

*О.В. ЛУНИНА, А.С. ГЛАДКОВ***ДЕТАЛЬНОЕ КАРТИРОВАНИЕ И СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ
ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРЫ ЗОН РАЗЛОМОВ
(НА ПРИМЕРЕ ПРИБАЙКАЛЬЯ)**

Проведено детальное картирование внутренней структуры зон динамического влияния разломов, активизированных в областях с различными типами напряженного состояния земной коры. Показано, что во внутренней структуре длительно развивающихся разломов под воздействием современного поля напряжений происходит перестройка во взаимоотношениях структурных элементов, меняются характер тектонических деформаций и интенсивность их проявления. Установленные закономерности и подобный подход к изучению разломных структур открывают большие возможности для решения прикладных задач, связанных с оценкой сейсмической опасности территорий, поисками и разработкой месторождений полезных ископаемых, а также с другими аспектами современных геологических изысканий.

Практически каждый крупный разлом земной коры характеризуется длительной историей развития, на протяжении которой он неоднократно вовлекался в процесс активизации под воздействием изменяющегося регионального поля тектонических напряжений. В течение этого времени формировалась внутренняя структура разлома, элементы которой несут ин-

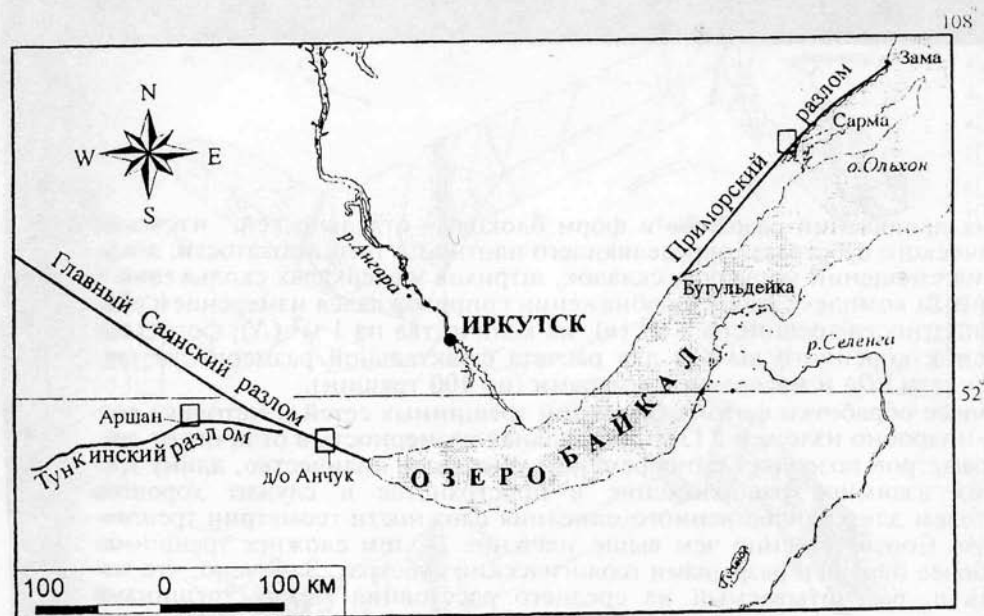


Рис. 1. Пространственно-географическое положение изученных разломов в регионе. Прямоугольниками показаны участки детальных исследований, в пределах которых расположены геолого-структурные профили

формацию о различных этапах становления и активизации. В свою очередь на современное поле тектонических напряжений отдельные элементы внутренней структуры зоны крупного разлома (в силу различных факторов) реагируют по-разному, что отражается как в изменениях геофизических полей, так и в характере распределения опасных геодинамических процессов в ее пределах. Поэтому необходимо изучение влияния типа современного поля напряжений на внутреннюю структуру зон активизированных разломов. Цель нашей работы — детальное картирование и сравнительный анализ зон динамического влияния разломов [11], активизированных в областях с различными типами напряженного состояния. В качестве эталонных объектов выбраны известные активные разломы Прибайкалья — Приморский, Тункинский и Главный Саянский (рис. 1), хорошо изученные специалистами различных направлений из области геологии, тектоники и сейсмологии [3, 7-9, 11-13]. В соответствии с картой напряженного состояния верхней части литосферы Земли [10] Приморский разлом находится в области растяжения, Тункинский — в области растяжения в сочетании со сдвигом, Главный Саянский — в области сжатия в сочетании со сдвигом.

Методы исследований

Исходным материалом для исследования внутренней структуры зон разломов послужили геолого-структурные и тектонофизические наблюдения, выполненные по профилям вкрест простирания активных сегментов изученных разломов (рис. 1), к которым приурочены известные палеосейсмодислокации. Шаг между точками наблюдения составил 50-100 м, в редких случаях — 300 м.

В пределах каждой точки проведен следующий комплекс работ: наблюдения за характером тектонической раздробленности и особенностями строения частных зон разрывных нарушений, составляющих зоны региональных разломов; детальное изучение трещиноватости, включающее измерение и оценку взаимоотношений основных систем трещин; описание геоморфоло-

гических проявлений разрывов и форм блоковых отдельностей; изучение геологического субстрата, определяющего плотность трещиноватости, документация смещений маркеров, складок, штрихов на зеркалах скольжения и т.п. Данный комплекс работ на обнажении сопровождался измерением объемной плотности трещин на 1 м^3 (n), их количества на 1 м^2 (N); фотосъемкой стенок коренного выхода для расчета фрактальной размерности трещинной сети (D_f) и массовыми замерами (по 100 трещин).

Процесс обработки фотоизображений трещинных сетей и методика расчета D_f подробно изложен в [3]. Фрактальная размерность в отличие от других параметров позволяет одновременно учитывать количество, длину трещин, их взаимное расположение в пространстве и служит хорошим показателем для количественного описания сложности геометрии трещинной сети. Соответственно чем выше значение D_f , тем сложнее трещинная сеть и более нарушен разрывами геологический субстрат. Замечено, что показатель n , рассчитываемый из среднего расстояния между трещинами основных систем, хорошо «работает» при четко выраженной системности трещиноватости, в то время как показатель N , даже при сложной трещиноватости и отсутствии визуальной системности, характерных для зон дробления, учитывает все трещины (длиной более 10 см) на плоскости обнажения. Используемые параметры дополняют одни другие, делая количественное описание трещиноватости более полным и всесторонним.

По данным массовых замеров построены диаграммы трещиноватости, анализ которых лег в основу выделения структурных парагенезисов и сопряженных систем трещин, определения осей главных нормальных напряжений и кинематики подвижек по разрывным нарушениям с использованием комплекса известных методик [1, 2, 4, 5, 7].

Результаты и их обсуждение

По результатам детальных геолого-структурных исследований построены блок-диаграммы (рис. 2, А; 3, А; 4, А), которые в отличие от обычных разрезов позволяют получить более полное представление о пространственном положении частных разрывных нарушений, составляющих зоны региональных разломов. Блок-диаграммы сопровождаются графиками изменения параметров трещиноватости (рис. 2, Б; 3, Б; 4, Б), анализ которых позволил выделить области, характеризующиеся повышенной раздробленностью горных пород и сложным строением сети трещин (рис. 2, В; 3, В; 4, В). Для этого использовались значения параметров, которые превышают среднеарифметические значения выборок. В пределах областей выделены участки интенсивной нарушенности — a (максимальные значения всех трех параметров), высокой нарушенности — b (двух параметров) и повышенной нарушенности — c (одного параметра). Пространственное распределение участков — зональное, выраженное в том, что более нарушенные участки окаймляются менее нарушенными. Поскольку области, как правило, приурочены к отдельным зонам разрывных нарушений, составляющим внутреннюю структуру изученных разломов, то они, по нашему мнению, представляют собой области влияния частных (локальных) сместителей.

Таким образом, в ходе исследований детально охарактеризована внутренняя структура зон динамического влияния Приморского, Тункинского и Главного Саянского разломов, основные характеристики которых суммированы в таблице. Все участки, где проводилось детальное изучение, расположены в пределах схожих кристаллических комплексов пород, что дает возможность корректно проводить сравнительный анализ разломов, изученных с помощью единого методического подхода. В целом для всех трех дизъюнктивов установлено, что они состоят из частных разрывных нарушений, представленных зонами дробления, расланцевания, трещиноватости и милонитизации, разделенных относительно слабонарушенными блоками.

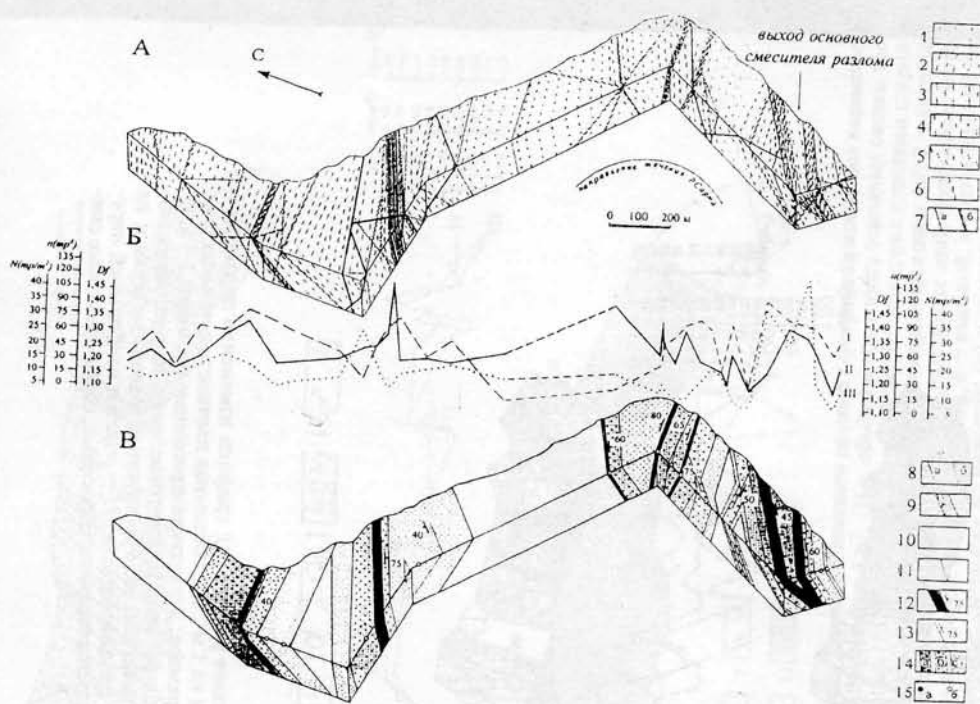


Рис. 2. Блок-диаграмма геолого-структурного профиля по р.Сарма вкост простирания зоны Приморского разлома (А); графики изменения параметров трещиноватости вдоль профиля: I — фрактальная размерность сети трещин, II — количество трещин на 1 м², III — объемная плотность основных систем трещин на 1 м³ (Б); области влияния частных сместителей в зоне Приморского разлома (В): 1 — граниты и гранито-гнейсы; 2 — кристаллические сланцы и гнейсы; 3 — интенсивно рассланцованные гнейсы; 4 — кварциты; 5 — blastsмилониты; 6 — зоны рас- сланцевания; 7 — зоны дробления (а) и трещиноватости (б); 8 — зоны милонитизации (а) и blastsмилонитов (б); 9 — крупные разломные зоны; 10 — граница контакта между породами; 11 — крупные сколовые трещины; 12 — крупные разломные зоны их элементы залегания; 13 — раз- рывные зоны мощностью менее 5 м, которые проявляются в параметрах трещиноватости; 14 — участки наиболее нарушенных пород: а — интенсивной нарушенности, б — высокой, в — повы- шенной нарушенности; 15 — точки наблюдения, в которых зафиксированы сбросовые смеще- ния (а) и штрихи скольжения (б)

Сравнительный анализ показал, что наиболее деформированными ока- зались породы в зонах Тункинского и Главного Саянского разломов, акти- визированных в областях с переходными типами напряженного состояния (растяжение со сдвигом и сжатие со сдвигом). О большей нарушенности горных пород и более сложной сети трещин и разрывов в зонах этих разло- мов, по сравнению с Приморским, свидетельствуют высокие максималь- ные и среднеарифметические значения параметров n , N и D_f , значительные мощности главного и частных сместителей, а также их областей влияния. При этом если в зоне Тункинского разлома количественные показатели до- стигают максимальных величин по абсолютным значениям и носят сосре- доточенный характер, то в зоне Главного Саянского разлома показатели несколько ниже, но охватывают большие площади. В результате среднее расстояние между крайними окончаниями областей влияния частных сме- стителей с интенсивной нарушенностью пород в обстановке сжатия со сдвигом (Главный Саянский разлом) 100-300 м, а в обстановке растяжения и растяжения со сдвигом (Приморский и Тункинский разломы) — 1360-1635 м.

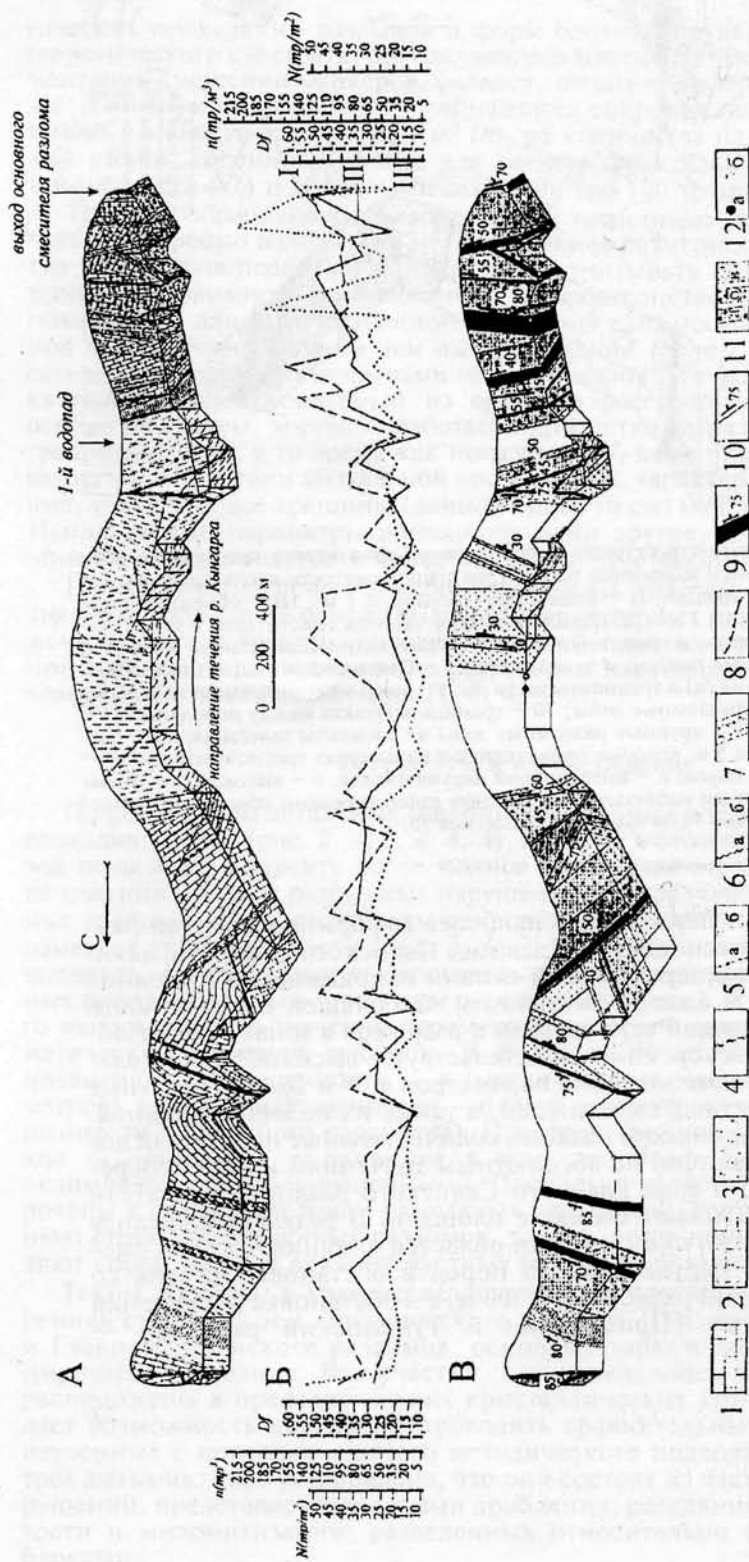


Рис. 3. Блок-диаграмма геолого-структурного профиля по р.Кынгарга вкост простирания зоны Тункинского разлома (A); графики изменения параметров трещиноватости вдоль профиля (B): I – фрактальная размерность сети трещин, II – количество трещин на 1 м^2 , III – объемная плотность основных систем трещин на 1 м^3 ; области влияния частных сместителей в зоне Тункинского разлома. (B): I – мрамора, 2 – катаклазированные мрамора, 3 – кристаллические сланцы и гнейсы, 4 – зоны расщепления, 5 – зоны дробления (a) и трещиноватости (b); 6 – зоны микронитизации (a) и крупные сколо-вые трещины (b); 7 – крупные разломные зоны; 8 – предполагаемая линия локального надвига на поверхности; 9 – крупные разломные зоны и их элементы залегания; 10 – разрывные зоны мощностью менее 5 м, которые проявляются в параметрах трещиноватости; 11 – участки наибольшей нарушенности пород: a – интенсивной, b – высокой, в – высокой, в которых зафиксированы сбросовые, сброс-сдвиговые смещения (a) и штрихи скольжения (b)

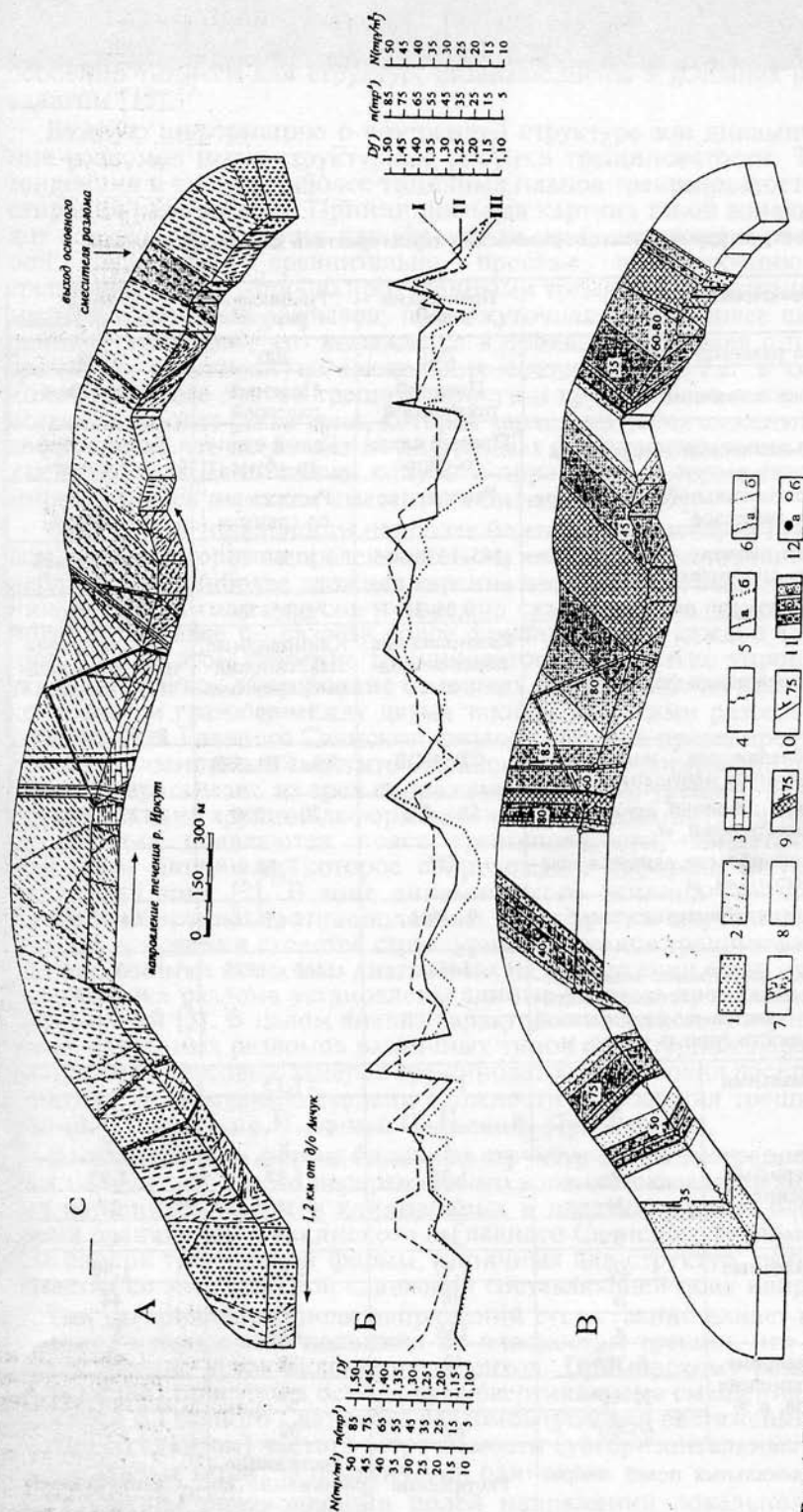


Рис. 4. Блок-диаграмма геолого-структурного профиля по р. Иркутск вкосте распространения зоны Главного Саянского разлома (А); графики изменения параметров трещиноватости вдоль профиля: I — фрактальная размерность сети трещин, II — количество трещин на 1 м², III — объемная плотность основных систем трещин на 1 м³ (Б); области влияния частных сместителей в зоне Главного Саянского разлома (В): 1 — граниты; 2 — гнейсы; 3 — мрамора с пластиками кварцитов; 4 — зоны расслаивания; 5 — зоны дробления (а) и трещиноватости (б); 6 — зоны милонитизации (а) и крупные сколовые трещины (б); 7 — крупные разломные зоны; 8 — граница контакта между породами; 9 — крупные разломные зоны и их элементы залегания; 10 — разрывные зоны мощностью менее 5 м, которые проявляются в параметрах трещиноватости; 11 — участки наиболее нарушенных пород: а — интенсивной, б — высокой, в — повышенной на-рушенности; 12 — точки наблюдения, в которых зафиксированы взбросовые и сдвиговые смещения по маркерам (а) и штрихи скольжения (б)

Основные структурные и тектонофизические характеристики изученных разломов

Характеристики		Приморский разлом	Тункинский разлом	Главный Саянский разлом
Общие	Длина разлома, км	200	200	1000
	Возраст заложения	Поздний протерозой	Поздний палеозой	Докембрий
	Кинематический тип разлома	Правый сдвиго-сброс	Левый сдвиго-сброс	Левый взбросо-сдвиг
	Тип регионального поля напряжений в кайнозое	Растяжение	Растяжение со сдвигом	Сжатие со сдвигом
Элементы внутренней структуры зон разломов	Азимут падения и угол падения главного сместителя, град	145-15545-65	17560-80	205-21065-88
	Мощность зон нарушений, м	0,05-35	0,05-70	0,05-230
	Предполагаемая форма блоков	Клиновидные, пластиновидные	Клиновидные, пластиновидные, треугольные	Пластиновидные, клиновидные, треугольные, ромбовидные
	Преобладающие направления зон разрывных нарушений	СВ, ВСВ	ВЗ, СЮ, СВ	СЗ, ВЗ
	Ширина областей влияния частных сместителей, м	55 - 475	20 - 1050	127 - 1006
	Ширина области влияния главного сместителя, м	255	1050	487
	Ширина слабонарушенных блоков, м	9 - 491	18 - 562	64 - 318
	Среднее расстояние между областями влияния частных сместителей с участками интенсивной нарушенности горных пород, м	1411	1360 - 1635	100 - 300 и более
Значения параметров	Минимальные	D_f	1,10	1,13
		N	11	12
		n	2	8
	Среднесафметические	D_f	1,30	1,37
		N	22	27
		n	28	45
	Максимальные	D_f	1,47	1,61
		N	44	50
		n	136	208
Структурные и кинематические	Распределение углов склонения штрихов, в %	0-30°	19	39
		30-60°	19	29
		60-90°	62	32
	Типы локальных полей напряжений	Растяжение	Растяжение, растяжение со сдвигом, сдвиг	Сдвиг, сжатие
	Типы структурных парагенезисов трещиноватости	Пояса трещиноватости	Конуса и пирамиды скалывания, пояса трещиноватости	Тройка, пояса трещиноватости, конус скалывания

В зонах Тункинского и Главного Саянского разломов наблюдается больший разброс в ориентировке частных зон разрывных нарушений, который особенно типичен для структур, развивающихся в условиях растяжения со сдвигом [15].

Важную информацию о внутренней структуре зон динамического влияния разломов несут структурные рисунки трещиноватости. Так, выявлена тенденция в смене наиболее типичных планов трещиноватости вкрест простирания разломов [7]. Принципиальная картина такой зональности выглядит следующим образом: периферийная наиболее широкая зона, для которой характерны сравнительно простые по строению диаграммы трещиноватости с хорошо проявленными тремя взаимно перпендикулярными направлениями разрывов; промежуточная зона с более сложным внутренним строением, что выражается в проявлении наряду с простыми диаграммами сочетаний из нескольких систем-троек, т.е. в образовании в конечном итоге поясов трещиноватости и других более сложных рисунков; осевая, наиболее узкая зона, которая характеризуется сложными условиями деформации, что позволяет на диаграммах фиксировать такие парагенезисы, как пояса В.Н.Даниловича, конусы и пирамиды, которые тяготеют к сформировавшимся отрезкам сместителя дизъюнктива [7].

Описанной зональности наиболее близко соответствует Тункинский разлом, в зоне которого в пределах области влияния магистрального сместителя наблюдается наиболее сложная картина деформаций, выраженная в появлении на диаграммах конусов и пирамид скалывания, а также поясов трещиноватости. Далее по разрезу пояса фиксируются в каждой точке наблюдения, но при этом строение трещиноватости несколько упрощается, на что указывает четкое обособление основных максимумов на диаграммах. Однако провести границу между двумя такими участками разреза можно лишь условно. Для Главного Саянского разлома картина прямо противоположная. В зоне его основного сместителя фиксируется сравнительно простой структурный парагенезис из трех сопряженных систем трещин, механически соответствующий хрупкой деформации «чистого сдвига» [5], и только в крыльях разлома появляются пояса трещиноватости, свидетельствующие о вращении материала, которое сопровождает деформационный процесс в разломной зоне [2]. В зоне динамического влияния Приморского сдвиго-сброса картина противоположная двум другим изученным дизъюнктивам. На основании сходства структурных рисунков трещиноватости и наличия однотипных поясов на диаграммах на протяжении всего профиля вкрест простирания разлома установлены единые условия проявления трещинных деформаций [3]. В целом анализ характеров проявления и распределения в зонах изученных разломов различных типов структурных парагенезисов на диаграммах массовых замеров трещиноватости позволил распределить дизъюнктивы по убыванию степени сложности проявления трещинных деформаций: Тункинский, Главный Саянский, Приморский.

Восстановление формы блоковых структур путем экстраполяции разрывных нарушений одного иерархического уровня показало преобладание в зонах изученных разломов клиновидных и пластиновидных блоков. В то же время отличие зон Тункинского и Главного Саянского разломов — появление блоков треугольной формы, типичных для структур, развивающихся в областях со значительной сдвиговой составляющей поля напряжений [14].

Тип регионального поля напряжений существенно влияет на преимущественное направление подвижек по плоскостям трещин, что подтверждает распределение углов склонения штрихов. Приморскому разлому (условия растяжения) присущи в основном субвертикальные смещения, в зонах Тункинского и Главного Саянского разломов (условия растяжения со сдвигом и сжатия со сдвигом) частота встречаемости субгоризонтальных, косых и субвертикальных штрихов практически одинакова.

Результаты реконструкции полей напряжений локального уровня (по данным изучения трещиноватости) показывают, что даже при значительных

вариациях в ориентировке осей главных нормальных напряжений, тип локального поля напряжений в целом согласуется с региональным. Так, в зоне Приморского разлома разрывные и трещинные деформации формировались и активизировались под воздействием полей растягивающих напряжений север — северо-западного и северо-восточного направлений. В зонах разломов, развивающихся в областях с переходными типами напряженного состояния, наблюдается более сложная картина. В пределах изученного профиля вкрест простирания Тункинского сдвига-сброса тип напряженного состояния изменялся от чистого растяжения до сдвига, при этом ось растягивающих напряжений практически всегда была ориентированна на северо-запад — юго-восток. Для некоторых участков в зоне этого разлома характерно возникновение одноосного или осесимметричного напряженного состояния, что свидетельствует о сложных условиях формирования разрывных деформаций. Для внутреннего строения зоны Главного Саянского разлома типична комбинация двух типов полей напряжений — сдвига и сжатия, под воздействием которых по разрывам с юго-западным и юго-восточным падением происходили соответственно левосторонние и правосторонние сдвиговые смещения, а по разрывам с северо-восточным и север — северо-западным падениями — взбросовые. Подобные комбинации движений типичны для разломных структур, развивающихся в условиях сжатия в сочетании со сдвигом [16, 17].

В целом проведенные исследования показали, что тип регионального поля напряжений определяет внутреннюю структуру зон динамического влияния разломов, оказывая влияние на взаимоотношение структурных элементов, стиль тектонических деформаций и интенсивность их проявления. Из трех детально изученных дизъюнктивов наиболее сложная внутренняя структура установлена для Тункинского и Главного Саянского разломов, развивающихся в областях с переходными типами напряженного состояния. Более высокая деформированность и раздробленность горных пород в зонах этих разломов по сравнению с Приморским может быть также связана с их большей активностью в голоцене. Об этом свидетельствуют масштаб палеосейсмодислокаций, приуроченных к Тункинскому и Главному Саянскому разломам, и более позднее время их формирования и активизации [8, 9], а также оценка современной сейсмической активности разломов [6]. В соответствии с [6], изученные нами разломы по степени современной сейсмической активности располагаются в следующем порядке: Тункинский, Главный Саянский, Приморский. Таким образом, результаты детальных геолого-структурных и тектонофизических исследований хорошо согласуются с палеосейсмогеологическими данными и оценкой современной сейсмической активности разломов и отражают всю сложность природной ситуации, запечатленной в разрывной структуре зон динамического влияния разломов.

Выводы

1. Сложная внутренняя структура зон динамического влияния разломов состоит из серии частных разрывных нарушений, представленных зонами дробления, расщепления, трещиноватости и милонитизации, разделенных относительно слабо нарушенными блоками. Большинство сместителей имеют области влияния, в пределах которых выделены участки с интенсивной, высокой и повышенной нарушенностью горных пород.

2. Внутренняя структура разломов определяется типом напряженного состояния земной коры и относительной степенью активности разломов в кайнозойское время. Это отражается как в особенностях проявления и кинематики отдельных элементов (форме блоков, структурных рисунках трещиноватости, направлениях подвижек по трещинам, локальных полях напряжений и т.п.), так и в основных количественных параметрах (их абсолютных значениях, мощности областей влияния частных сместителей, частоте встречаемости участков интенсивно нарушенных пород).

3. Подобный комплексный подход позволяет рассматривать разломы как многоуровневые системы, состоящие из структурных элементов различных иерархических уровней, и исследовать особенности их активизации в современном поле тектонических напряжений. Применение такого подхода для других регионов открывает большие возможности для решения прикладных задач, связанных с оценкой сейсмической опасности территорий, поисками и разработкой месторождений полезных ископаемых, а также с другими аспектами современных геологических изысканий при строительстве важных народнохозяйственных объектов (мостов, трубопроводов и т.д.).

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проекты № 01-05-97226, 01-05-64485, 02-05-06232.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гзовский М.В. Основы тектонофизики. М.: Недра, 1975.
2. Данилович В.Н. Метод поясов в исследовании трещиноватости, связанной с разрывными смещениями. Иркутск: Изд-во ИПИ, 1961.
3. Лунина О.В., Гладков А.С., Черемных А.В. Разрывная структура и трещиноватость зоны Приморского разлома (детальные исследования в долине р. Сарма) // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 5.
4. Николаев П.А. Методика статистического анализа трещин и реконструкция полей тектонических напряжений // Изв. вузов. Геология и разведка. 1977. № 12.
5. Расцветаев Л.М. Структурные рисунки трещиноватости и их геомеханическая интерпретация // Докл. РАН СССР. 1982. Т. 267. № 4.
6. Рундквист Д.В., Соболев П.О., Ряховский В.М. Отражение различных типов разломов в сейсмичности Байкальской рифтовой зоны // Докл. АН. 1999. Т. 366. № 6.
7. Семинский К.Ж., Гладков А.С. Новый подход к изучению тектонической трещиноватости в разрывных зонах // Геология и геофизика. 1991. № 5.
8. Хромовских В.С., Чипизубов А.В., Смекалин О.П. и др. Новые данные о палеосейсмодислокациях Байкальской рифтовой зоны // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. 1993.
9. Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 6.
10. Шерман С.И., Лунина О.В. Новая карта напряженного состояния верхней части литосферы Земли // Докл. РАН. 2001. Т. 378. № 5.
11. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. Разломообразование в литосфере. Зоны сдвига. Новосибирск: Наука, 1991.
12. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. Разломообразование в литосфере. Зоны растяжения. Новосибирск: Наука, 1992.
13. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Борняков С.А. и др. Разломообразование в литосфере. Зоны сжатия. Новосибирск: Наука, 1994.
14. Шерман С.И., Семинский К.Ж., Черемных А.В. Деструктивные зоны и разломо-блоковые структуры центральной Азии // Тихоокеанская геология. 1999. Т. 18. № 2.
15. Clifton A.E., Schlische R.W., Withjack M.O., Ackermann R.V. Influence of rift obliquity on fault-population systematics: results of experimental clay models // J. Struct. Geol. 2000. V. 22.
16. Harland W.B. Tectonic transpression in Calidonian Spitzbergen // Geol. Mag. 1971. V. 108.
17. Jones R.R., Tanner P.G. Strain partitioning in transpression zones // J. Struct. Geol. 1995. V. 17. № 6.

Институт земной коры СО РАН