолжительность воздействия исходного поля напряжений, влияние пластических деформаций, возникающих в ходе длительного структурообразования, и некоторые другие.



Рис. 29. Простой трещинный парагенезис, состоящий из пары сопряженных сколов.

1 – угол скалывания; 2 – оси главных нормальных напряжений: растяжения (1), промежуточная ось (2) и сжатия (3).

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 [Гзовский, 1963; Белоусов, 1986]. Влияние состава и структуры горных пород на угол скалывания особенно отчетливо проявляется при низких давлениях (в близповерхностных частях земной коры, в лабораторных экспериментах при нормальных условиях). Так, при условно-мгновенном

разрушении сухих образцов, атмосферном давлении и комнатной температуре величина угла скалывания меняется от 10 до  $45^{\circ}$  в зависимости от типа породы [*Гзовский, 1963*]. Характерно, что с увеличением глубины формирования разрывов влияние типа пород ослабляется. По мере повышения всестороннего давления уменьшается величина угла отклонения трещин скалывания от площадок действия максимальных касательных напряжений, то есть угол приближается к  $45^{\circ}$ . Например, в ходе экспериментов (разрушение образцов в условиях сжатия) установлено [*Гзовский, 1963*], что с повышением всестороннего сжатия в мраморах и гранитах угол скалывания увеличивается до  $45^{\circ}$  (двугранный – до  $90^{\circ}$ ).

В используемой нами базе данных (п. 3.2.) имеются точки наблюдения, расположенные в однотипных породах, но на разных участках исследований. В ряде случаев для них характерны существенные отличия в углах между системами сопряженных сколов, что, таким образом, обусловлено не типом породы, а условиями деформирования. В процессе формирования разломных зон в условиях действия сжимающих напряжений по всем трем осям угол скалывания варьирует в пределах 30-45° [Murrell, 1977], хотя имеются экспериментальные данные, что изначальный угол может быть достаточно велик [Гзовский, 1975]. В наиболее общем для условий земной коры случае в момент образования сколов угол α составляет 30-35°, и в ходе последующей деформации при развороте трещин он может «пассивно» увеличиться до 45° и более [Гзовский, 1963; Белоусов, 1986; Семинский, 1997, 2003]. Таким образом, угол между сопряженными системами трещин, в котором располагается ось сжатия, может составлять 60-90° и, даже, более. В эталонных трещинных сетях нового методического подхода (п. 3.1) используется величина угла между сопряженными главной и второстепенной системами трещин, равная усредненному значению –  $80^{\circ}$ .

Среди факторов, определяющих величину угла скалывания в породном массиве, важную роль играет всестороннее литостатическое давление, которое отличается на разных глубинах образования разрывов. Однако изучать характер зависимости угла между сопряженными трещинами от величины давления на базе геолого-структурных данных достаточно сложно. Попытка подобного анализа на имеющемся фактическом материале не привела к однозначному результату.

Кроме всестороннего сжатия в земной коре возникают девиаторные напряжения, отвечающие за касательные напряжения и определяющие тип динамической обстановки в массиве горных пород – горизонтальное сжатие, горизонтальное растяжение, горизонтальный сдвиг в вертикальной плоскости (основные наиболее распространенные обстановки) [*Николаев, 1992; Pluijm, Marshak, 2004; Введение..., 2005; Ragan, 2009*]. Девиаторные напряжения являются еще одним фактором, от которого зависит величина угла между сопряженными сколами [*Семинский, 1997*].

При исследовании ориентировок сопряженных трещин, в частности, угла между ними, вблизи сместителей сдвигов, сбросов и надвигов (взбросов) было установлено влияние на величину данного угла динамической обстановки возникновения и развития разломов и приразломных трещин [Семинский, 1997; Семинский, 2003]. Для этого выявлены пары систем сопряженных сколов, ассоциирующихся с известными разломными сместителями. Анализ значений угла между этими системами показал, что он изменяется в пределах 60-80° в обстановке растяжения, 70-100° – в обстановке сдвига, и 80-110° – при сжатии, т.к. условия возникновения и развития разрывов в этих случаях различны (на рис. 30 показаны средние значения углов). Таким образом, результаты исследования углов между системами сопряженных трещин, полученные эмпирическим путем свидетельствуют 0 существовании отчетливой зависимости их величин от типа господствующей в пределах изучаемой площади динамической обстановки, что и стало отправным положением для дальнейших целенаправленных исследований в этой области.



Рис. 30. Угловые взаимоотношения сопряженных систем трещин, изученных вблизи разломов разного морфогенетического типа (с изм. по [Семинский, 1997, 2003]).

 среднее значение угла между главной и второстепенной системами в тройственных парагенезисах трещин вблизи сместителей сбросового (а), сдвигового (б) и взбросового (в) типов;
оси напряжений: минимального (а) и максимального (б) сжатия.

Изучение влияния динамической обстановки формирования сопряженных трещин на величину угла между ними проведено в рамках диссертационной работы с целью уточнения эталонных парагенезисов, что открывает возможность ДЛЯ получения более качественных результатов парагенетического анализа. Выполнено более детальное исследование (большее количество точек наблюдения и изученных параметров) величины угла между системами сопряженных трещин В природных трещинных сетях, расположенных вблизи разломов установленного морфогенетического типа в различных по геодинамическому развитию регионах. При этом изучены углы в парагенезисах, соответствующих не только главному сместителю1-го порядка (Y-тип), но и второстепенным опережающим разрывам (R-, t-, n-серии). Для решения этой задачи использованы трещинные сети в точках наблюдения (раздел 3.2), выбранных из основной базы данных (глава 2).

Исследование углов между сопряженными системами трещин скалывания проведено на основе структурно-парагенетического анализа с применением эталонных трещинных сетей. Поскольку морфогенетический тип разлома используется соответствующего известен, эталон типа, В котором магистральный сместитель (Y) имеет ориентировку (азимут и угол падения), соответствующую полевым данным о залегании разлома и положении главной системы трещин (для разрыва Ү-типа) в трещинной сети. Каждая диаграмма, следуя методике, совмещалась с эталонным трафаретом (рис. 31). Для определения угла между сопряженными системами трещин, а также положения осей напряжений в пространстве, на диаграммах отмечались максимумы полюсов найденных пар сопряженных (главных и второстепенных) систем трещин, соответствующих каждому из эталонных разрывов Y-, R-, R'-, t-, t'-, n-, n'- типа. Последние формируются в различных локальных полях напряжений и принадлежат к разным морфогенетическим типам (сдвиг, сброс, взброс, надвиг, в том числе и промежуточные типы – сдвиго-сброс, взбросо-сдвиг и др.).

Как видно из приведенных примеров (рис. 31), положение систем трещин по большому счету совпадает с эталонным, но, как правило, на некоторый угол отклоняется от него по причине разнообразия природных условий деформации. Эти отклонения отражаются в вариациях углов между системами трещин, которые могут быть связаны с глубиной формирования сколов, с типом пород и неоднородностями среды [*Расцветаев, 1987*], а также с активизацией опережающих трещин на более поздних стадиях развития разломной зоны, усложняющей форму отдельных максимумов (направленность разбросов в положении составляющих их трещин). Как упоминалось ранее, разрывные сети в конкретных разломных зонах обычно не содержат полного набора разрывов эталонного парагенезиса.



Рис. 31. Интерпретация природных разрывных систем путем совмещения эталонных диаграмм (вверху) с диаграммами природной 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), сдвиго-взброса и взбросо-сдвига (г), сдвиго-сброса и сбросо-сдвига (д); 2 – второстепенные и дополнительные системы трещин; 3 – изолинии плотности полюсов трещин.

Далее сравнивались значения угла между аналогичными сопряженными системами трещин из разных точек наблюдения вблизи разломов каждого морфогенетического типа, а также определялась ориентировка осей главных нормальных напряжений.

Все частные диаграммы были разделены на три группы по морфогенетическому типу главного разломного сместителя (взброс, сдвиг и сброс) и использованы для построения трех сводных диаграмм (рис. 32). На этих диаграммах в одну точку (рис. 32 А) сведены все полюсы плоскостей сместителей (Ү-тип) путем поворота на стереографической сетке Вульфа



Рис. 32. Результирующие диаграммы ориентировок трещинных систем для парагенезиса взброса (данные по 33 точкам вблизи взбросовых разломов):

А – максимумы систем трещин, соответствующие разломам 1-го (У-типа) и 2-го (-R, -t, п-типа) порядков, на которых каждая точка обозначает систему трещин;

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).

(сдвиги – в вертикальное положение, сбросы и взбросы – под углом падения 60° и 50°). 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 сводных диаграмм позволил оценить степень разброса в ориентациях всех систем трещин, соответствующих Ү-сместителю и мелким разломам в R-, t-, n-сериях (рис. 32 Б); в итоге определить их усредненное положение (рис. 32 В).

По сводным диаграммам проведена реконструкция ориентировок осей главных нормальных напряжений с использованием метода М.В.Гзовского [*Гзовский, 1975*] для каждой серии сопряженных разломов (рис. 33). Если рассматривать оси напряжений, восстановленных по разным сериям разрывов, то у взбросов для всех серий они практически совпадают друг с другом (рис. 33 А), у сдвигов – в R-серии имеют незначительное отклонение (рис. 33 Б), а у сбросов – в п-серии смещены на угол почти 15° от расположенных вместе осей в остальных сериях (рис. 33 В). Причина, по-видимому, в небольшом количестве в базе данных сбросовых точек, имеющих, кроме того, неполные





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 п-серии; 6 – плоскость главного сместителя (Y-тип) и направление смещения по нему.

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 (по [Семинский, 2003]). Исходя из этого, наиболее верным решением будет принять за основное положение осей напряжений для сбросовой ситуации то, которое восстановлено по опережающим разрывам R и t-серий (рис. 33 В). В целом оси напряжений, реконструированные сводной на 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; у сбросов она расположена под углом 50°, что, по-видимому, связано с меньшей степенью транспрессии при деформации в зонах растяжения, в отличие от зон сдвига и, тем более, сжатия.

Далее исследование заключалось в определении и анализе значений углов между сопряженными сколами разного порядка, во-первых, на уровне трещин (между главной и второстепенной системами в тройках) и, во-вторых, на уровне мелких разломов (между главными системами, соответствующими разрывам 2-го порядка R-, t-, n-типов). Для этого на каждой диаграмме измерялся угол при оси сжатия между сопряженными системами трещин.

Вначале рассмотрим сопряженные трещинные системы, главная система которых соответствует сместителю разлома (Y-типа), и углы между ними, величина которых изменяется в интервале от 69° до 119° (рис. 34). Подсчитан





По оси X – интервалы значений углов (по 5<sup>0</sup>); по оси Y – количество точек наблюдения в выборке (в %) по каждому типу разломной зоны.

размах вариации (определяющий общий разброс данных) значений углов по каждой из трех групп (сбросы, сдвиги, взбросы). В зонах сжатия получен самый большой разброс значений углов – 50°, в зонах сдвига – 35°, а в зонах растяжения – 16°, тогда как минимальные значения углов в выборке у всех типов примерно одинаковы – 69-70°. Анализируя наиболее частые значения углов в разных обстановках, можно увидеть, что в зонах растяжения чаще встречаются углы в интервале 70-74° (40%), в зонах сдвига – в промежутке 80-84° (29%), а в зонах сжатия – в интервале 90-94° (21%) (рис. 34).

Далее были вычислены средние арифметические значения углов по каждой группе диаграмм. При этом из всех трещинных сетей отбирались лучшие представители на основе следующих критериев: большее число совпадений систем с эталонными, отчетливая выраженность парных максимумов разрывов 2-го порядка, отсутствие парагенезисов другого типа. Несмотря на разные средние значения углов в разных динамических обстановках, малые углы (около 70<sup>0</sup>) встречаются в разломных зонах любого типа, большие значения углов (90<sup>0</sup> и более) – только в зонах сжатия, редко – сдвига, что следует учитывать при парагенетическом анализе.

Кроме среднего арифметического определялось значение медианы, которая обычно используется для описания асимметрично распределенных данных, однако ее величины примерно совпали со значениями среднего, что позволило использовать только этот параметр. Для оценки степени колебания данных вокруг среднего арифметического рассчитывалось стандартное отклонение.

Подобным образом были вычислены углы между главной И второстепенной сопряженными трещинными системами (уровень трещин), а также между парами главных системам (уровень реконструированных разломов 2-го порядка R-, t-, n-типов). Поскольку данные для построения диаграмм были собраны в различных природных регионах, выявленные угловые соотношения следует считать усредненными для любого случая, т.е. не содержащими направленного влияния какого-либо из условий деформирования. Результаты исследования углов между сопряженными разрывами, а также эталонные величины аналогичных углов представлены в таблице 9.

Табл. 9 и рис. 34 дают необходимое представление о значениях углов (и их вариациях) между сопряженными разрывами разных порядков – **трещинами** и

**мелкими разломами**, находящимися в зонах влияния более крупных разломов 1-го порядка – сброса, сдвига и взброса.

Таблица 9

## Результаты исследования углов между сопряженными разломами и сопряженными трещинами

кий тип орядка	угол между ра поря	азломам дка:	и <b>2-</b> го	угол между второстепенно треп	івным 1орядка и 1я							
морфогенетичес разлома 1-го по (Ү-тип)	серия и значе- ста морфогенезис ние от разломов угла, °		станд. откл., °	в скобках – тип разлома, которому соответствует пара сопряженных систем трещин	значе- ние угла, °	станд. откл., °	угол между гла сместителем 1-го п осью сжати					
эталонные значения												
все типы	все все типы 60 -		-	все типы 80		-	55					
значения, полученные в результате исследования												
				(Ү) гл.+втор.	75	6						
CBPOC	R и R' (сброс)	54	7	(R') гл.+втор. (R) гл.+втор.	75	8	50					
	t и t' (сдвиго- сброс, сброс)	56	7	(t) гл.+втор. (t') гл.+втор.	82	9						
	n и n' (взбросо- сдвиг, сдвиг)	<b>60</b> 13		(n) гл.+втор. (n') гл.+втор.	88	11						
				(Y) гл.+втор.	79	6						
СДВИГ	R и R' (сдвиг)	53	8	(R') гл.+втор. (R) гл.+втор.	78	10						
	t и t' (взброс)	<b>58</b> 10		(t) гл.+втор. (t') гл.+втор.	91	12	55					
	пип' (сброс)	<b>53</b> 7		(n) гл.+втор. (n') гл.+втор.	78	11						
B3BPOC				(Ү) гл.+втор.	89	10						
	R и R' (взброс)	<b>67</b> 9		(R') гл.+втор. (R) гл.+втор.	92	9	55					
	t и t' (сбросо- сдвиг, сдвиг)	<b>56</b> 9		(t) гл.+втор. (t') гл.+втор.	84	10						
	n и n' (сдвиго- взброс, взброс)	67	13	(n) гл.+втор. (n') гл.+втор.	94	10						

Залитые цветом ячейки в таблице указывают на принадлежность сопряженных сколов к динамической обстановке растяжения (голубой), сдвига (оранжевый) и сжатия (зеленый).

На конкретном фактическом материале установлены средние значения угловых величин между главной и второстепенной системами трещин (главная из которых соответствует частным разрывам магистрального сместителя 1-го порядка Y-типа): 75° - в обстановке растяжения, 79° – в обстановке сдвига, и 89° – при сжатии. Полученные результаты подтверждают приведенные ранее сведения о закономерности распределения угловых значений [*Семинский, 1997, 2003*]. Кроме того, установлены углы между сопряженными системами трещин, главная из которых соответствует мелкому разлому 2-го порядка (R-, R'-,t-, t', п-, п'-типов). Значения угла и разброса значений угла между сопряженными системами трещин имеют большие величины в обстановках сжатия, сдвига, сжатия со сдвигом, сдвига со сжатием (табл. 9).

Углы между системами трещин, относящихся к сопряженным парам мелких разломов 2-го порядка R-, t- и n-типов (табл. 9) в среднем изменяются в интервале от 53° до 67° (эталонная величина – 60°), что соответствует литературным данным (60°±10°) для наиболее общего случая, отраженного на принципиальных схемах [*Wilcox et al., 1973; Hancock, 1985; Sylvester, 1988; Park, 1997*]. Отмечается большое влияние на величину угла локального поля напряжения, что можно увидеть по различию углов в динамических обстановках 2-го порядка, принадлежащих какой-то одной главной. Трещины в целом формируются в более хрупких условиях, чем разломы, поэтому большую роль здесь играют «местные» поля напряжений.

Угол между сопряженными системами трещин (табл. 9) зависит от определенной динамической обстановки, то есть от морфогенетического типа разлома, и увеличивается в ряду – «сброс – сдвиг - взброс». Причем даже у промежуточных типов (сдвиго-взбросы и взбросо-сдвиги, сдвиго-сбросы и сбросо-сдвиги) значение угла стремится к величинам, обусловленным более выраженной компонентой смещения (вертикальной или горизонтальной). Причиной является существенная разница условий деформации в зонах сжатия, сдвига и растяжения.

Процесс разрушения упруго-пластичной среды при растяжении происходит быстрее и проще, чем в сдвиговых зонах, основная причина различий заключается в неравнозначных прочностных характеристиках одной и той при воздействии различных типов силовой же среды нагрузки [Разломообразование..., 1992]. Разломообразование в зонах сжатия – еще более

сложный процесс. Он емок по энергетическим затратам, а разрушению предшествуют более 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. Вероятно, поэтому самый большой разброс значений угла между сопряженными трещинами наблюдается в зонах сжатия. Согласно обобщенным литературным данным – экспериментальным и теоретическим (анализ на основе теории прочности Мора) [Гзовский, 1975; Семинский, 2003], 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. Прочностные свойства горных пород в условиях сжимающих напряжений в 8-10 раз выше, чем в условиях растяжения 1994]. [Разломообразование..., Зоны сдвига в этом смысле занимают промежуточное положение. 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, что является пластической деформации, следствием имеющей место В ходе трещинообразования. Полученные в работе вариации углов в обстановках характеризующихся растяжения, сдвига или сжатия, различными прочностными характеристиками породного массива, соответствуют известным закономерностям.

Кроме того, проанализирована величина угла между сопряженными разрывами более крупного ранга (разломы 2-го порядка R-t-n-типов), которые косвенно проявлены в трещинном парагенезисе разломной зоны 1-го порядка в виде соответствующих систем трещин (табл. 9). Напрямую переносить выводы, сделанные по трещинам, на более крупные разрывы не корректно. 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 извилистую форму; ориентировки соответствующих им троек систем трещин в этом случае слегка варьируют, увеличивая разброс положений отдельных типов разрывов. Выходом из данной ситуации является статистический характер исходных материалов [Разломообразование ..., 1992]. Усреднение данных по многим точкам снижает ЭТИ расхождения. Распределение величин **УГЛОВ** У разломов характеризуется меньшей упорядоченностью, но некоторые закономерности повторяются, например, у разрывов со сбросовой и взбросовой составляющей, которые тяготеют к меньшим (сбросы) и большим (взбросы) значениям углов.

Итак, одной из основных причин различия углов у сопряженных разрывов В зонах разломов является исходная динамическая обстановка, обуславливающая тип деформационного поведения в условиях всестороннего давления. Возникающий в процессе развития разломных зон разворот сколов играет при этом второстепенную роль. Полученные результаты послужили основанием для корректировки эталонных парагенезисов предложенных ранее [Семинский, 2003; 2005], с учетом новых данных (табл. 9) по углам между сопряженными разломами и трещинами, а также ориентировке осей напряжений. Затем первоначальные и исправленные (рис. 35) эталонные трещинные сети (далее – эталон 1 и эталон 2) были сопоставлены с природными сетями с целью оценки значимости внесенных изменений для результатов парагенетического анализа.

В качестве примера анализировались диаграммы, построенные по массовым замерам трещиноватости на участке мыса Улирба (Западное Прибайкалье). На диаграммы накладывались поочередно эталоны 1 и 2 (рис. 36) ДЛЯ наиболее хорошо проявленного морфогенетического типа (с соответствующим углом падения главного разломного сместителя). Отмечалось количество максимумов реальных систем трещин, которые располагались вблизи центров максимумов эталона. По одним системам более точное совпадение имелось у первого эталона, по другим – у второго, так как природные системы трещин имеют некоторый разброс. Разница в единицы градусов между ориентировками аналогичных систем обоих эталонов при С диаграммами на первый ВЗГЛЯД не показывало сравнении явного преимущества одного из них. В связи с этим основное внимание уделялось ориентировкам тех систем трещин, которые дают существенные различия между эталонами 1 и 2 (более 5°). В целом по всем диаграммам суммарное количество совпадений систем трещин было больше с эталоном 2 (примерно на 20%), чем с эталоном 1. Подсчитано также количество совпадений максимумов по каждой точке наблюдения. В итоге более точные соответствия трещинных сетей с эталоном 1 проявлены на семи диаграммах, а с эталоном 2 – на двадцати четырех диаграммах.



Рис. 35. Идеализированные диаграммы приразломных трещинных сетей (эталон 2), составленные по результатам проведенного анализа (табл. 9) для случаев левого сдвига, правого сдвига, сброса под углом 60°, взброса под углом 50°.

А – главный сместитель (Ү-тип) и разломы 2 порядка R-, t-, nтипов (в плоскостях). Б – тройки систем трещин (полюсы плоскостей), соответствующие вышеперечисленны м разломам. 1 – плоскости разломов сдвигового (а), взбросового (б), сбросового (в) типов; 2 – главные системы трещин; 3 – второстепенные и дополнительные системы трещин; 4 – линия и направление смещения на плоскости разлома.



Рис. 36. Схема сравнения эталонов 1 (А) и 2 (Б) на примере 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), сдвиго-сброса (в), сдвига (г); 2 – второстепенные и дополнительные системы трещин; 3 – изолинии плотности полюсов трещин.

Итак, сравнительный анализ эталонов на примере трещиноватости горных пород тестируемого участка показал, что большинство природных трещинных сетей лучше совпадают с эталоном 2, который в большей степени отвечает среднестатистическим закономерностям угловых величин в различных динамических обстановках.

#### 3.2.2. Разрывы 2-го порядка в разломных зонах

Внутренняя структура разломных зон формируется в полях напряжений 2го порядка, являющихся причиной развития второстепенных разрывов (R-, t-, nтипа), проявленных в трещиноватости тройственными парагенезисами трещин. В самом общем случае наиболее благоприятные условия складываются для образования в разломной зоне сколов R- и R'-типов, в меньшей степени t- и t'типов и n- и n'-типов [*Семинский*, 2003]. Используя выборку из базы данных (п. 3.2.1) по разным регионам – точки наблюдения вблизи конкретных разломов морфогенетического была известного типа, исследована частота встречаемости второстепенных полей напряжений и разрывов в выбранных разломных зонах. Для этого необходимо определить ориентировку троек систем трещин на диаграммах и посчитать, какие парагенезисы трещин встречаются чаще в зонах сжатия, сдвига и растяжения.

В качестве исходных материалов использованы те же массовые замеры трещиноватости (п. 3.2.1) вблизи разломов: взбросы (36 штук), сдвиги (20 штук) и сбросы (10 штук), а также результаты структурно-парагенетического анализа, свидетельствующие о наличии второстепенных разрывов в разломной зоне. На диаграммах трещиноватости с помощью эталонных трещинных сетей отмечены парагенезисы систем трещин, характерные для разломных зон определенного типа (например, на рис. 31). В природной разрывной сети обычно встречаются не все трещинные системы эталона, поэтому для каждой диаграммы обозначен «свой» набор систем трещин, проявленный в конкретном обнажении горных пород. Отдельно рассматривались наиболее значимые трещинные сети, в которых эталонный парагенезис был представлен большим лучшим количеством систем трещин И соответствием углов между Основное внимание сопряженными системами. уделялось главной И второстепенной системам в тройках.

Трещинные сети разделены на группы по морфогенетическому типу разломов. В каждой группе подсчитано количество точек (в % от общего), в которых имеются пары сопряженных систем трещин (главная и второстепенная системы в тройственном парагенезисе), соответствующих разным сериям (R, t, n) опережающих разрывов. Кроме того, было определено количество главных систем трещин в природных сетях (в %) по отношению к общему количеству систем в эталоне (табл. 10). В идеализированной сети имеется 15 систем Таблица 10

Морфо- генети- ческий тип разлома	Коли- чество точек наблю- дения	Количество трещинных сетей (в %), в которых имеются главные системы трещин, соответствующие разломам 2-го порядка R-, t-, n-серии			Количество трещинных сетей (в %), в которых имеются две пары сопряженных систем трещин (две главных, две второстепенных), соответствующих разломам 2-го порядка R-, t-, n-серии			Количество главных систем трещин (в %) от эталонного значения (вверху), в том числе количество "слабых" систем (внизу в скобках)		
		R и R'	tиť	nиn'	R и R'	tиť	nиn'	R, R'	t, t'	n, n'
взбросы	36	44	75	78	42	56	67	67 (25)	<b>85</b> (34)	<b>86</b> (15)
сдвиги	20	15	85	80	15	75	50	40 (31)	<b>90</b> (20)	<b>88</b> (35)
сбросы	10	80	60	40	80	30	20	<b>90</b> (22)	75 (50)	50 (67)

Статистика частоты встречаемости разрывов 2-го порядка

в разломных зонах

трещин с учетом того, что некоторые системы совпадают друг с другом по ориентировке. Например, вблизи взбросовых разломов примерно в половине точек (до 44%) наблюдаются разрывы R-серии, а разрывы t- и n-серий

встречаются значительно чаще (до 78%). Сравнительно более высокие значения выделены в табл. 10 жирным шрифтом. На диаграммах некоторые максимумы проявлены слабо (ограничены 1–2 изолиниями плотности), то есть в обнажении горных пород представлены в количестве одной – двух трещин. Такие «слабые» максимумы также были включены в расчет, но при этом отмечалась их низкая достоверность принадлежности к соответствующему парагенезису в виде системы трещин. Выборки по количественно более представленным типам систем трещин – качественнее и достовернее, так как в них наблюдается меньшее количество «слабых» систем.

Несмотря на небольшую статистику, из табл. 10 отчетливо видно, что в каждой из трех групп некоторые типы трещинных парагенезисов встречаются значительно чаще остальных, что характеризует частоту встречаемости второстепенных разломов в крупных разломных зонах. В зонах растяжения чаще встречаются опережающие разрывы R-серии; они образованы в том же напряжений, И магистральный сместитель поле что 1-го порядка И представляют сбросы, падающие навстречу друг другу. Менее часто встречаются разрывы t-серии и наиболее редко – разрывы n-серии, что соответствует данным из работы [Семинский, 2003]. В разломных зонах сдвига и сжатия больше проявлены разрывы t- и n-серий разных типов, но в большей степени – взбросовые и сдвиговые, которые формируются при переиндексации осей главных нормальных напряжений (п. 3.1.1, табл. 8). Отсюда следует, что в сдвига имеются более благоприятные зонах сжатия И условия ДЛЯ возникновения осесимметричного напряженного состояния. 3a счет воздействия всестороннего суммарного давления И дополнительной тектонической нагрузки явление переиндексации осей напряжений происходит более часто при горизонтальном сжатии, чем при растяжении. В этой связи отмечается сходство в строении трещинных сетей вблизи разломов взбросового и сдвигового типов в отличие от трещинных сетей у сбросовых разломов, что свидетельствует о подобии условий разрывообразования в зонах сжатия и сдвига по сравнению с зонами растяжения. Следует отметить, что выявленные особенности встречаемости определенных типов разрывов в разломных зонах характерны для группы дизъюнктивов из собранной базы данных (глава 2) по разным регионам (Прибайкалье, Саяны, Средняя Азия, Вьетнам). В связи с

этим полученные данные можно сравнивать с другими разрывными парагенезисами, встречающимися на этих территориях.

Наличие определенного набора второстепенных разрывов в разломных зонах является косвенным подтверждением близкого расположения сместителя соответствующего типа. Это может помочь при выборе более достоверного решения при парагенетическом анализе диаграмм, а также при определении местоположения разломного сместителя. В качестве примера рассмотрим небольшой участок в Западном Прибайкалье (рис. 37 вверху), на котором по результатам анализа топографической карты (масштаб 1:100000) выделяется линеамент в виде прямолинейной долины, простирающейся примерно на северо-восток 50°, согласно с простиранием оси Байкальского рифта.



Рис. 37. Точки наблюдения с трещинным парагенезисом взбросовой зоны в плане (вверху) и на разрезе АБ (внизу).

1 – простирание долины (а) и профиль исследования разломной зоны с точками наблюдения (б); 2 – точки наблюдения; 3 – элементы залегания главной системы трещин в парагенезисе взброса; 4 – трещинные сети, в которых имеются второстепенные разрывы, статистически наиболее часто встречающиеся в зонах сжатия.

Предполагается, что долина сформировалась по зоне разрывного нарушения. Структурно-геологические наблюдения проводились поперек простирания долины (длина профиля – около 3 км, направление профиля – северо-запад 325°). Изучено восемь коренных выходов, представленных гранитными пегматитами, амфиболитами и мраморами. В пунктах наблюдений сделан массовый трещин, затем построены замер круговые диаграммы трещиноватости. Проведен парагенетический анализ трещинных сетей, в результате которого для каждой точке наблюдения найдено от двух до четырех решений парагенезисов разного типа и ориентировки. Парагенезис взбросовой разломной зоны определен в шести (из восьми) точках наблюдения (рис. 37 внизу), в которых главная система трещин характеризуется примерно  $30-60^{\circ}$ ), одинаковым простиранием (северо-восток совпадающим с направлением долины, а также падением на юго-восток с близкими углами (в пределах 50-80°).

Полученные результаты дают основание сделать вывод о существовании на изучаемом участке разломной зоны, сформировавшейся в условиях сжатия, простирающейся под углом  $\approx 45^{\circ}$  и имеющей ширину, по крайней мере, 2 км. Далее анализировались системы трещин, характеризующие разрывы 2-го порядка в парагенезисах сжатия. При этом были выделены такие трещинные сети, в которых решение взброса отчетливо проявлено на диаграммах по сравнению с другими решениями, а также имеется набор систем трещин, статистически более часто встречающийся вблизи взбросовых разломов (табл. 10). Эти трещинные сети были задокументированы только в двух отмеченных стрелками на рис. 37 точках наблюдения – b1110 и b1023, – вблизи которых и следует предполагать наличие разломного сместителя. Полученный результат подтверждается данными крупномасштабной геологической карты [Федоровский и др., 2009], согласно которой точки b1110 и b1023 расположены у двух синметаморфических сдвиговых швов – зон древних бластомилонитов, являющихся вещественными неоднородностями, благоприятными ДЛЯ концентрации напряжений и возобновления тектонических смещений. При анализе плотности трещин выяснилось, что именно в этих точках наблюдается повышенная плотность трещин (18 и 14 тр./пог. м) – выше средней по профилю, что является дополнительным признаком разломного сместителя.

Таким образом, исследование второстепенных разрывов в рамках парагенетического анализа позволило установить тип разломной зоны, ее ширину и угол падения, а также уточнить местоположение сместителя в условиях слабой обнаженности горных пород и отсутствия прямых признаков разлома (зоны «рыхлых» тектонитов в виде дробления или глинки трения).

По результатам исследований строения сложных сетей трещин на основе структурно-парагенетического анализа сделаны следующие главные выводы.

Подтвердилась установленная ранее [*Семинский, 1997; Семинский, 2003*] зависимость значений углов между сопряженными трещинами от основной динамической обстановки их формирования. Установлено значимое влияние на величину угла локальных полей напряжений 2-го порядка. Величина угла между сопряженными трещинами изменяется в интервале от 75° до 94°, возрастая в ряду обстановок растяжение – сдвиг – сжатие. Подобная зависимость также установлена у разрывов более крупного ранга – разломов 2-го порядка (угол изменяется в интервале от 53° до 67°). Углы между сопряженными разломами меньше, чем между сопряженными трещинами в силу разницы деформационного поведения у разных по размерам объемов горных пород.

Идеализированные трещинные сети в виде эталонных круговых диаграммтрафаретов скорректированы согласно полученным данным по углам между сопряженными разломами и трещинами. Применение новых трафаретов свидетельствует о более точном совпадении эталонных максимумов с природными системами трещин, что повышает достоверность парагенетического анализа.

В результате исследования трещиноватости вблизи разломов известного морфогенетического типа отмечено сходство в строении трещинных сетей в разломных зонах сжатия и сдвига, в отличие от сбросовых зон. Реконструкция полей напряжений показала, что в сбросовых разломных зонах ось сжатия расположена в среднем под углом 50° к плоскости главного сместителя, а в сдвиговых и взбросовых – под углом 55°. При анализе систем трещин, отражающих более крупные разрывы 2-го порядка, выяснилось, что вблизи

сбросов чаще встречаются разрывы R-серии, а вблизи сдвигов и взбросов – t- и n-серий. Данные особенности трещинной структуры свидетельствует о подобии условий разрывообразования в зонах сжатия и сдвига по сравнению с зонами растяжения.

В целом новый методический подход к структурно-парагенетическому анализу хаотической трещиноватости на основе сравнения природной сети трещин с эталонными трещинными сетями позволяет реконструировать поле морфогенетический напряжений, установить ТИП разломной 30ны, ee ориентировку и границы, особенности внутреннего строения в отношении второстепенных разрывов. Метод успешно применяется даже в условиях отсутствия структурных данных о тектонических подвижках и прямых признаков разлома, а при увеличении площади исследования и количества пунктов наблюдения помогает восстановить напряженное состояние для участков и структур более крупного масштабного ранга. Возможности данного подхода дают основание считать новую методику эффективной составляющей комплексных исследований разломных зон земной коры.

#### Глава 4

### ВОЗМОЖНОСТИ АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ СЕТЕЙ ТРЕЩИН НА ПРИМЕРЕ УЧАСТКА «ТАЖЕРАН» (ЗАПАДНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)

Подвижные зоны земной коры, в которых наблюдается повышенная плотность разломов, отличаются более сложным строением, чем разделяемые ими сравнительно стабильные блоки. Несмотря на то, что в таких тектонически регионах с многоэтапной историей развития, активных например, В Прибайкалье, преобладают по распространенности сложные хаотические трещинные сети (глава 2), применение нового подхода к структурнопарагенетическому анализу дает возможность получить важную информацию о структуре разломных зон и напряженном состоянии массивов (глава 3). Данный метод может успешно дополнять известные приемы и способы исследования разломных зон в плане определения их типа, парагенезиса вторичных разрывов и полей напряжений. При условии массового площадного изучения трещинных парагенезисов новый подход также позволяет установить закономерности возникновения и развития разрывов более крупного ранга, то есть в процессе напряженного состояния перейти от реконструкции локальных полей напряжений в отдельных пунктах наблюдения к региональному полю (поранговый анализ) [Семинский, Черемных, 2011, Семинский и др. 2013].

Увеличение количества исходных данных и пунктов наблюдения повышает достоверность и эффективность парагенетического метода. В связи с этим необходимо апробировать его применение с использованием большого фактического материала, имеющего площадное распространение, тем более, что ранее анализ осуществлялся предшественниками и нами только в профильном варианте. В качестве полигона для площадных исследований был выбран участок «Тажеран» на территории Тажеранского сиенитового массива в Приольхонье (Западное Прибайкалье), для которого имеется крупномасштабная составленная геологическая В.С.Федоровским, Е.В.Скляровым, карта, А.М.Мазукабзовым и другими авторами [Федоровский и др., 2009]. Задачами исследования были картирование трещинно-разрывной структуры участка с использованием большого статистического материала по трещиноватости,

реконструкция напряженного состояния разного масштабного уровня путем порангового анализа, а также оценка степени сложности трещинных сетей с использованием предложенных в диссертации количественных параметров. Таким образом, будет, во-первых, осуществлена проверка эффективности разработанного методического подхода, и, во-вторых, получена качественно новая информация о тектонофизических условиях формирования одного из сложно дислоцированных участков земной коры Приольхонья.

# 4.1. Особенности геологического строения и формирования Тажеранского массива сиенитов в Приольхонье

Тажеранский массив находится в Приольхонье, которое охватывает узкую полосу побережья в центральной части Западного Прибайкалья, а также остров Ольхон (рис. 38). Важнейшими особенностями геологического положения Приольхонья [*Кочнев, 2007*] являются:

 – его принадлежность к Байкальской рифтовой зоне кайнозойского возраста;
– непосредственная близость к границе крупных геотектонических структур – Сибирской платформы и гетерогенного Саяно-Байкальского складчатого пояса;
– положение в окраинной части складчатого обрамления платформы – на северо-западном фланге Байкальской горно-складчатой области.



Рис. 38. Местоположение участка «Тажеран» в Западном Прибайкалье. Красным контуром показан Тажеранский массив сиенитов, белым пунктиром – Приморский разлом. Такая геотектоническая позиция региона обусловила неоднократное проявление здесь разновозрастных эндогенных и экзогенных геологических процессов, в результате чего сформирована сложная геологическая структура.

В тектоническом отношении территория Приольхонского плато относится к Саяно-Байкальскому складчатому поясу и отделена с северо-запада от Сибирской платформы древним коллизионным швом. Приморский сегмент шва, обнажающийся В пределах изучаемого краевого региона, был неоднократно активизирован, в том числе как сброс в позднекайнозойскую эпоху формирования Байкальского рифта. Тажеранский массив расположен непосредственно на западном берегу озера Байкал в 20 км юго-западнее южной оконечности острова Ольхон и занимает площадь приблизительно 8 км<sup>2</sup>. В современном срезе здесь вскрыты только глубинные горизонты земной коры [Федоровский и др., 2010].

Сложное геологическое строение района обусловлено длительной историей тектонического развития, в течение которой происходило причленение к Сибирскому кратону различных по геодинамической природе террейнов и в итоге – формирование сложного по строению Саяно-Байкальского коллизионного пояса (рис. 39).



Рис. 39. Схема основных тектонических структур Южной Сибири (по [Федоровский и др., 1995; Добрецов, Буслов, 2007; Гладкочуб и др., 2010] с изм.). 1-2 – Сибирский кратон (1) и его краевой шов (2); 3 -Ольхонский террейн; 4 местоположение участка исследований «Тажеран».

Предполагается [Федоровский, 1997], что в раннем палеозое (ранний кембрий) существовал отдельный Ольхонский блок (террейн) континентальной коры, к западу от которого находилась Сибирская материковая плита, а к востоку – Баргузинский микроконтинент с его активной окраиной и островными дугами. В раннем ордовике (приблизительно 500 млн лет назад) осуществляется столкновение островной дуги и Ольхонского террейна,

сопровождающееся покровным и купольным тектогенезом. Затем в режиме «косой» коллизии происходит столкновение террейна с Сибирской плитой, сопровождающееся тотальным развитием глубинных вязких сдвигов, преобразовавших на фоне регрессии метаморфизма все ранее возникшие структуры. К этой стадии приурочено внедрение многочисленных интрузий (в том числе – Тажеранского массива), возраст которых варьирует в интервале 470–460 млн лет [Гладкочуб и др., 2010].

Природа сдвигового тектогенеза обеспечила локальное проявление растяжения, которые в глубинных условиях коры предопределило локализацию зон присдвигового мантийного и корового магматизма. В конечном итоге вся территория Ольхонского региона оказалась «нарезанной» на многочисленные разделенные бластомилонитовыми швами узкие линзы и полосы (сдвиговые пластины), простирающиеся примерно на северо-восток и огибающие в виде сигмоид более жесткие тела массивов метагабброидов и ультрабазитов [Федоровский, 1997; Федоровский и др., 2010]. Почти вся площадь региона метаморфическими от занята породами эпидот-амфиболитовой ДО гранулитовой фации, кроме центральных частей крупных массивов габброидов, сиенитов и щелочных сиенитов [Конев, Самойлов, 1974; Федоровский, 1997; Федоровский и др., 2010 и др.]. Тажеранский массив расположен в центре крупной сдвиговой петли образованной метаморфитами [Федоровский и др., 2010] (рис. 40). Кроме сиенитов и нефелиновых сиенитов, в строении земной коры изучаемого района участвуют породы рамы (амфиболиты, мраморы, кварциты), а также субщелочные микрогаббро, прорывающие сиениты. Широко представлены гранитоидные жильные серии, а в северной части района значительные площади занимают роговики по породам основного состава [Федоровский и др., 2010].

История формирования Тажеранского массива [Конев, Самойлов, 1974; Федоровский и др., 2010], включает три этапа: внедрение габброидной магмы (бирхинский комплекс – 499 млн. лет), внедрение щелочной магмы (щелочные сиениты, затем нефелиновые сиениты – 471 млн. лет) и внедрение субщелочных габброидов. Вопрос о парагенезисе сиенитовых и базитовых магм в пределах Тажеранского массива остается до конца не выясненным. Геологические соотношения свидетельствуют о субсинхронности субщелочных



Рис. 40. Геологическая карта массива Тажеран [Федоровский и др., 2009].

габброидов и сиенитов (471 млн. лет). Предполагается синхронное формирование обоих типов сиенитов. Своеобразные по форме включения («жилы») бруситовых мраморов (467 млн. лет) пересекают и сиениты, и габброиды. Возраст субщелочных габброидов попадает в промежуток 467–471 млн. лет.

Район исследований отличается не менее сложным разломным строением. Участок «Тажеран» расположен в центральной части Байкальской рифтовой зоны (северо-западный борт рифтовой впадины) – одной из крупнейших современных структур растяжения на границе Сибирского и Забайкальского блоков литосферы. Элементы разломной сети возникали и поэтапно развивались в соответствии с действующими в определенные моменты времени

102

тектоническими напряжениями. Геодинамика данной территории отличается проявлением различных по типу и возрасту полей напряжений, о чем свидетельствует структурный анализ и реконструкция осей палеонапряжений, проведенная на базе применения методов кинематического анализа трещин [Delvaux et al., 1995, 1997 и др.]. В течение длительного периода дорифтового развития (палеозой – мезозой(?)) участок земной коры в центральной части рифта в разное время испытывал субмеридиональное, СЗ-ЮВ и субширотное сжатие, в начальной стадии зарождения проторифта (кайнозой, поздний олигоцен – ранний плиоцен) – субмеридиональное и СВ-ЮЗ сжатие, СЗ-ЮВ растяжение и левый сдвиг по субширотному направлению, а в стадии активного рифтообразования (поздний плиоцен – голоцен) – СЗ-ЮВ растяжение [Шерман, Днепровский, 1989; Delvaux et al., 1995, 1997; Леви и др., 1995; San'kov V.A. et. al., 1997; Мац и др., 2001; Парфеевец и др., 2002; Логачев, 2003 и др.]. Несмотря на проявление динамических обстановок разного возраста и типа, ориентировки главных разрывных элементов в разломной структуре северо-западного борта рифтовой впадины были предопределены положением окраины Сибирского кратона и сформированного вдоль нее краевого шва (рис. 39). В работе [Кочнев, 2007] приведен обзор изученности разными исследователями разломной тектоники Западного Прибайкалья и Приольхонья в частности.

Разрывная Приольхонья структура включает элементы разного масштабного ранга. Разломы Байкальского рифта, в том числе центральной его части, по количественным параметрам (протяженность, глубина заложения и др.) подразделяются на генеральные, региональные и локальные [Шерман, 1977; Плешанов, Ромазина, 1981]. Они отличаются друг от друга внутренним строением, обусловленным закономерным сочетанием структурных элементов зоны сместителя и его крыльев, генезисом и характером проявления в рельефе. Морфогенетический тип одного и того же разлома на разных этапах зависимости от изменения ориентировки активизации менялся в поля тектонических напряжений. В Приольхонье наиболее распространены сбросы, сбросо-сдвиги, взбросы, взбросо-сдвиги и разломы без смещения – зоны трещиноватости [Шерман, 1977; Плешанов, Ромазина, 1981]. Генеральные разломы представляют структуры, которые возникли в процессе активизации докайнозойских разрывных нарушений. К ним относятся Приморский разлом и

группа разломов западной береговой линии Байкала и восточного побережья острова Ольхон (Морской или Ольхонский разлом Обручевской разломной системы). Они ограничивают с северо-запада (Приморский) и с юго-востока (Морской) тектонический блок Приольхонского плато. Протяженность этих разломов, длительность развития и глубина проникновения подтверждена геофизическими данными. Приморский разлом на стадии кайнозойской активизации имеет протяженность почти 200 км с глубиной проникновения не менее 10 км и, таким образом, является наиболее крупным разрывным нарушением района. Изучение скрытого под водой Морского разлома прямыми структурными методами невозможно, однако анализ приразломных структурных элементов в зоне его влияния свидетельствует о многих общих чертах с Приморским разломом. Региональные разломы представляют дизъюнктивы разновозрастного, но преимущественно докайнозойского заложения, тяготеют к внутри- и межвпадинным перемычкам рифтовой зоны. Локальные разломы, преимущественно кайнозойского возраста заложения, определяют внутреннюю структуру небольших впадин и перемычек [Шерман, 1977]. К разрывам высшего масштабного ранга относятся тектонические трещины, совокупности которых отражают характер деформаций небольших объемов горных пород.

В отношении возраста известные разломы Приольхонья в работе [Кочнев, 2007] разделены на 5 групп: древние долгоживущие, раннесинметаморфические соскладчатые, позднесинметаморфические позднескладчатые, ранние постметаморфические (дорифтовые), поздние постметаморфические (рифтогенные). Этапы активизации разломов Приольхонья (докайнозойский и кайнозойский) и особенности кинематики движения масс земной коры по разломам также рассмотрены в работах [Плешанов, Чернов, 1968; Плешанов, Ромазина, 1981] в исторической последовательности (рис. 41). К категории разломов докайнозойского этапа можно отнести в первую очередь глубинные Приморский (а точнее, коллизионный шов) и Морской разломы. Наиболее значимые перемещения данного этапа по окраине Сибирской платформы (на месте коллизионного шва, включающего Приморский разлом) происходили в раннем палеозое в обстановке сжатия, формируя при этом крупнейший взброс. Также для докайнозойского этапа активизации характерны разломы длиной до первых десятков километров, которых типично кулисообразное для

расположение частных разрывов с развитыми зонами катаклазитов, бластомилонитов, будинажа и интенсивного смятия. Разломы образуют границы между блоками с резко различным внутренним строением и характером метаморфических изменений горных пород. К тектоническим нарушениям данного временного этапа относятся также наиболее крупные поперечные по отношению к Байкальской впадине разломы СЗ-простирания (330–360°) с крутым падением сместителей. Они менее распространены, имеют меньшую протяженность и мощность тектонитов, характеризующихся слабой степенью метаморфизма; некоторые соответствуют раздвигам и сбросо-сдвигам с малой амплитудой смещения. Еще меньше распространены субмередиональные, субширотные и пологопадающие разрывные нарушения.





1 – крупные разломы: Приморский (1), Ольхонский (или Морской) (2); 2-4 – разрывные нарушения: 2 – докайнозойских этапов активизации, 3 – олигоцен-миоценового этапа активизации, 4 – эоплейстоцен-голоценового этапа активизации.

По целому ряду структурно-геоморфологических признаков в Приольхонье выделены разломы кайнозойской активизации [Плешанов, Ромазина, 1981]. Структурные элементы этих разломов, в отличие от более ранних,

соответствуют самым высоким структурным уровням разломов. Их образование шло в верхних частях земной коры, реагирующей на стресс как твердое тело [Шерман, 1977]. Поэтому обычно по тектонитам и структурным формам древних разломов развиваются зоны интенсивного дробления и брекчирования, сопровождаемые трещинами, часто имеющими поясное строение в пространстве. На кайнозойском этапе активизации разломов отчетливо выделяются два подэтапа [Плешанов, Ромазина, 1981], разделенные периодом относительного тектонического покоя: конец палеогена-миоцен и нижний эоплейстоцен (средний плиоцен) – настоящее время. В конце палеогена движений началась активизация некоторым докайнозойским ПО крутопадающим разрывам северо-восточного направления. Поперечные разрывные нарушения проявлены слабее, они обычно не выходят за пределы одного блока, ограниченного продольными разрывами. Иногда поверхности разломов искривляются, следуя контактам магматических тел. Наиболее часто фиксируются сбросы и сбросо-сдвиги небольшой амплитуды [Плешанов, 1968]. В нижнем эоплейстоцене произошло резкое усиление Чернов, тектонических движений. Преобладающий тип смещений - сбросы, сбрососдвиги и раздвиги. В это время активизируются крупные разломы Приморской Обручевского сброса, Морской ветвей наследующие И ориентировку докайнозойской структуры (рис. 41). Об унаследованности и активизации древней разломной сети в Байкальской рифтовой зоне упоминают многие авторы [Флоренсов, 1977; Шерман, 1977; Плешанов, Чернов, 1968, 1971; Замараев и др., 1972, 1979; Шерман, Днепровский, 1989; Балла и др., 1990; Разломообразование ..., 1992; Мац и др., 2001 и другие].

Внутреннее строение изучаемых разломов определяется тем или иным уровнем эрозии, физическими свойствами среды, в которой они развивались, динамическими условиями и количеством повторных этапов активизации [Плешанов, Ромазина, 1981]. Для регионального разлома свойственно наличие вертикальной зональности (5 глубинных уровней), определяющей характер разломообразования – температурный градиент, скорость деформирования и дифференциальные напряжения, действующие на фоне всесторонних давлений [Шерман, 1977, 2002; Гинтов, Исай, 1988; Метаморфизм ..., 2001]. В зависимости от этих условий в разломных зонах формируются различные типы тектонитов: от брекчий, глинки трения и катаклазитов в верхней части разреза

ДО милонитов, ультрамилонитов, бластомилонитов на глубине. Трещинообразование возможно на первых двух уровнях (примерно до 7–10 км), а метаморфические преобразования начинаются с третьего уровня. В [Кочнев, Иванова, 2008] работе на примере Приморского разлома рассматривается термодинамический вертикальный разрез земной коры Приольхонья, состоящий из 4-х уровней – от экзозоны и эпизоны до мезозоны и катазоны. Структура каждого уровня характеризуется специфическим набором структурных форм, деформаций, степенью метаморфизма типом И деформированности пород.

того, активизации движений Кроме В результате по разломам осуществляется последовательное наложение более молодых внутри- и приразломных структурных форм на древние, образовавшиеся зачастую в иных термодинамических условиях [Плешанов, Ромазина, 1981]. В таких случаях приразломные структурные парагенезисы можно классифицировать соответственно как прогрессивные (первичные, типоморфные) и регрессивные (вторичные, наложенные) (по [Кочнев, Иванова, 2008]). В Приольхонье в современном срезе встречаются все типы тектонитов, сформированные на разных глубинных уровнях. В работе [Кочнев, Иванова, 2008] проанализирован характер наложенных структур для разных термодинамических уровней (полное или частичное их формирование для разных градиентов уровней поднятия), на основе чего предполагается достаточно быстрый подъем данного блока земной коры.

Что касается изученности разрывной структуры самого Тажеранского массива, то на данном участке имеются древние разломы, установленные [Конев, Самойлов, 1974] в поле по зонам милонитизации, брекчирования и сдвиговым смещениям пород, которые, по мнению цитируемых авторов, последовали вскоре после внедрения щелочных интрузий. Авторы не исключают существование более поздних тектонических движений различного масштаба в мезокайнозое, но разломы данного возраста в работе [Конев, Самойлов, 1974] не описаны. На геологической карте В.С.Федоровского с соавторами постметаморфические разломы отмечены в центральной части Тажеранского массива в районе горы Мраморная. Мелкие разрывы и современные разломы, связанные с формированием впадины Байкала, на карте [Федоровский и др., 2009] не показаны.

Изучение тектонических разрывов самого мелкого масштабного ранга – трещин проводилось на территории Приольхонья многими исследователями [Плешанов, Чернов 1968; Замараев и др., 1979; Плешанов Ромазина 1981; Шерман, Днепровский, 1989; Разломообразование..., 1992, 1994; Семинский, 1994, 2003; Delvaux et al., 1995, 1997; Леви и др., 1997; San'kov V.A. et. al., 1997; Парфеевец и др., 2002; Лунина и др., 2002; Семинский, Черемных, 2011; Черемных, 2011] с использованием кинематических, парагенетических и других тектоническая трещиноватость методов. В целом пространственно И генетически связана с древними структурами [Замараев и др., 1979]. Например, в густой трещинной сети 500-метровой зоны сместителя Приморского разлома отмечены три наиболее четко выраженные системы трещин с поясным расположением [Плешанов, Ромазина, 1981]. В более широкой зоне влияния Приморского разлома практически во всех точках наблюдения установлены три примерно перпендикулярные друг другу сопряженные системы трещин, ориентировка которых определяется морфогенетическим типом разлома [Семинский, Гладков, 1991, Семинский, 2003]. При детальном изучении района Приольхонья, имеющего высокую плотность разломов, выясняется сложное строение трещинных сетей, отражающих положение более крупных разрывов, По результатам И распределение по площади. спецкартирования ИХ центральной части Приольхонья на основе изучения трещиноватости (анализ троек систем трещин) составлены схемы сравнительно крупных разломных зон разного типа и простирания [Семинский, 1994, 2003]. Тажеранский массив попадает в зону влияния разноориентированных сдвиговых и сбросового разломов, т.е. принадлежит к тектоническому узлу со сложным внутренним строением. Статистическая изученность трещинных сетей Тажеранского массива в цитированных работах ограничивалась единичными пунктами наблюдения с массовыми замерами.

Итак, район и участок исследования имеют сложное тектоническое «Тажеран» строение, при ЭТОМ участке ранее проводилось на не крупномасштабных исследований разрывной структуры (трещинные, разломные сети) и полей напряжений разного иерархического уровня. Следуя поставленным в данной работе задачам, участок использован в качестве полигона для применения нового подхода к парагенетическому анализу сложных сетей трещин.
#### 4.2. Результаты исследования трещинных сетей

Исходными данными для изучения разрывной структуры участка «Тажеран» послужили материалы, собранные во время экспедиционных комплексных (геолого-структурных и геофизических) исследований в 2010-2011 г.г., проводимых сотрудниками лаборатории тектонофизики ИЗК СО РАН. В геоморфологическом плане территория Тажеранского массива представляет серию невысоких сопок, относительное превышение которых – 100–150 м, абсолютная отметка самой высокой из них – 800 м, что на 350 м превышает уровень озера Байкал. Крутопадающий береговой склон высотой около 150–200 м – это почти сплошное коренное обнажение на протяжении 4 км, тогда как остальная часть массива покрыта тонким слоем делювиальных отложений и задернована [Конев, Самойлов 1974].

Основная часть пунктов наблюдения за трещиноватостью (рис. 42) расположена непосредственно на территории Тажеранского интрузивного массива, сложенного сиенитами, габбро и карбоналитами, а также в поясе метаморфизованных пород (сиенито-гнейсы, амфиболиты, мраморы), окружающем массив к западу и северо-востоку (рис. 40). Несколько точек наблюдения имеются в метаморфических породах по профилю к северо-западу от участка (профиль пересекает долину CB-простирания) и в бухте Орсо – в 2-х



•• 2

Рис. 42. Схема расположения пунктов изучения трещин. 1 – граница Тажеранского массива; 2 – точки наблюдения, в которых произведен статистический массовый замер трещин. Горизонтали рельефа проведены через 100 м. км к северу (на продолжении долины) (рис. 42). Данные по точкам, расположенным вне массива, использованы в структурно-парагенетическом анализе для увеличения базы данных по трещиноватости и, главное, – для сравнения особенностей трещиноватости в интрузиве и породах «рамы».

В 90 пунктах геолого-структурных наблюдения (рис. 42) автором сделано 108 массовых замеров трещин. Расстояние между пунктами в среднем 250–500 м. Количество измеренных трещин в массовом замере зависело от размера коренного выхода и условий обнаженности горных пород; в большинстве точек оно составляет ≈ 100 штук (всего 9296 трещин). Во всех точках фиксировались структурные особенности залегания пород, основные системы трещин, плотность трещиноватости (штук на пог. и кв. метр), зоны повышенной трещиноватости, зоны проявления тектонитов (дробление, глинка трения, милонитизация) как признаки разломных сместителей, кинематические данные (штрихи, борозды и зеркала скольжения на поверхностях трещин, смещения маркирующих слоев, зон, разрывов). По каждому массовому замеру построена стандартная круговая диаграмма трещиноватости в изолиниях (верхняя полусфера, сетка Вульфа) (глава 1), совокупность которых представляла основной исходный материал для оценки степени сложности трещиных сетей и для структурно-парагенетического анализа.

Подавляющее большинство трещин имеет тектоническую природу, что обусловлено местоположением участка в тектонически активном районе. Отсутствие первичных разрывов в данном случае может быть обусловлено влиянием тектонической рамы (напряженное состояние вмещающих горных пород) при застывании массива [Чернышев, 1983], а также перестройками трещинных сетей в ходе многочисленных более поздних этапов деформации. О тектоническом происхождении мелких разрывов на участке «Тажеран» также свидетельствует значительное преобладание сколов над трещинами отрыва (по [Невский, 1979]).

## 4.2.1. Анализ степени сложности сетей трещин

Для оценки сложности трещинных сетей (глава 2) участка «Тажеран» по круговым диаграммам были определены величины средней интенсивности максимума (I<sub>cp</sub>), с помощью которых можно отнести трещинную сеть в каждой

точке наблюдения к хаотическим или системным, а также оценить их относительную сложность в разных пунктах.

Степень сложности трещинных сетей на территории массива близка к среднему значению І<sub>ср</sub> по Приольхонью, равному 4,65% (192 трещинные сети из общей базы данных – глава 2) и в среднем выше (значение параметра I<sub>cp</sub> = 4,7%), чем в точках за границей массива (I<sub>cp</sub> = 5,6%). Большинство трещинных сетей на участке имеет внешне хаотический облик. Более простые системные сети наблюдаются в 20 точках наблюдения, большая часть из которых расположена вне Тажеранского массива либо на его окраине (синие кружки на рис. 43), то есть доля хаотических трещинных сетей (черные кружки на рис. 43) превышает на территории массива намного таковую вне массива. Следовательно, процессы деформации в этих случаях проходили по-разному.



Рис. 43. Схема расположения хаотических и системных трещинных сетей в породах с однородной и линейно-неоднородной текстурой на участке «Тажеран» (А), а также ее совмещение с геологической картой (Б) ([Федоровский, 2004] фрагмент с изменениями). 1 – контур Тажеранского массива (по [Федоровский и др., 2009]); 2-3 – пункты наблюдения, в которых обнажаются породы с однородной (2) и с линейно-неоднородной текстурой (3), нарушенные хаотической (а) и системной (б) трещиноватостью. На геологической карте (Б) цветами обозначены интрузивные и метаморфические горные породы (по [Федоровский, 2004]).

Причина установленного различия, по-видимому, связана с особенностями разных типов горных пород и формами их залегания (структурные и вещественные неоднородности), поскольку интрузивный массив по строению и породному составу отличается от окружающих метаморфических толщ. В связи с этим раздельно проведен анализ степени сложности сетей трещин, развитых в породах с однородной (массивной) текстурой (залитые кружки на рис. 43) и в породах с линейно-неоднородной (полосчатой и сланцеватой) (не залитые кружки на рис. 43) текстурой.

Установлено (табл. 11), что и системные, и хаотические трещинные сети встречаются в породах всех типов, но в большинстве случаев системные сети более развиты в метаморфических толщах, которые отличаются наличием линейных неоднородностей.

Таблица 11

Текстура горных пород	Степень сложности – $I_{cp}$ (%)				Количество трещинных сетей		
	МИН.	макс.	среднее	станд.	всего	системных	системных
			арифм.	ОТКЛ.			(в %)
Однородная	3,1	11,2	4,7	1,2	71	6	8
Линейно-	3,6	13	5,3	1,7	37	14	38
неоднородная							

Степень сложности трещинных сетей (I<sub>cp</sub>) в разнотипных горных породах

Неоднородности в горных породах имеют различные размеры и форму (зерна, слои, блоки, поверхности раздела – контакты, разрывы), что в разных масштабах искажает поле тектонических напряжений. Они становятся концентраторами напряжений, которые вызывают локальные деформации и образование новых неоднородностей, преобразующих В свою очередь распределение напряжений [Лукьянов, 2002]. С.Н.Чернышев считает [Чернышев, 1983], что тензор напряжений в массиве находится в равной зависимости от источника напряжений и состава массива, в котором они возникают – положение осей главных нормальных напряжений корректируется текстурными особенностями горных пород. На примере участка исследования выяснилось, что неоднородности на уровне текстуры горных пород и на уровне форм залегания геологических тел по-разному влияют на формирование разрывных нарушений в локальном масштабе.

Прежде всего, рассмотрим линейно ориентированные неоднородности: линейность минералов в горных породах со сланцеватой и полосчатой

текстурой (рис. 44 слева) (силикатно-карбонатные гнейсы, амфиболиты, мраморы, кристаллические рассланцованные сланцы, разгнейсованные габброиды и пироксениты, гранито-гнейсы и сиенито-гнейсы), а также древние Наличие выраженных зоны бластомилонитов. четко линейных неоднородностей, занимающих весь объем В локальном масштабе исследования, обуславливает резкую неоднородность физико-механических свойств Тектоническая трещиноватость пород. часто формируется ПО плоскостям слоистости, сланцеватости, гнейсовидности, когда предел прочности на отрыв или скалывание достигается вдоль ранее существовавших ослабленных плоскостей раньше, чем вдоль плоскостей действия скалывающих касательных или нормальных напряжений [Невский, 1979; Расцветаев, 1987]. Это оказывается возможным, когда диктуемое напряжениями направление разрывов для изотропного материала, оказывается близким к направлению ослабленных поверхностей, таким образом, анизотропия горных пород в большинстве случаев не определяет положение разрывов, а только вносит в него некоторое дополнительное осложнение [Гзовский, 1975].



Рис. 44. Горные породы с полосчатой (слева) и массивной (справа) текстурой на участке «Тажеран» (масштаб – линейка 1м, фото А.В.Черемных).

Вместе с тем, широкое развитие разрывов, не совпадающих с ослабленными поверхностями, свидетельствует о том, что во многих случаях направление разрывов определяется только действующими в нем напряжениями [Гзовский, 1975]. Вновь образованные сколы могут формироваться даже под очень острым углом к линейным текстурным плоскостям – вероятно по причине достаточно интенсивных напряжений, что было зафиксировано нами, например, на мысе Улирба (Приольхонье).

Кроме того, метаморфические породы в силу наличия линейных неоднородностей обладают более упругими деформационными свойствами, что приводит к тому, что в ряде случаев формирование второстепенных опережающих трещин не происходит. При этом образуется более простая системная трещинная сеть с низкой степенью сложности, что наблюдается при массовом замере. Следует отметить, что при статистических площадных исследованиях ЭТО незначительно влияет на результаты структурнопарагенетического анализа трещин. Так, среднеарифметическое количество решений при анализе трещиноватости в линейно-неоднородных породах исследуемого участка равно 2,7, а в однородных – 2,9 (то есть в среднем по 3 решения для одной трещинной сети в тех и других породах). Вместе с тем, необходимо обращать внимание на возможное искажение общего поля напряжений в отдельных локальных точках, для которых характерна неоднородность строения коренного выхода.

Массивная текстура магматических пород участка «Тажеран» (граниты, щелочные и нефелиновые сиениты, габбро, пироксениты, карбоналиты, мрамор) (рис. 43), как относительно однородная среда, не влияет на ориентировку формирующихся трещин и не должна снижать степень сложности сетей трещин. В то же время на участке исследований имеется множество крупных и мелких интрузивных тел неправильной формы (рис. 44 справа), контакты между которыми способствуют локальному искажению направления действия внешних полей напряжения и появлению разрывов с разными ориентировками. В ходе площадных исследований трещинных сетей методом структурно-парагенетического анализа необходимо выбирать более однородные по составу и структуре коренные выходы пород.

Кроме того выяснилось, что в породах с визуально слабым проявлением линейных неоднородностей, таких, как, например, сиенито-гнейсы с нечеткой «размытой» полосчатостью и незначительной вытянутостью минеральных зерен, степень сложности трещинных сетей в среднем такая же, как и в массивных интрузивных породах. Это свидетельствует о сходстве

рассматриваемых типов пород в плане трещинообразования [Невский, 1979], в данном случае их можно считать относительно однородной средой.

Влияние неоднородностей геологической среды на поле напряжений и деформации рассматривали В.Г.Талицкий, П.Н.Николаев, тектонические А.В.Лукьянов, Л.М.Расцветаев, В.В.Белоусов, М.А.Гончаров, М.Л.Копп и другие исследователи. Неоднородности среды играют важную роль при формировании и развитии структурных парагенезисов [Талицкий, 1999]. Структурная неоднородность, гетерогенность среды существует на всех масштабных уровнях от микроскопического до глобального [Лукьянов, 2002]. Важную роль в тектонофизическом анализе играет относительный размер элементарных неоднородностей в сравнении с общим размером всей исследуемой структурной системы. Если отличие состоит в значении одного – двух порядков величины, такие неоднородности могут рассматриваться как макроскопически значимые структурные элементы данной системы (образуют эффективную неоднородность данном масштабе исследования) ee В 2002]. Пример – линейные неоднородности и [Расиветаев, контакты геологических тел в масштабе обнажения горных пород. В данном случае линейные неоднородности в породах занимают обычно весь объем на уровне локального коренного выхода, поэтому их влияние, понижающее степень представляется большим, сложности трещиноватости, чем действие нелинейных неоднородностей в виде неправильных контактов тел, которые не имеют повсеместного распространения.

Итак, при исследовании сложности трещинных сетей участка «Тажеран» (Приольхонье) выяснилось, что на территории Тажеранского сиенитового массива ПО сравнению с окружающими метаморфическими породами наблюдается преобладание хаотических сетей трещин над системными. Это связано со структурными и вещественными неоднородностями локального уровня, которые по-разному влияют на формирование трещинных парагенезисов зависимости типа неоднородности, степени В ОТ ee распространения и характера проявления в горной породе. Дополнительной причиной формирования сетей в массиве хаотических трещинных является более хрупкое поведение интрузивных пород по сравнению с реакцией на нагрузку слоистых метаморфических пород. В линейно-неоднородных породах проявлены преимущественно те ориентировка была поля, которых

благоприятна для возникновения разрывов вдоль плоскостей гнейсовидностисланцеватости. Остальные поля (вместе с этими) были реконструированы в магматических породах.

Таким образом, в работе выделено два фактора, влияющих на степень сложности тектонических трещинных сетей – многоэтапность геологического развития массива (глава 2) и строение (структура, текстура) горных пород. Главным фактором является многоэтапность развития, количество действовавших полей напряжений, что отчетливо проявляется на примере однородной среды. Неоднородности в каждом конкретном случае привносят определенные особенности в строение локального поля напряжений, что приводит к небольшим изменениям ориентировок плоскостей разрывов и к отсутствию второстепенных разрывов. Зависимость от неоднородностей нивелируется проведением площадных статистических исследований, когда даже при некоторых локальных искажениях основное региональное поле будет выделено большинством решений, а также путем выбора для исследований более однородных по составу и структуре обнажений горных пород.

### 4.2.2. Структурно-парагенетический анализ сетей трещин

Структурно-парагенетический анализ трещинных сетей участка «Тажеран» включает в себя два этапа: определение напряженного состояния локальных объемов горных пород [*Семинский, 2003*] и реконструкцию полей напряжений регионального уровня [*Семинский, Черемных, 2011*]. Полученные результаты являются основой для составления схем разломных зон, соответствующих разных стадиям разрывообразования в регионе.

#### Локальные поля напряжений

На первом этапе анализа проведено определение <u>локальных стресс-</u> <u>тензоров</u> на уровне коренного выхода горных пород в каждом пункте наблюдения исследуемого участка. Реконструкция напряженного состояния (и соответствующего ему положения зоны скалывания 1-го порядка) осуществлялась, согласно методике (п. 3.1.1 глава 3), путем сопоставления построенных по массовым замерам структурных диаграмм с трафаретами эталонных трещинных сетей, скорректированными по углам скалывания (п.

116

3.2.1 глава 3). По совпадению природной и эталонной совокупностей трещин получены решения, суть каждого из которых заключается в реконструкции 1) парагенезисов трещин для разломных зон определенного типа и ориентировки (сдвиговая, взбросово-надвиговая или сбросовая), а также 2) соответствующего напряжений, поля тектонических под влиянием которого они были сформированы. В большинстве коренных выходов для одной трещинной сети найдено несколько решений (парагенезис – поле напряжений) разной степени достоверности, как, например, три решения для точки наблюдения b1072 (рис. 45). Это свидетельствует о разновозрастных напряженных состояниях, имевших место в процессе тектонического развития изучаемого участка земной коры.



Рис. 45. Пример парагенетического анализа трещинной сети (три решения) в точке наблюдения b1072.

А – сброс, Б – левый сдвиг, В – взброс.

Вверху – эталонный парагенезис, наложенный на диаграмму трещинной сети; в середине – элементы и тип зоны скалывания; внизу – ориентация осей напряжений.

1 – полюсы главных систем трещин, характеризующих сопряженные разрывы 2-го порядка – сдвига (а), взброса (б) и сброса (в); 2 – полюсы второстепенной и дополнительной систем трещин; 3 – главный сместитель (Y) и разломы 2-го порядка (R, t, n) – сдвиги (а), взбросы (б) и сбросы (в) в зоне скалывания; 4 – оси главных нормальных напряжений: минимального (а), промежуточного (б) и максимального (в) сжатия (выход на верхнюю полусферу).

Всего на участке «Тажеран» по результатам структурно-парагенетического анализа сетей трещин (108 диаграмм) получено 308 решений локальных полей напряжений для разных морфогенетических типов разломных зон, в т.ч. 106 сбросов, 115 взбросов, 43 правых и 44 левых сдвигов. На каждой диаграмме проявлено от 1 до 5 решений, из которых 1-2 выражены более отчетливо (наиболее достоверные). Степень достоверности полученных решений определялась по ряду структурных параметров: угол между сопряженными системами трещин, разбросы систем трещин, сколы и отрывы и др. (глава 3, п. 3.1.2). Также принимались во внимание характерные особенности коренного выхода, а именно – элементы залегания пород и контактов крупных трещин, кинематических следов, зон повышенной трещиноватости и зон тектонитов. Количество решений в одной точке связано со степенью сложности трещинной сети, как с косвенной характеристикой этапности развития породного массива; в системных сетях, как правило, реконструируется меньше решений по сравнению со сложными хаотическими [Бурзунова, 2012]. Между количеством решений и значением степени сложности сети для участка «Тажеран» действительно имеется слабая корреляционная связь с коэффициентом равным -0,4.

Как показано ранее (глава 3, п. 3.2.2), при статистическом исследовании трещинных сетей вблизи разломов наличие определенного («близразломного») набора второстепенных разрывов парагенезисе В может являться дополнительным признаком близкого расположения разломного сместителя конкретного морфогенетического типа. Из всех 308 решений, таким образом, были выбраны 43 соответствующих парагенезиса: 29 сбросовых, 10 взбросовых и 5 сдвиговых решений. Преобладание восстановленных «близразломных» локальных полей растяжения обусловлено, скорее всего, последним этапом тектонического развития района – СЗ-ЮВ растяжением (необайкальская стадия рифтового этапа согласно [*Мац и др., 2001*] или стадия активного рифта («active rift») по [Delvaux et al., 1997]).

Для того чтобы оценить преимущественные направления реконструированных разломных зон, были построены розы-диаграммы их простираний (соответствующих направлению главных систем трещин) по всем найденным в результате парагенетического анализа решениям (рис. 46). В решениях сброса и взброса преобладают СВ и ВСВ направления, в решениях правого и левого сдвигов - ВСВ, В, ССЗ направления. Отмечается северовосточное (60°) узконаправленное простирание главной системы разрывов у взбросовых решений. По-видимому, поле сжатия в направлении СЗ-ЮВ было достаточно интенсивным: при всестороннем сжатии увеличивается прочность [Разломообразование..., 1994], пород поэтому влияние структурных неоднородностей проявилось в меньшей степени. Как следствие, поле сжатия испытало меньше искажений в массиве, а трещинный парагенезис – меньше простирания. Выявленная ориентировка вариаций сжатия соответствует направлению восстановленных ранее В результате реконструкции палеонапряжений осей СЗ-ЮВ сжатия в Приольхонье [Delvaux et al., 1995], которое имело место в позднем силуре – раннем девоне после формирования самых поздних синметаморфических сдвигов [Скляров, 2001]. Локальные поля СЗ-ЮВ сжатия проявлены на участке повсеместно.



Рис. 46. Розы-диаграммы простирания разломных зон, реконструированных в результате структурнопарагенетического анализа трещиноватости на участке «Тажеран».

Итак, в процессе структурно-парагенетического анализа для каждой точки наблюдения на участке «Тажеран» получены 308 решений по трещинным парагенезисам <u>локального</u> уровня, которые представляют напряженное состояние в сбросовых, взбросовых или сдвиговых мелких разломных зонах. При этом в одной трещинной сети находят отражение два и более разнотипных парагенезиса (например, сдвига и сброса), что свидетельствует о различных напряженных состояниях, имевших место для данного массива горных пород в процессе тектонического развития.

### Региональные поля напряжений

На втором этапе реализации нового методического подхода на участке «Тажеран» был проведен поранговый анализ, то есть переход от <u>локального</u> ранга разломов (зон скалывания) и полей напряжений к <u>региональному</u>. Он осуществлялся в соответствии с принципами, изложенными в статье [*Семинский, Черемных, 2011*], авторы которой на примере анализа локальных стресс-тензоров Прибайкалья выделили разрывы и поля напряжений трех региональных уровней. При этом считалось, что тектонические нарушения более низкого ранга являются структурами 2-го порядка для разломов более высокого ранга. Последние в свою очередь составляют структуру зон еще более крупного ранга и так вплоть до 1-го регионального уровня, на котором в Прибайкалье происходит формирование главных рифтообразующих разломов.

Вначале для исследуемого участка путем сравнения ориентировки и типа локальных разломов (308 решений) с эталонами второстепенных структур (у разлома 1-го порядка) было получено 19 групп решений <u>3-го регионального масштабного уровня</u>, которому соответствуют мелкие региональные разломы, что представлено ниже более подробно.

Локальные решения характеризуют парагенезисы трещин вблизи разломных зон, поэтому они использованы для определения основных направлений зон разломного ранга на изучаемом участке. Так, была построена 308 полюсов (нормалей) сместителей диаграмма плотности реконструированных разломных зон (рис. 47 А). Затем на диаграмме были отмечены максимумы плотности как наиболее часто встречающиеся ориентировки разломных зон, которые показаны также в виде плоскостей – сместителей разломов (рис. 47 Б). Поскольку углы их падения варьируют 70-80°, примерно В пределах разломные ЗОНЫ представлены как субвертикальные плоскости (рис. 47 В). Таким образом, на участке «Тажеран» выделено 6 основных направлений разломных зон, обозначенных римскими цифрами (I, II, III, IV, V, VI).



Рис. 47. Определение основных направлений (римские цифры) зон разломного ранга на участке исследований.

А – структурная диаграмма плотности полюсов (нормалей) разломных зон, реконструированных методом парагенетического анализа трещинных сетей (в изолиниях, верхняя полусфера, максимумы плотности указаны цифрами),

Б – плоскости наиболее часто встречающихся разломных зон (толщина линий пропорциональна плотности).

В – основные направления реконструированных разломных зон (близкие по простиранию направления объединены, в такие как – I, IV, VI).

Каждое из выделенных 6-ти направлений теоретически может быть представлено эталонными зонами 4-х типов: сбросового, взбросового, левосдвигового и правосдвигового – всего 24 возможных разновидности разломных зон, включающих разрывы как 1-го, так и 2-го порядка. По ним далее проведена сортировка всех локальных решений (308 шт.) исследуемого участка на группы (рис. 48), при этом сравнивались ориентировка и тип локальных разломов с эталонными структурами.



направление	природные парагенезисы (308 локальных решений)						
pasilowneix son	взброс	сброс	правый сдвиг	левый сдвиг			
I	34 реш.	21 реш.	нет	5 реш.			
II	27 реш.	19 реш.	9 реш.	9 реш.			
	нет	нет	9 реш.	5 реш.			
IV	7 реш.	19 реш.	6 реш.	3 реш.			
V	нет	нет	6 реш.	5 реш.			
VI	47 реш.	47 реш.	13 реш.	17 реш.			

Рис. 48. Основные направления зон разломного ранга на участке «Тажеран» (римские цифры) и решения реконструированных локальных зон скалывания (308 шт.): роза-диаграмма их простираний (серый цвет – слева) и решения, отсортированные по типу и ориентировке на группы 3-го регионального уровня (справа).

121

Некоторые частные природные парагенезисы подходили к разным эталонам, являясь для них разрывами 1-го порядка Y-типа, или разрывами 2-го порядка R-, t-, n-серий и трансформационного типа. В этом случае каждый из них относился к тому эталону, в котором они являются в первую очередь разрывами 1-го порядка (Y), во вторую очередь – разрывами R-серии и, наконец, – наиболее редко встречающимися разрывами t- и n-серий. Как следствие, в каждой группе присутствуют в основном решения, соответствующие эталонным Y-, R- и R'-разрывам.

Таким образом, получено 19 групп решений (рис. 48 справа) однотипных разрывных парагенезисов 3-го масштабного уровня – мелкие региональные разломы (зоны скалывания) и соответствующие поля напряжений. Самыми представительными по количеству решений оказались группы парагенезисов взброса и сброса с направлениями простираний зон скалывания – I, II, IV, VI.

Для перехода на <u>2-й региональный масштабный уровень</u> некоторые наиболее представительные группы решений 3-го уровня анализировались на принадлежность к более высокому рангу, а оставшиеся группы – на соответствие их второстепенным структурам (2-го порядка), что представлено далее.

На этом уровне в дополнение к используемой методике [Семинский, Черемных, 2011] осуществлялась оценка каждой группы решенийпарагенезисов трещинных сетей с помощью ряда представленных ниже количественных параметров, которые косвенным образом характеризуют ранговые соотношения, а также относительные возраст и интенсивность воздействия рассматриваемого поля напряжений. В число параметров в первую очередь входит количество всех решений в группе, количество наиболее достоверных решений, особенности площадного расположения на изучаемом участке точек из каждой группы, характеристики зон скалывания 3-го регионального уровня, величина угла между сопряженными сколами в парагенезисах и другие.

Подробнее остановимся на особенностях двух последних параметров, так как их использование для решения поставленной задачи по сравнению с другими характеристиками требует объяснения. <u>Реконструированная зона</u> <u>скалывания 3-го масштабного уровня</u> – это разломная зона, выделенная на местности методом оконтуривания линейно вытянутой области

распространения нескольких однотипных локальных решений. При этом для соседних пунктов наблюдения в рамках этих решений должны сохраняться близкие элементы залегания у главных систем трещин и значения углов между сопряженными системами. Достоверность такой зоны скалывания определяется по количеству точек в зоне, по величинам угла между сопряженными трещин в соседних точках, наличию статистически системами часто встречающихся второстепенных разрывов зоне В определенного морфогенетического типа (п. 3.2.2 глава 3). Параметр – величина угла между <u>сопряженными сколами</u> (в момент формирования сколов – удвоенный угол зависит главным образом от глубины и динамической скалывания) – обстановки их формирования (п. 3.2.1 глава 3). Влияние типа пород в данном случае невелико, так как основная масса изучаемых на уровне современного эрозионного среза трещинных систем участка «Тажеран» формировалась в условиях всестороннего давления. Как следствие, в разнотипных интрузивных породах массива углы скалывания незначительно отличаются друг от друга. Величина угла скалывания возрастает с увеличением глубины формирования трещин, то есть больший угол предполагает более древний возраст поля напряжений. Если сравнивать группы парагенезисов только взбросового (или только сдвигового) типа, большее значение угла между сопряженными трещинами (вследствие разворота трещин) может свидетельствовать о более длительном воздействии поля напряжений. В целом, близкие по величине углы между сопряженными системами трещин в точках наблюдения, по которым оконтуривается единая зона скалывания, указывают на одинаковые условия формирования разрывов, что является одним из надежных косвенных признаков достоверности выделения зоны.

Таким образом, используя предложенные параметры и сравнивая между собой выделенные ранее 19 групп решений 3-го регионального уровня, можно не только выявить среди них поля напряжений более высокого (2-го регионального) уровня, но и распределить их по возрасту относительно друг друга. Рассмотрим, как различные количественные параметры влияют на качественную оценку каждой группы решений.

При большой статистике оценок значения следующих параметров свидетельствуют о <u>более интенсивном (более крупном по масштабу) поле</u> напряжений:

- 1. Количество решений в группе, значительно превышающее количество решений в других группах;
- 2. Большая площадь развития парагенезисов группы на участке исследований;
- 3. Наличие и большее количество в группе реконструированных зон скалывания 3-го уровня и их достоверность.

Признаками более молодого возраста поля напряжений и зон скалывания могут быть следующие параметры:

- Большее количество в группе решений, наиболее достоверных и четко выраженных на диаграммах относительно других – вследствие лучшей сохранности;
- Меньшие величины угла между сопряженными системами трещин (т.е. меньшая глубина формирования сколов) в отдельных парагенезисах группы и в реконструированных зонах скалывания – потенциальных разломных зонах (при сравнении групп решений одного морфогенетического типа);
- 3. Меньшая интенсивность проявления опережающих разрывов R-серии (R и R') (при сравнении групп решений разного типа, но одинаковой ориентировки) предполагает наличие активизации в новом поле напряжений уже имеющихся более древних разломов (и, наоборот, большая проявленность разрывов R-серии указывает на изначально менее нарушенный субстрат, а значит – на более древний возраст);
- 4. Меньшее количество одиночных «рассеянных» по площади решений в группе, не объединяющихся в зоны скалывания (при сравнении одинаково ориентированных групп решений), свидетельствует о предыдущей нарушенности субстрата разрывными парагенезисами другого типа.

В результате сопоставления решений по комплексу вышеперечисленных параметров выделено 5 групп решений 2-го масштабного уровня: региональные разломы (зоны скалывания) и поля тектонических напряжений (рис. 49). Из них самыми интенсивными и, возможно, продолжительными по времени воздействия являются поля напряжений СЗ-ЮВ сжатия, а также растяжения в том же направлении (парагенезисы взброса и сброса по направлению VI на

рис.48; рис. 49 А, Д). Кроме того, достаточно отчетливо представлены группы парагенезисов, сформированные в полях ССВ-ЮЮЗ сжатия, ССВ-ЮЮЗ растяжения (взброс и сброс по направлению I на рис. 48; рис. 49 Б, Г) и сдвига (парагенезис левого сдвига по направлению VI на рис. 48; рис. 49 В) с ориентировкой оси сжатия в направлении З-В и оси растяжения в направлении С-Ю. Данные поля тектонических напряжений и соответствующие разрывные структуры (рис. 49) относятся ко 2-му региональному уровню [*Семинский, Черемных, 2011*]. Все оставшиеся менее представительные серии решений-парагенезисов 3-го уровня (рис. 48) соответствуют им по типу и простиранию в качестве вторичных структур (рис. 49).



Рис. 49. Поля тектонических напряжений 2-го регионального масштабного уровня (вверху) и соответствующие им парагенезисы разломных структур (внизу) участка «Тажеран» (А–Д). 1 – направления действия главных нормальных напряжений растяжения (а) и сжатия (б); 2 – магистральный сместитель 1-го порядка (а) и разрывы 2-го порядка (б); 3 – левые и правые сдвиги; 4 – взбросы; 5 – сбросы.

Цифрами обозначено количество решений (2-го порядка) определенного типа в парагенезисе.

Что касается реконструкции напряженного состояния 1-го регионального уровня (по [*Семинский, Черемных, 2011*]), то площадь изучаемого участка представляется недостаточной для такого анализа. Тем не менее, некоторые из восстановленных полей напряжений могут претендовать на принадлежность к более высокому уровню – это поля сжатия и растяжения СЗ-ЮВ (рис. 49 А, Д). Они проявлены наибольшим количеством решений, примерно в 2 раза превышающим все остальные, большим количеством линейно ориентированных трещинных парагенезисов с близкими значениями угла

между сопряженными сколами. Более того, эти решения характеризуются сравнительно равномерным распределением по участку, а также встречаются за его пределами.

Согласно оценке параметров, характеризующих относительный возраст полученных решений, наиболее древними полями напряжения 2-го регионального уровня являются поля СЗ-ЮВ сжатия и ССВ-ЮЮЗ сжатия (рис. 49 А, Б), а наиболее молодым – поле СЗ-ЮВ растяжения (рис. 49 Д). Поскольку реконструкция полей проведена по следам хрупких деформаций в горных породах, возраст самого древнего из них не превышает возраста пород (палеозой, ордовик) и времени первого возможного образования трещин.

Выделенные типы и относительный возраст полей напряжений не противоречат известным из литературы данным об этапности формирования структуры земной коры Прибайкалья. Изучением геодинамической эволюции Южной Сибири, начиная с реконструкций Палеоазиатского океана до этапов кайнозойского рифтинга, а также исследованием ее отдельных эпизодов, С.П.Плешанов, Ю.А.Чернов, С.М.Замараев, занимались В.Е.Хаин, Е.Е.Милановский, Б.А.Натальин, Б.С.Буртман, А.М.К.Сенгор, Ю.А.Зорин, Н.Л.Добрецов, Р.Г.Колман, В.Г.Беличенко, Д.Дельво, В.С.Федоровский, Л.П.Зоненшайн, Н.А.Логачев, Е.В.Скляров, В.Д.Мац, Е.Х.Турутанов, В.М.Кожевников, М.И.Кузьмин, В.К.Александров, С.И.Шерман, К.Г.Леви, А.И.Мирошниченко, К.Ж.Семинский, В.А.Саньков, В.В.Ружич, А.С.Гладков, О.В.Лунина, А.В.Черемных и многие другие. Одной из обобщающих работ, созданной на основе результатов предшествовавших исследований, является серия статей Д. Дельво с соавторами [Delvaux et al., 1995, 1997], в которой рассматриваются региональные поля напряжений и геодинамические стадии развития Байкальского региона.

Следуя таблице региональных стресс-тензоров по [Delvaux et al., 1995], земная кора в районе современного центрального Байкала в палеозое деформировалась в следующих полях напряжений (рис. 50): субмеридиональное сжатие (поздний кембрий – ранний ордовик), СЗ-ЮВ сжатие (средний – поздний силур), субширотное сжатие (каменноугольный период). К палеозою можно отнести восстановленные в процессе структурнопарагенетического анализа трещин поля СЗ-ЮВ и ССВ-ЮЮЗ сжатия регионального уровня (рис. 49 А, Б), как наиболее древние. В мезозое



Рис. 50. Поля напряжений Байкальского региона (A–K) (по [*Delvaux et al.*, 1995, 1997] и др.). A–E – стадии воздействия палеонапряжений для палеозоя и мезозоя; Ж–К – предполагаемые вектора перемещений при рифтообразовании в кайнозое.

Справа от схем – типы региональных полей тектонических напряжений, восстановленных в процессе структурно-парагенетического анализа трещиноватости (знак «?» указывает на недостаточное обоснование принадлежности поля напряжений к данной стадии).

1 – Сибирская платформа (а), докембрийские микроконтиненты (б), каледоно-герцинские террейны (в); 2 – взбросы и надвиги; 3 – сдвиги; 4 – зоны субдукции; 5 – горизонтальные главные нормальные напряжения – сжатие (а), растяжение (б); 6 – стрелки, указывающие на сбросовые (а) и взбросовые (б) разломы; 7 – предполагаемые движения блоков относительно неподвижного блока или платформы; 8 – направления действия реконструированных главных нормальных напряжений растяжения (а) и сжатия (б) в горизонтальной плоскости; 9 – местоположение участка исследований «Тажеран».

центральная часть рифта, по-видимому, была слабо затронута тектоническими процессами (в таблице стресс-тензоров по [Delvaux et al., 1995] по мезозою нет данных). В кайнозое в течение прото-рифтовой стадии (поздний олигоцен ранний плиоцен) В районе центрального Байкала предполагается последовательное изменение напряженного состояния от транспрессии к транстенсии, a на стадии активного рифтинга (поздний плиоцен – четвертичный период) установлен режим чистого растяжения [Delvaux et al., 1997]. К кайнозою можно отнести восстановленные в результате структурнопарагенетического анализа трещин поля сдвига (северо-восточное направление зоны скалывания), ССВ-ЮЮЗ растяжения и СЗ-ЮВ растяжения (рис. 49 В, Г, Д).

Этапы проявления полей палеонапряжений на геодинамических схемах развития Байкальского региона (рис. 50) [Delvaux et al., 1995, 1997] сопоставлены с реконструированными в результате парагенетического анализа трещиноватости региональными полями напряжений на участке «Тажеран» (рис. 49). Поля СЗ-ЮВ сжатия и растяжения (рис. 49 А, Д) соответствуют стадиям древнего регионального сжатия (рис. 50 Б) и современного рифтообразующего растяжения (рис. 50 И, К), которые широко освещены в литературе. Поле ССВ-ЮЮЗ сжатия (рис. 49 Б) по результатам порангового анализа имеет относительно древний возраст и, возможно, является полем поперечного сжатия 2-го порядка на этапе главного субширотного сжатия (рис. 50 Г). Поле сдвига (рис. 49 В) с ориентировкой оси сжатия в направлении З-В и оси растяжения в направлении С-Ю, вероятно, действовало на прото-рифтовой стадии (рис. 50 Ж). Поле ССВ-ЮЮЗ растяжения (рис. 49 Г), скорее всего, является частным проявлением режима растяжения в рифтовой зоне (рис. 50 З).

Итак, с помощью нового подхода к структурно-парагенетическому анализу трещинных сетей реконструированы не только локальные стресс-тензоры, но и поля напряжений регионального уровня, типы которых не противоречат известным представлениям об этапности геодинамического развития земной коры Центрального Прибайкалья.

# Основные направления простирания разрывных структур

Ориентировка полей напряжений локального и регионального уровня, а значит и соответствующих зон скалывания, выделенных для участка «Тажеран», подтверждается независимыми геологическими данными. В целом в разломной структуре Байкальской котловины (по [Шерман, 1977; Леви и др., 1995, Семинский, 2003]) выделяется четыре направления (рис. 51 A), из которых преобладают два – северо-восточное (I) и северо-западное (II), и менее выражены – субширотное (III) и субмеридиональное (IV). В ходе исследования разрывной структуры Тажеранского массива было установлено, что данные направления повторяются с вариациями, обусловленными особенностями строения изученного участка, выявленными в более крупном масштабе.



Рис. 51. Основные направления простирания линейных структур региона (A) и участка (Б–Е) исследований «Тажеран».

А – разломы Байкальской котловины (по [Шерман, 1977; Леви и др., 1995, Семинский, 2003]); Б – мелкие линеаменты; В – крупные линеаменты; Г – разломы (зоны тектонитов); Д–Е – зоны скалывания реконструированные в процессе парагенетического анализа трещинных сетей (решения 1-го локального (Д) и 3-го регионального (Е) уровней).

Разноранговые линеаменты, выявленные на основе топографических карт масштаба 1:25000 (мелкие линеаменты) и масштаба 1:100000 (крупные линеаменты), простираются в основном по этих же направлениях (рис. 51 Б, В). Обычно большинство линеаментов В складчатых поясах являются геоморфологическим проявлением геологических структур (разрывов, разломов, даек и др.) [Pluijm, Marshak, 2004] и обусловлены геологической историей новейшей (кайнозой) структуры регионов, что установлено и для Приольхонья в работах [Ромазина, 1971; Плешанов, Ромазина, 1981]. По простиранию линеаментов (рис. 51 В) можно проследить преимущественные направления разрывных структур соответствующего возраста: северовосточное (I), северо-западное (II) и субмеридиональное (IV). Наиболее четкую имеют северо-восточные (СВ 60°) линеаменты. Это направленность свидетельствует о том, что разломы данного направления представляют активизированные структуры более древнего заложения. Что касается C3 (II) и С (IV) направлений, то у их мелких представителей, представленных линеаментами (рис. 51 Б), наблюдаются значительные вариации ориентировок. Следовательно, участке исследования большое развитие получили на разломные 30ны, поперечные байкальскому (CB) И субширотному направлениям в роли второстепенных сбросовых, а также трансформационных сдвиговых разрывов при растяжении.

Разломные сместители (зоны тектонитов), зафиксированные в ходе полевых исследований в наиболее доступной для изучения береговой части участка, имеют преимущественно субширотное (III) и северо-восточное (I) простирания (рис. 51 Г). Локальные решения структурно-парагенетического анализа трещиноватости отдельных коренных выходов (рис. 51 Д), а также восстановленные региональные зоны скалывания 3-го масштабного уровня (рис. 51 Е) характеризуются тремя направлениями. Примечательно то, что основные направления (I и II) реконструированных разломных зон, а также зон тектонитов и линеаментов на участке (рис. 51 Б–Е) отличаются на 10-15° от разломных направлений, установленных в целом для Байкальской котловины (рис. 51 А). Причиной может быть искажение регионального поля напряжений на локальных участках вследствие широкого развития на территории современной Приольхонской ступени (Ольхонский террейн) таких линейных структурных неоднородностей, как метаморфические вертикальные сдвиговые

швы и пластины [Федоровский, 1997], а также текстурные особенности слоистых и сланцеватых горных пород. Они, располагаясь в плане под острым углом к коллизионному шву (его активизированной части – Приморскому разлому) и к оси центральной части Байкальского рифта, являются ослабленными благоприятными формирования разрывных зонами, для нарушений. Возможной дополнительной причиной рассматриваемого отклонения простираний может быть поворот Ольхонского блока по часовой стрелке при расхождении бортов рифта [Балла и др., 1990].

При реконструкции региональных полей напряжений (рис. 49) выделены северо-восточное (I на рис. 51) и запад-северо-западное (субширотное) (III на рис. 51) направления простираний зон скалывания 2-го регионального масштабного уровня. Полученные результаты подтверждаются данными о разломах северо-восточной и субширотной ориентировок на территории центральной части Байкальского рифта [Замараев и др., 1979; Плешанов, Ромазина, 1981; Карта разломов..., 1982; Леви и др., 1995; Лунина и др., 2010; и др.]

#### Разломные зоны

Результаты парагенетического анализа, в частности, решения по зонам скалывания разного типа и ориентировки, были использованы для построения карты разломных зон участка «Тажеран».

Так, трещинный парагенезис характеризует поле напряжений в локальном объеме горных пород и разрывную сеть зоны скалывания (разломной зоны) в одной точке (глава 3). Несколько соседних точек наблюдения с однотипными парагенезисами дает основание оконтурить по этим точкам область действия данного поля напряжений. Если парагенезисы, принадлежащие к одной группе (3-й региональный уровень), выстраиваются в одну линию, то ЭТО свидетельствует о существовании разломной зоны при условии небольшого наблюдения, близких значений расстояния между точками азимута простирания И угла падения главных систем трещин. Углы между сопряженными системами трещин в разных точках одной линейной области обычно имеют близкие значения, что также указывает на одновозрастность и принадлежность к одной разломной зоне (рис. 52).

Для выявления разломных зон парагенезисы разрывов каждой группы 3-го регионального уровня (локальные зоны скалывания) выносятся на карту в виде знаков, показывающих положение главной системы трещин в решениях с указанием угла падения и угла между сопряженными системами трещин (рис. 52 A). Затем по полученным линейным областям распространения однотипных парагенезисов (рис. 52 A) выделяются разломные зоны (рис. 52 Б), а точнее оси разломных зон. Они обозначены пунктирными линиями, так как точное положение разломного сместителя остается неизвестным.



Рис. 52. Пример реконструкции взбросовой разломной зоны (в плане, залегание в среднем 70/45).

А – оконтуривание линейной области точек наблюдения с однотипными трещинными парагенезисами взброса (на диаграммах); Б – ось разломной зоны, В – поле напряжений, в котором сформировалась разломная зона (ось сжатия горизонтальна, ось растяжения вертикальна).

1 – точка наблюдения с решением парагенезиса взброса на диаграмме трещинной сети; 2 – полюсы систем трещин, характеризующих разрывы 1-го и 2-го порядка в разломной зоне: взброса (а), сдвиго-взброса (б); сбросо-сдвига (в), второстепенная или дополнительная система трещин в тройке (г); 3 – залегание (знак) и величина угла падения (цифра) главной системы трещин в парагенезисе разломного ранга в точке наблюдения; цифра в скобках – угол между сопряженными системами трещин в решении; 4 – линейная область с однотипными парагенезисами; 5 – схематичное положение разломной зоны (простирание, азимут, угол падения – средний по решениям).

В итоге описанных операций была построена карта разломных зон участка «Тажеран» (рис. 53). На ней выделено три группы разломных зон: а)

активизированные на двух и более этапах развития разрывной структуры участка, б) сформированные в течение одного этапа в одном поле напряжений, в) сформированные в течение одного этапа. Достоверность выделения зон уменьшается от первой группы к третьей, причем в последнем случае положение зоны реконструируется по отчетливо выраженному трещинному парагенезису и линеаменту, соответствующему простиранию его главной системы.



Рис. 53. Карта разломных зон Тажеранского массива, построенная по результатам структурно-парагенетического анализа трещиноватости.

1 – участок исследований и береговая линия; 2 – горизонтали рельефа (проведены через 25 м); 3 – разломные зоны: активизированные на двух и более этапах развития (наиболее достоверные зоны) (а), сформированные в течение одного этапа – более (б) и менее (в) достоверные; 4 – угол падения разломной зоны; 5 – разломы, подтвержденные геологическими данными (зоны тектонитов).

Реконструированные взбросовые и сбросовые зоны наблюдаются по всему дизъюнктивы сосредоточены в береговой участку, а сдвиговые части Тажеранского массива, где, вероятно, в большей степени имели место сдвиговые деформации. Некоторые линейные области с разными типами парагенезисов имеют одинаковое простирание и частично совпадают на местности, что свидетельствует о многоэтапности развития породных массивов, заключающейся в активизации более древних разломных зон. Существование некоторых выделенных описанным способом разломных зон в береговой части подтверждается наличием сместителя в виде зоны тектонитов; в этом случае они обозначены сплошной линией. В целом разрывная структура участка представляет сеть разломных зон, подавляющее большинство из которых являются зонами повышенной трещиноватости. Это разломные зоны ранней стадии развития (по [Семинский, 2003]), в которых структурообразование не закончилось формированием разломного сместителя. Остальные структуры – собственно разломы (разломные зоны стадии полного разрушения по [Семинский, 2003]), представленные разнотипными тектонитами, которые были задокументированны в юго-восточной части массива, принадлежащей, повидимому, к зоне регионального Морского разлома. Признаков значительного их продолжения вглубь массива (или его пересечения) при полевых работах не обнаружено (рис. 53).

Кинематические признаки перемещений по трещинам, такие как штрихи и борозды, смещения слоев, зеркала скольжения, обнаружены лишь в прибрежной зоне с хорошей обнаженностью пород. Почти все точки наблюдения расположены на линиях осей выделенных разломных зон, причем в некоторых случаях они свидетельствуют о различных смещениях по одной и той же зоне вследствие активизации разломов в новых полях напряжений. Примерно в половине случаев следы смещения ориентированы согласно последнему этапу СЗ-ЮВ растяжения в центральной части Байкальского рифта.

Анализ выявленной разломной сети свидетельствует TOM, 0 что тектонические напряжения концентрируются в основном по периферии относительно монолитного массива прочных интрузивных пород. Это 2012]. подтверждается низкими значениями эманаций радона Бобров, повышенные концентрации которого наблюдаются в более нарушенных и проницаемых породах у границ массива и за его пределами. На этих участках

134

имеют место зона Морского разлома (береговая часть) и активизированные в современном поле растяжения древние метаморфические швы, ограничивающие массив с запада и севера (рис. 54). Самая протяженная разломная зона из дизъюнктивных структур, откартированных во внутренней части массива, проходит в северо-восточном направлении примерно по границе сиенитов и субвулканических пород, выделяясь в поле радона незначительным повышением газовых эманаций.



Рис. 54. Схема разломных зон Тажеранского массива, представленная на карте распределения поля концентраций радона (по [Бобров, 2012]) Изолинии объемной активности радона (ОАР) проведены через 100 Бк/м<sup>3</sup>.

В соответствии с относительным возрастом восстановленных полей региональных тектонических напряжений (рис. 49), построена схема поэтапного формирования и активизации разломных зон исследуемого участка в разновозрастных региональных полях напряжений (рис. 55).

Таким образом, результаты исследования трещинно-разрывной структуры участка «Тажеран» в Западном Прибайкалье позволяют сделать следующие выводы.

Неоднородности структуры горных пород и форма залегания геологических тел по-разному влияют на строение трещинных сетей и формирование разрывных нарушений в локальном масштабе. Линейно ориентированные неоднородности в метаморфизованных горных породах, такие как сланцеватость, гнейсовидность, слоистость и другие, способствуют формированию более простых системных трещинных сетей. Массивная



Рис. 55. Схема поэтапного формирования сети разломных зон в районе Тажеранского интрузивного массива (1–5).

1 – разломные зоны: активизированные на двух и более этапах развития (наиболее достоверные зоны) (а), сформированные в течение одного этапа – более (б) и менее (в) достоверные; 2 – разломные зоны, сформированные или активизированные на данном этапе; 3 – направления субгоризонтальных осей сжатия (а) и растяжения (б) для поля регионального уровня; 4 – граница Тажеранского массива и береговая линия.

однородная (массивная) текстура магматических пород не влияет на ориентировку формирующихся трещин, хотя контакты между множеством интрузивных тел неправильной формы и разного породного состава способствуют искажению локальных полей напряжений и появлению

разноориентированных разрывов, то есть усложнению сетей трещин. Так, Тажеранский массив выделяется среди пород Приольхонья не только по геологическому строению, но и более сложной структурой трещинных сетей. Среднее значение параметра I<sub>cp</sub>, характеризующего степень сложности сетей мелких разрывов, в пределах интрузива составляет 4,7%, тогда как для вмещающих метаморфических толщ оно равно (5,6 %).

Применение к анализу трещин нового структурно-парагенетического подхода, основанного на сравнении природной трещиноватости с эталонными разрывными сетями, обладает при проведении площадных геологоструктурных исследований серией существенных преимуществ. В качестве базового фактического материала используется повсеместно распространенная «немая» трещиноватость. Достоверность метода можно повысить увеличением числа пунктов наблюдения. Использование большого количества данных по трещинам позволяет, базируясь на структурных материалах локального напряжений участка, выявить поля регионального уровня, что продемонстрировано на конкретном примере.

В результате применения нового методического подхода на участке «Тажеран» реконструировано 308 локальных стресс-тензоров, различно ориентированных в пространстве и отражающих на уровне коренных выходов все типы динамических обстановок – сжатие, растяжение и сдвиг. Для Приольхонья (Западное Прибайкалье) восстановлены региональные поля тектонических напряжений и последовательность их существования от наиболее древнего (ранний палеозой) к современному: сжатие (СЗ-ЮВ) – сжатие (ССВ-ЮЮЗ) – сдвиг (ось сжатия – С-Ю, ось растяжения – З-В) – растяжение (ССВ-ЮЮЗ) – растяжение СЗ-ЮВ). Наиболее интенсивные и возможно продолжительные этапы деформации обусловлены напряженным состоянием СЗ-ЮВ сжатия и аналогичным образом ориентированного более Использованный позднего растяжения. подход позволил провести реконструкцию разломной структуры на участке исследований: построить карту разломов и схему их поэтапной активизации. Таким образом, новый

структурно-парагенетический подход к анализу трещиноватости может быть рекомендован в качестве дополнительной составляющей комплексного изучения разломных зон земной коры.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено тектонофизическое исследование строения сложных трещинных сетей в разломных зонах ряда тектонически активных регионов (Прибайкалье, Средняя Азия, Вьетнам). Изучены типовые сети трещин вблизи разломов известного морфогенетического типа, а также трещинные сети, не имеющие геолого-структурных признаков о характере смещений. Результаты работы позволили сделать следующие основные выводы.

1. Среди параметров трещиноватости наибольшее значение для исследования разломных зон, кроме свидетельствующих об интенсивности деформации плотностных показателей, имеют характеристики геометрической сложности трещинной сети, значения которых определяются историей деформирования породного массива.

2. Достоверным количественным параметром для экспрессной оценки степени сложности строения трещиной сети является средняя интенсивность максимума на диаграмме трещиноватости ( $I_{cp}$ ). В изученных тектонически активных регионах значения данного параметра варьируют от 2,5 до 15%, причем сети с  $I_{cp}$  менее 5% существенно преобладают (88%) по распространенности и являются хаотическими.

3. Степень сложности трещинных сетей, согласно количественным оценкам, выше в массивах горных пород, испытавших деформацию на нескольких этапах тектогенеза или в рамках одного этапа, если при формировании тектонической структуры 1-го порядка происходит закономерная во времени смена вторичных полей напряжений.

4. Висячие крылья разломов, наряду с повышенной плотностью трещин, характеризуются более сложными хаотическими трещинными сетями.

5. Степень сложности сетей трещин при прочих равных условиях понижена в метаморфических породах с интенсивно развитой линейноориентированной текстурой и повышена в интрузивных породах при наличии в их пределах мелких неоднородностей – нелинейных тел неправильной формы.

6. Средняя величина угла между сопряженными системами приразломных трещин возрастает в ряду обстановок: растяжение – сдвиг – сжатие, изменяясь от 75° до 94°, и зависит от основной динамической обстановки и от локальных полей напряжений 2-го порядка. Сопряженные разрывы более крупного ранга (разломы 2-го порядка) характеризуются подобной зависимостью.

7. Условия разрывообразования в зонах взбросов и сдвигов имеют определенное сходство по сравнению со сбросами, о чем свидетельствуют особенности строения приразломных трещинных сетей.

8. Скорректированные по углам между сопряженными разрывами эталонные трещинные сети дают возможность более достоверно определить поле напряжений и морфогенетический тип разломной зоны в процессе структурно-парагенетического анализа трещиноватости.

9. Исследование сложной «немой» трещиноватости с помощью нового методического подхода к структурно-парагенетическому анализу позволяет: восстановить локальные стресс-тензоры на уровне коренных выходов, определить по данным сравнительно небольшого участка коры региональные поля напряжений (путем перехода от трещинных парагенезисов к разломным) и их относительный возраст, закартировать сеть разломных зон и установить последовательность ИХ активизации. Так, для участка «Тажеран» В Приольхонье реконструировано пять региональных полей напряжений от наиболее древнего (ранний палеозой) к современному: сжатие (СЗ-ЮВ) – сжатие (ССВ-ЮЮЗ) – сдвиг (ось сжатия – С-Ю, ось растяжения – ЗВ) – растяжение (ССВ-ЮЮЗ) – растяжение (СЗ-ЮВ).

Итак, в результате проведенного исследования установлены общие закономерности строения сложной тектонической трещиноватости, дополнена и отработана на конкретном примере методика структурно-парагенетического анализа сложных трещинных сетей. В связи со значительной сложностью структуры земной коры тектонически активных регионов полученные в ходе исследования закономерности строения трещинных сетей носят обобщенный среднестатистический характер для наиболее часто встречающихся случаев трещинообразования в разломных зонах. С другой стороны, это позволяет использовать их в самых разных регионах распространения тектонической трещиноватости. Вместе с тем, предложенные методические приемы трудоемки для реализации и могут быть оправданы для применения при решении специфических задач, когда более информативные методы структурных исследований по объективным причинам не могут быть применены.

# СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Александров, В. К. Надвиговые и шарьяжные структуры Прибайкалья / В. К. Александров. – Новосибирск: Наука, 1990. – 103 с.

Балла, З. Кинематика раскрытия Байкала / З. Балла, М. И. Кузьмин, К. Г. Леви // Геотектоника. – 1990. – №2. – С. 80–91.

Белоусов, В. В. Структурная геология / В. В. Белоусов. – Изд. 3-е. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. – 248 с.

Белоусов, Т. П. Делимость земной коры и палеонапряжения в сейсмоактивных и нефтегазоносных регионах Земли / Т. П. Белоусов, С. Ф. Куртасов, Ш. А. Мухамедиев. – М., ОИФЗ РАН, 1997. – 324 с.

Бобров, А. А. Поле радона Тажеранского массива / А. А. Бобров // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы по современной геодинамике (г. Иркутск, 23-29 сентября 2012г.). – В 2-х т. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. – Т. 1. – С. 138–141.

Бурзунова, Ю. П. Возможности структурно-парагенетического анализа трещин: локальные и региональные поля напряжений Приольхонья (Западное Прибайкалье) / Ю. П. Бурзунова // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы третьей молодежной школы-семинара (Москва, 14-18 октября 2013 г.). – М.: ИФЗ, 2013. – Т. 1. – С. 58–66.

Бурзунова, Ю. П. Приразломные трещинные сети: применение новых возможностей парагенетического анализа (на одном из участков западного Прибайкалья) / Ю. П. Бурзунова // Разломообразование и сейсмичность в литосфере: тектонофизические концепции и следствия: Материалы Всероссийского совещания (г. Иркутск, 18 – 21 августа 2009 г.). – В 2-х т. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2009. – Т. 1. – С. 20–22.

Бурзунова, Ю. П. Сложные трещинные сети: оценка степени хаотичности / Ю. П. Бурзунова // Современная геодинамика Центральной Азии и опасные природные процессы: результаты исследований на количественной основе: Материалы Всероссийского совещания и молодежной школы по современной геодинамике (г. Иркутск, 23-29 сентября 2012г.). – В 2-х т. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2012. – Т. 1. – С. 138–141.

Бурзунова, Ю. П. Углы между сопряженными системами приразломных трещин в идеализированных и природных парагенезисах, формирующихся в различных динамических обстановках / Ю. П. Бурзунова // Литосфера. – 2011. – №2. – С. 94–110.

Введение в тектонофизику: ученое пособие / М. А. Гончаров, В. Г. Талицкий, Н. С. Фролова; отв. ред. Н. В. Короновский – М.: КДУ, 2005. – 496 с.

Геологический словарь / под редакцией К. Н. Паффенгольца и др. – в 2-х томах. — М.: Недра., 1978.

Геологический словарь. В трех томах. Издание третье, перераб. и доп. / гл. ред. О. В. Петров. Т. 1. Р–Я. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. – 440 с.

Гинтов, О. Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины / О. Б. Гинтов. – Киев: «Феникс», 2005. – 572 с.

Гинтов, О. Б. Тектонофизическое исследование разломов консолидированной коры / О. Б. Гинтов, В. М. Исай. – Киев: Наук. думка, 1988. – 227 с.

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

Гзовский, М. В. Основы тектонофизики / М. В. Гзовский. – М., «Наука», 1975. – 536 с.

Гзовский, М.В. Соотношения между тектоническими разрывами и напряжениями в земной коре / М.В. Гзовский // Разведка и охрана недр. – 1956. - № 11. – С. 7–22.

Гладков, А. С. Нетрадиционный анализ поясов трещиноватости при картировании субгоризонтальных разломных структур / А. С. Гладков, К. Ж. Семинский // Геология и геофизика. – 1999. – Т.40, № 2. – С. 213–220.

Гладкочуб, Д. П. Ольхонский метаморфический террейн Прибайкалья: раннепалеозойский композит фрагментов неопротерозойской активной окраины / Д. П. Гладкочуб, Т. В. Донская, В. С. Федоровский, А. М. Мазукабзов, А. Н. Ларионов, С. А. Сергеев // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51, № 5. – С. 571–588.

Грачев, А. Ф. О выделении систем трещин / А. Ф. Грачев, И. Б. Морозов // Физика Земли. – 1993. – № 8. – С. 28–33. Данилович, В. Н. Метод поясов в исследовании трещиноватости, связанной с разрывными смещениями / В. Н. Данилович. – Иркутск: Иркут. политехн. инт, 1961. – 47 с.

Добрецов, Н. Л. Позднекембрийско-ордовикская тектоника и геодинамика Центральной Азии / Н. Л. Добрецов, М. М. Буслов // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48 (1). – С. 93–108.

Замараев, С. М. Влияние древней структуры юга Восточной Сибири на развитие Байкальской рифтовой зоны / С. М. Замараев, С. И. Шерман, В. В. Ружич, А. М. Мазукабзов. – В кн. Геология Восточной Сибири, 1972. – С. 16–19.

Замараев, С. М. Соотношение древней и кайнозойской структур в Байкальской рифтовой зоне / С. М. Замараев, Е. П. Васильев, А. М. Мазукабзов, В. В. Ружич, Г. В. Рязанов. – Новосибирск: «Наука», 1979. –122 с.

Карта разломов юга Восточной Сибири / под ред. П. М. Хренова. – Масштаб 1:1500 000. – 1982.

Кноринг, Л. Д. Математические методы при изучении механизма образования тектонической трещиноватости / Л. Д. Кноринг. – Ленинград: Недра, 1969. – 88 с.

Конев, А. А. Контактовый метаморфизм и метасоматоз в ореоле Тажеранской щелочной интрузии / А. А. Конев, В. С. Самойлов. – Новосибирск: Изд-во «Наука», 1974. – 244 с.

Копп, М. Л. Структуры латерального выжимания в Альпийско-Гималайском коллизионном поясе / М. Л. Копп. – М,.: Науч. Мир, 1997. – 313 с.

Копп, М. Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы / М. Л. Копп. – М.: Наука, 2004. – 339 с.

Королев, А. В. Методы изучения мелкой трещиноватости горных пород / А. В. Королев. – Тр. Ин-та геол. АН УзССР, вып. 6, 1951.

Корсаков, А. К. Структурная геология: учебник / А.К. Корсаков. – М.: КДУ, 2009. – 328 с.

Кочнев, А. П. Ольхонский кристаллический комплекс. Проблемы геологии и минерагении Приольхонья: монография / А. П. Кочнев. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. – 252 с.

Кочнев, А. П. Характер деструкции пород в зонах глубинных разломов на разных термодинамических уровнях земной коры (на примере Приморского

разлома) / А. П. Кочнев, Р. Н. Иванова // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле РАЕН. – 2008. - № 6 (32). – С. 117–124.

Кушнарев, И. П. Методы изучения разрывных нарушений / И. П. Кушнарев. – М., «Недра», 1977. – 248 с.

Леви, К. Г. Активная тектоника Байкала / К. Г. Леви, С. М. Бабушкин, А. А. Бадардинов, В. Ю. Буддо, Г. В. Ларкин, А. И. Мирошниченко, В. А. Саньков, В. В. Ружич, Х. К. Вонг, Д. Дельво, С. Колман // Геология и геофизика. – 1995. – Т. 36, № 10. – С. 154–163.

Леви, К. Г. Современная геодинамика Байкальского рифта / К. Г. Леви, А. В. Аржанникова, В. Ю. Буддо, П. Г. Кириллов, А. В. Лухнев, А. И. Мирошниченко, В. В. Ружич, В. А. Саньков // Разведка и охрана недр. – 1997. –

№ 1. – C. 10–20.

Лобацкая, Р. М. Структурная зональность разломов / Р. М. Лобацкая. – М.: Недра, 1987. 128 с.

Логачев, Н. А. История и геодинамика Байкальского рифта / Н. А. Логачев // Геология и геофизика. – 2003. – Т. 44., № 5. – С. 391–406.

Лукьянов, А. В. Некоторые особенности современной тектонофизики / А. В. Лукьянов. – В кн. Тектонофизика сегодня (к юбилею М. В. Гзовского). – ОИФЗ РАН, 2002. – С. 22–46.

Лукьянов, А. В. Парагенетический анализ структур как основа тектонического районирования и составления среднемасштабных структурных карт складчатых областей / А. В. Лукьянов, И. Г. Щерба // Тектоника Сибири. М.: Наука, 1972. – Т. 5. – С. 15–24.

Лукьянов, А. В. Пластические деформации и тектоническое течение в литосфере / А. В. Лукьянов. – М.: Наука, 1991. – 144 с.

Лунина, О. В. Новая электронная карта активных разломов юга Восточной Сибири / О. В. Лунина, А. С. Гладков, П. П. Шерстянкин // Доклады РАН. – 2010. – Т. 433, № 5. – С. 662–667.

Лунина, О. В. Разрывная структура и трещиноватость зоны Приморского разлома (Байкальская рифтовая система) / О. В. Лунина, А. С. Гладков, А. В. Черемных // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43, № 5. – С. 446–455.

Материалы по тектонической терминологии (Тр. Ин-та геологии и геофизики СО АН СССР; вып. 34). Новосибирск, 1964. – Ч. 3. – 255 с.
Мац, В. Д. Кайнозой Байкальской рифтовой впадины: строение и

геологическая история / В. Д. Мац, Г. Ф. Уфимцев, М. М. Мандельбаум и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2001. – 252 с.

Метаморфизм и тектоника: Учеб. пособие / Е. В. Скляров и др.; Под ред. Е. В. Склярова – М.: Интермет Инжиниринг, 2001. – 216 с.: ил.

Михайлов, А. Е. Структурная геология и геологическое картирование / А.

Е. Михайлов. – Учеб. пособие для вузов. – М.: Недра, 1984. – 464 с.

Невский, В. А. Трещинная тектоника рудных полей и месторождений / В. А. Невский. – М.: Недра, 1979. – 224 с.

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

Парфеевец, А. В. Эволюция напряженного состояния земной коры Монголо-Байкальского подвижного пояса / А. В. Парфеевец, В. А. Саньков, А. И. Мирошниченко, А. В. Лухнев // Тихоокеанская геология. – 2002. – Т.21, № 1. – С. 14–28.

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. О некоторых актуальных проблемах структурной геологии и тектонофизики / Л. М. Расцветаев. – В кн. Тектонофизика сегодня (к юбилею М.В. Гзовского). – ОИФЗ РАН, 2002. – С. 333–373.

Расцветаев, Л. М. Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений / Л. М. Расцветаев. – В кн. Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. Ч. 2. М., ГИН АН СССР, 1987. – С. 173–235.

Рац, М. В. Трещиноватость и свойства трещиноватых горных пород / М. В. Рац, С. Н. Чернышев. – М.: изд-во «Недра», 1970. – 164 с.

Ребецкий, Ю. Л. Обзор методов реконструкции тектонических напряжений и сейсмотектонических деформаций / Ю. Л. Ребецкий. – В кн. Тектонофизика сегодня (к юбилею М.В. Гзовского). – ОИФЗ РАН, 2002. – С. 227–243.

Родыгин, А. И. Азимутальные проекции в структурной геологии / А. И. Родыгин. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1980. – 136 с.

Ромазина, А. А. Некоторые вопросы геоморфологии Приольхонья / А. А. Ромазина // Вопросы геологии Прибайкалья и Забайкалья. Вып. 8, 1971. – С. 138–143.

Плешанов, С. П. Некоторые вопросы кинематики развития разломов центральной части Байкальского рифта / С. П. Плешанов, А. А. Ромазина. – В кн. Проблемы разломной тектоники. Новосибирск: Наука, 1981. – С.129–141.

Плешанов, С. П. О роли разрывных нарушений в геологической структуре Приольхонья/ С. П. Плешанов, Ю. А. Чернов // Тр. Иркутск. политехн. ин-та. Сер. геол. 1968. – В.4. – С. 22–27.

Программа вычисления информационной энтропии и фрактальной размерности трещиноватости горных пород «Hu&Df 1.0»: а. с. 2014611235 Рос. Федерация. № 2013619887; заявл. 29.10.2013; опубл. 28.01.2014. – 1 с.

Пэк, А. В. Геолого-структурные методы изучения эндогенных рудных месторождений / А. В. Пэк и др. – М.: Наука, 1982. – 264 с.

Разломы и горизонтальные движения земной коры / отв. ред. А. В. Пейве. – М.: Изд-во АН СССР, 1963. – 312 с.

Роль рифтогенеза в геологической истории Земли / под ред. Н. А. Флоренсова. – Новосибирск: Наука, 1977. – 224 с.

Семинский, К. Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Прикладной аспект / К. Ж. Семинский, А. С. Гладков, О. В. Лунина, М. А. Тугарина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2005. – 294 с.

Семинский, К. Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект / К. Ж. Семинский. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. –243 с.

Семинский, К. Ж. Межблоковые зоны северо-западного плеча Байкальского рифта: результаты геолого-геофизических исследований по профилю пос. Баяндай – м. Крестовский / К. Ж. Семинский, Н. О. Кожевников, А. В. Черемных, Е. В. Поспеева, А. А. Бобров, В. В. Оленченко, М. А. Тугарина, В. В. Потапов, Ю. П. Бурзунова // Геология и геофизика. – 2012. – Т.53, №2. – С. 250–269.

Семинский, К. Ж. Межблоковые зоны в земной коре юга Восточной Сибири: тектонофизическая интерпретация геолого-геофизических данных / К.

Ж. Семинский, Н. О. Кожевников, А. В. Черемных, Е. В. Поспеева, А. А. Бобров, В. В. Оленченко, М. А. Тугарина, В. В. Потапов, Р. М. Зарипов, А. С. Черемных // Геодинамика и тектонофизика. – 2013. – 4 (3). – С. 203–278.

Семинский, К. Ж. Новый подход к анализу хаотической трещиноватости вблизи разломных сместителей / К. Ж. Семинский, Ю. П. Бурзунова // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 3. – С. 330–343.

Семинский, К. Ж. Новый подход к изучению тектонической трещиноватости в разрывных зонах / К. Ж. Семинский, А. С. Гладков // Геология и геофизика. – 1991. – № 5. – С. 130–140.

Семинский, К. Ж. Принципы и этапы спецкартирования разломноблоковой структуры на основе изучения трещиноватости / К. Ж. Семинский // 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 / К. Ж. Семинский // Докл. РАН. – 1997. – Т. 354, № 3. – С. 361–363.

Семинский, К. Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 1: Теоретические основы и принципы / К. Ж. Семинский // Геодинамика и тектонофизика. – 2014. – Т. 5, № 2. – С. 445–467.

Семинский, К. Ж. Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: Основные этапы и перспективы / К. Ж. Семинский // Геодинамика и тектонофизика. – 2015. – Т. 6, № 1. – С. 1–43.

Семинский, К. Ж. Структура разломных зон Приольхонья (Байкальский рифт) по данным полевой тектоно- и геофизики / К. Ж. Семинский, Н. О. Кожевников, А. В. Черемных, А. А. Бобров, В. В. Оленченко, Д. Л. Авгулевич // Известия Сибирского отделения секции наук о Земле РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2008. –Вып. 7 (33). – С. 111–124.

Семинский, К. Ж. Трещинные сети и напряженное состояние кайнозойских осадков Байкальского рифта: новые возможности структурнопарагенетического анализа / К. Ж. Семинский, А. В. Черемных // Геология и геофизика. – 2011. – Т. 52, №3. – С. 450–469.

Сим, Л. А. Полевые методы реконструкции тектонических напряжений / Л. А. Сим // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы первой молодежной школы-семинара – М.: ИФЗ, 2009. – Т. 2. – С. 277–287.

Скляров, Е. В. Синметаморфические базитовые дайки – индикаторы коллапса коллизионной структуры Западного Прибайкалья / Е. В. Скляров, В. С. Федоровский, Д. П. Гладкочуб, А. Г. Владимиров // Докл. РАН. – 2001. – Т.381, №4. – С. 522–527.

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

Структурные парагенезы и их ансамбли. Материалы совещания / Отв. ред. А. В. Лукьянов. – М.: Геос, 1997. – 272 с.

Талицкий, В. Г. Структурные парагенезы как результат процессов самоорганизации в деформируемой геологической среде / В. Г. Талицкий // Геотектоника. – 1999. – № 2. – С. 80–93.

Федоровский, В. С. Геологическая карта массива Тажеран / В. С. Федоровский, Е. В. Скляров, А. М. Мазукабзов, А. Б. Котов, А. В. Лавренчук, А. Е. Старикова. – М-б 1:10 000. М: Издание Группы компаний А1 TIS, 2009.

Федоровский, В. С. Геологическая карта Юго-западной части Ольхонского региона / В. С. Федоровский. – М.: ГИН РАН, 2004.

Федоровский, В. С. Купольный тектогенез в коллизионной системе каледонид Западного Прибайкалья / В. С. Федоровский // Геотектоника. – 1997. – № 6. – С. 56–71.

Федоровский, В. С. Сдвиговый тектогенез и щелочно-базитовый магматизм в коллизионной системе каледонид Западного Прибайкалья / В. С. Федоровский, Е. В. Скляров, А. Э. Изох, А. Б. Котов, А. В. Лавренчук, А. М. Мазукабзов // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51. – С. 682–700.

Федоровский, В. С. Тектоника, метаморфизм и магматизм коллизионных зон каледонид Центральной Азии / В. С. Федоровский, А. Г. Владимиров, Е. В. Хаин, С. А. Каргополов, А. С. Гибшер, А. Э. Изох // Геотектоника. – 1995. – № 3. – С. 2–22.

Физический энциклопедический словарь / под ред. А. М. Прохорова. – М.: Советская энциклопедия, 1983.

Черемных, А. В. Опыт расчета информационной энтропии трещиноватости (на примере Приморского сброса, Западное Прибайкалье) / А. В. Черемных // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Матер. Совещания. Вып. 5. – Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2007. – Т. 2. – С. 157–159.

Черемных, А. В. Поля напряжений в зоне Приморского сброса

(Байкальский рифт) / А. В. Черемных //Литосфера. – 2011. – № 1. – С. 135–142.

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

Шеннон, К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. – Сборник статей., М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 829 с.

Шерман, С. И. Физические закономерности развития разломов земной коры / С. И. Шерман. – Новосибирск: Наука, 1977. – 102 с.

Шерман, С. И., Днепровский Ю.И. Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения / С. И. Шерман, Ю. И. Днепровский. – Новосибирск: Наука, 1989. – 158 с.

Шерман, С. И. Метод поясов в исследовании приразломной трещиноватости / С. И. Шерман, С. П. Плешанов // Геология, поиски и разведка месторождений рудных полезных ископаемых. – Иркутск, 1980. – С. 8–20.

Шерман, С. И. Методика изучения и анализа количественных параметров разломов литосферы / С. И. Шерман. – Методич. пособие. Изд-во ИрГТУ, Иркутск, 2002. – 60 с.

Agosta, F. From fractures to flow: A field-based quantitative analysis of an outcropping carbonate reservoir / F. Agosta, M. Alessandroni, M. Antonellini, E. Tondi, M. Giorgioni // Tectonophysics. – 2010. – V. 490. – № 3-4. – P. 197–213.

Agosta, F. Oblique normal faulting along the northern edge of the Majella Anticline, central Italy: Inferences on hydrocarbon migration and accumulation / F. Agosta, M. Alessandroni, E. Tondi, A. Aydin // J. of Struct. Geol. – 2010. – V. 32. – P. 1317–1333.

Billi, A. The damage zone-fault core transition in carbonate rocks: implications for fault growth, structure and permeability / A. Billi, F. Salvini, F. Storti // Journal of Structural Geology. – 2003. – V. 25. – P. 1779–1794.

Brogi, A. Fault zone architecture and permeability features in siliceous sedimentary rocks: Insights from the Rapolano geothermal area (Northern Apennines, Italy) / A. Brogi // Journal of Structural Geology. – 2008. – V. 30. – P. 237–256.

Caine, J. S. Internal structure, fault rocks, and inferences regarding deformation, fluid flow, and mineralization in the seismogenic Stillwater normal fault, Dixie Valley, Nevada / J. S. Caine, R. L. Bruhn, C. B. Forster // J. of Struct. Geol. – 2010. – V. 32. – P. 1576–1589.

Delvaux, D. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Pt. I: Palaeozoic and Mesozoic pre-rift evolution / D. Delvaux, R. Moyes, G. Stapel, A. Melnikov, V. Ermikov // Tectonophysics. – 1995. – Vol. 252. – P. 61–101.

Delvaux, D. Paleostress reconstruction and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Pt. II: Cenozoic rifting / D. Delvaux, R. Moyes, G. Stapel, C. Petit, K. Levi, A. Miroshnitchenko, V. Ruzhich, V. San'kov // Tectonophysics. – 1997. – Vol. 282. – P. 1–38.

Dershowitz, W. S. Characterizing Rock Joint Geometry with Joint System Models / W. S. Dershowitz, H. H. Einstein // Rock Mechanics and Rock Engineering. - 1988. - V.21. - P. 21-51.

Guerriero, V. Quantifying uncertainties in multi-scale studies of fractured reservoir analogues: Implemented statistical analysis of scan line data from carbonate rocks / V. Guerriero, A. Iannace, S. Mazzoli, M. Parente, S. Vitale, M. Giorgioni // J. of Struct. Geol. – 2010. – V. 32. – P. 1271–1278.

Hancock, P. L. Brittle microtectonics: Principles and practice / P. L. Hancock // J. of Struct. Geol. -1985. - V.7, No 3/4. - P. 437-457.

Hancock, P. L. The Oxford Companion to the Earth / P. L. Hancock, B. J.

Skinner. – Oxford: Oxford University Press, 2000. – 1174 p.

International Tectonic Map of the World (Scale 1:15000000) / chief ed. V. E. Khain. – M.: Mingeo, 1984.

Jaeger, J. C. Fundamentals of rock mechanics / J. C. Jaeger, N. G. W. Cook, R.

W. Zimmerman. – Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2007. – 475 p.

Mundl, G. Rock joints. The mechanical genesis / G. Mundl. – 2005. – 221 p. Murrell, S. A. F. Natural faulting and the mechanics of brittle shear failure / S.

A. F. Murrel // J. Geol. Soc. London. – 1977. – P. 175–189.

Palmstrom, A. The weighted joint density method leads to improved characterization of jointing / A. Palmstrom, B. Stromme // Conference on recent advances in tunneling technology, New Delhi, 1996.

Park, R. G. Foundations of structural geology / R. G. Park. – London: Chapman & Hall, 1997. – 202 p.

Pluijm, B. A. Earth Structure: An Introduction to Structural Geology and
Tectonics / B. A. Pluijm, S. Marshak. – New York: W.W.Norton & Company, 2004.
– 656 p.

Ragan, D. M. Structural geology. An introduction to geometrical techniques / D. M. Ragan. – New York: Cambridge University Press, 2009. – 602 p.

Riedel, W. Zur Meckanik geologischer Brucherscheinungen / W. Riedel // Zbl. Mineralogie, Geol. und Palaentol. – 1929. – Abt. B, 30. – S. 354–368.

San'kov, V. A. Cenozoic stress field evolution in the Baikal rift zone / V. A. San'kov, A. I. Miroshnitchenko, K. G. Levi et. al. // Bull. Centre Rech. Elf Explor.-Prod., Elf Aquitaine. – 1997. – V.21 (2). – P. 435–455.

Schulz, S. E. Mesoscopic structure of the Punchbowl Fault, Southern California and the geologic and geophysical structure of active strike-slip faults / S. E. Schulz, J. P. Evans // J. of Struct. Geol. – 2000. – V. 22. – P. 913–930.

Sibson, R. H. Fault rocks and fault mechanism / R. H. Sibson // J. Geol. Soc. London. 1977. – V. 133. – P. 191–213.

Sibson, R.N. Brittle failure mode plots for compressional and extensional tectonic regimes / R.N. Sibson // J. of Struct. Geology, 1998. – V. 20. – № 5. – P. 655–660.

Sylvester, A. G. Strike-slip faults / A. G. Silvester // Geol. Soc. Am. Bull., 1988. – V. 100. – P. 1666–1703.

Twiss, R. J. Structural geology / R. J. Twiss, E. M. Moores. – New York: W.H. Freeman & Company, 1992. – 532 p.

Wheeler, R. L. Intensity of systematic joints: methods and applications / R. L. Wheeler, J. M. Dixon // Geology, 1980. – V.8. – P. 230–233.

Wilcox, R. E. Basic wrench tectonics / R. E. Wilcox, T. P. Harding, D. R. Seely // Am. Ass. Petrol. Geologist Bull. – 1973. – V. 57. – P. 74-96.