

## АКТИВНЫЕ РАЗЛОМЫ И НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ФЛАНГА БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ ЗОНЫ

О.В. Лунина, А.С. Гладков

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

Представлены результаты исследований разломно-блоковой структуры и напряженного состояния земной коры для позднекайнозойского этапа развития северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны (БРЗ). Показано, что строение изученной территории определяется главным образом разломами СВ—ЮЗ и ВСВ—ЗЮЗ ориентировки, являющимися наряду с субширотными дизъюнктивными главными сейсмоконтролирующими структурами. По кинематическим характеристикам они относятся к сбросам, левосторонним сдвиго-сбросам или реже сбрососдвигам. Субмеридиональные, СЗ—ЮВ и ССЗ—ЮЮВ разломы несут следы преимущественно правосторонних сдвиговых смещений, а ЗСЗ—ВЮВ — левосторонних. Для многих из них типична сбросовая компонента. Установлено, что динамика развития впадин различна. Наибольшие скорости формирования разломной сети и осадконакопления характерны для Муйского бассейна. Геолого-структурные и сейсмологические данные свидетельствуют об относительной стабильности напряженного состояния регионального уровня на северо-восточном фланге БРЗ на протяжении плейстоцена—голоцена и современного этапа при превалировании СЗ—ЮВ растяжения. Существуют локальные вариации в ориентировках и углах наклона главных нормальных осей напряжений, а также изменения в соотношениях разных типов напряженного состояния для отдельных частей изученной площади. Развитие северо-восточного фланга БРЗ происходит под действием косоугольного растяжения, на что указывают сопоставленные с результатами моделирования пространственные взаимоотношения и кинематика активных в позднем кайнозое разломов, расположение впадин относительно друг друга, особенности распределения поля напряжений и данные по современной сейсмичности. Косоугольное растяжение было инициировано мантийными плюмами, расположенными под Кичерской, Верхнеангарской и Чарской депрессиями, что обусловило их формирование раньше других впадин северо-восточного фланга БРЗ.

*Активные разломы, напряженное состояние, поздний кайнозой, впадины, северо-восточный фланг Байкальской рифтовой зоны.*

## ACTIVE FAULTS AND CRUSTAL STRESS ON THE NORTHEASTERN FLANK OF THE BAIKAL RIFT SYSTEM

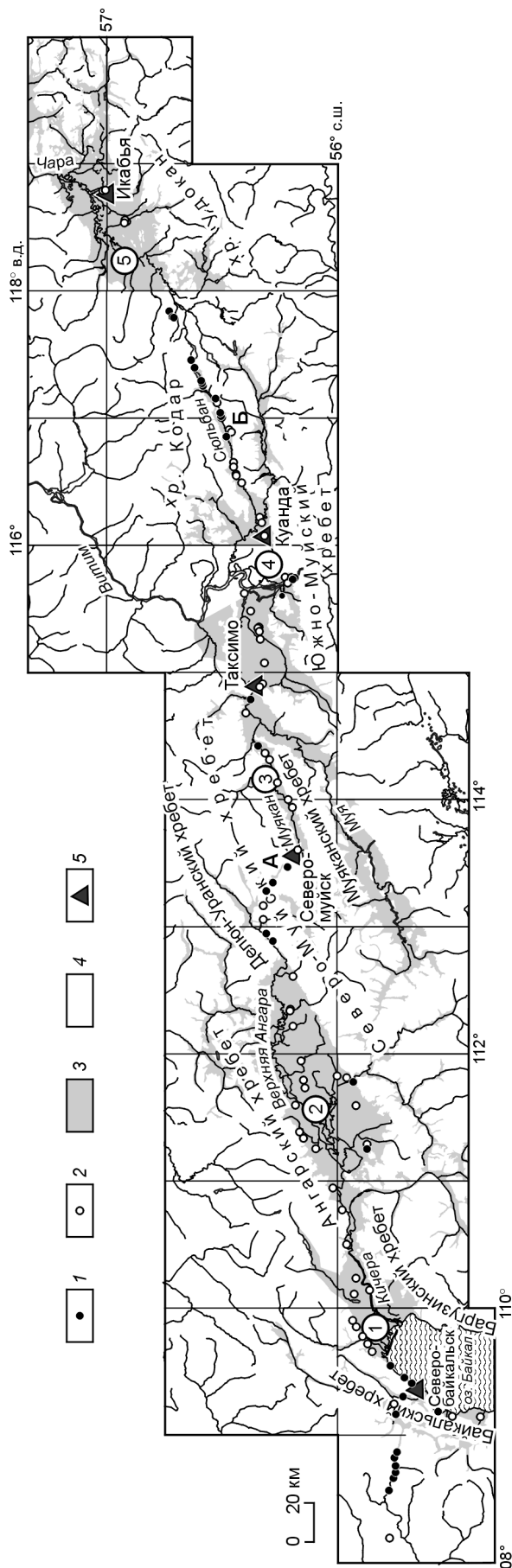
O.V. Lunina and A.S. Gladkov

We discuss the patterns of Late Cenozoic faulting and crustal stress on the northeastern flank of the Baikal rift system. The Late Cenozoic faults are mainly of NE and NE-E strike. Faults of these trends, along with W-E faults, have been principal seismogenic structures. They have normal or left-lateral oblique geometry with different amounts of horizontal motion. The N-S, NW, and N-NW faults bear signature of mostly right-lateral strike slip, and those of the NW-W direction are left-lateral strike-slip faults, often with a normal component. The rift basins in this part of the rift system have had different evolution dynamics, with the most rapid faulting and sedimentation in the Muya basin. According to structural and seismological data, regional stress in the area has been stable and dominated by NW extension through the Pleistocene-Holocene and the Present. The directions and obliquity angles of principal normal stresses and percentages of stress types show local lateral variations. The evolution of the northeastern flank of the Baikal rift system can be explained by a model of oblique rifting, which accounts for the architecture of rift basins, the pattern of Late Cenozoic active faults, and the stress pattern derived from structural and seismicity data. The model is consistent with centrifuge models of magma emplacement during continental oblique rifting. Oblique extension associated with underplated magma can be maintained in the area by mantle plumes beneath the Kichera, Upper Angara, and Chara rift basins. The presence of subcrustal magma chambers may explain why the three basins are the oldest in the NE flank of the rift system.

*Active faults, stress pattern, Late Cenozoic, rift basins, northeastern flank of the Baikal rift system*

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение разломно-блокового строения и напряженного состояния земной коры северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) является логическим продолжением работ, проведенных нами для Тункинского и Баргузинского рифтов [Лунина, Гладков, 2004а,б, 2007]. Цель этих исследований — картирование на базе единого методического подхода активных в позднем кайнозое разрывных нарушений в пределах рифтовых впадин и их горного обрамления, анализ особенностей разломно-блоковых структур и распределения поля напряжений в разных частях одной из наиболее подвижных в кайнозое тектонических структур Восточной Сибири.



**Рис. 1. Расположение точек геолого-структурных наблюдений в пределах северо-восточного фланга БРЗ.**

1, 2 — точки наблюдения; 1 — в коренных докайнозойских породах, 2 — в четвертичных отложениях; 3 — впадины, заполненные кайнозойскими осадками; 4 — выходы кристаллического фундамента; 5 — населенный пункт. Цифрами в кружках на схеме обозначены впадины: 1 — Кичерская, 2 — Верхнеангарская, 3 — Муяканская, 4 — Муйская, 5 — Чарская; буквами отмечены межвпадинные перемычки: А — Верхнеангарско-Муяканская; Б — Муйско-Чарская.

Существует несколько определений термина „активный разлом“, основанных на разной временной продолжительности активизации (от нескольких десятков—сотен лет до 1—2 млн лет) и(или) направленности и величине смещений [Vita-Finzi, 1986; Несмеянов и др., 1992; Трифионов и др., 1993; Никонов, 1995]. В настоящей работе под активностью дизъюнктива понимается его „повторное оживление“ в течение последних 1—2 млн лет или просто активизация за этот же интервал времени [Геодинамическая экспертиза..., 2006], т. е. за позднеплиоценовый—четвертичный период согласно новой международной стратиграфической шкале [International stratigraphic chart, 2005].

Северо-восточный фланг БРЗ представляет собой серию суходольных рифтовых впадин, наиболее крупными из которых являются Кичерская, Верхнеангарская, Муйская и Чарская. Именно в этих структурах, а также вдоль северо-западного борта оз. Байкал, в межвпадинных перемычках и Муяканской долине были сосредоточены наши полевые геолого-структурные и тектонофизические исследования (рис. 1). С западной и северной сторон впадины ограничены Байкальским, Ангарским, Делюн-Уранским, Северо-Муйским и Кодарским хребтами, последовательно сменяющими друг друга с запада на восток. С восточной и южной сторон вдоль впадин прослеживаются Баргузинский, Северо-Муйский, Муяканский, Южно-Муйский и Удоканский хребты. В последнем была сильно развита вулканическая деятельность, которая, согласно калий-аргоновым определениям возраста, началась в миоцене около 14 млн лет назад и, мигрируя с востока на запад, с некоторыми перерывами продолжалась до голоцена включительно [Рассказов и др., 2000]. Самые молодые датировки пород Удоканского вулканического поля относятся к интервалу 4.6—2.1 тыс. лет.

Мощность осадков во впадинах северо-восточного фланга различна. В Северо-Байкальской впадине, заполненной водой, она достигает 800—900 м, в Кичерской и Верхнеангарской — 2000 м, в Муяканской — 500 м, в Муйской — 2200 м, в Чарской — 1500 м [Logatchev, Zorin, 1992; San'kov et al., 2000]. Возраст этих депрессий

неоднозначный. Работы [Hutchinson et al., 1992; San'kov et al., 2000] и указывают, что время образования Северо-Байкальской впадины приходится на рубежи 5.7—6.6 и 3.4 млн лет соответственно, а работа [Логачев, 2003] свидетельствует, что ее развитие началось не в плиоцен-четвертичное время, а в олигоцене. Верхнеангарская впадина, по одним сведениям, заложилась в раннем миоцене [Шерман и др., 1984], так как в ее подошве были обнаружены миоценовые осадки [Белова, Ендрихинский, 1979], по другим сведениям, это произошло 4.1 млн лет назад [San'kov et al., 2000]. Для Муяканского, Муйского и Чарского бассейнов получены датировки 1—2.5, 1.1—1.9 и 3.2 млн лет соответственно [San'kov et al., 2000], но есть мнения о позднеолигоценном заложении Чарской и миоцен-плиоценовом возрасте Муйской впадин [Шерман и др., 1984]. Неопределенность указанных возрастов, по-видимому, связана с тем, что их интерпретация проводилась по данным разного типа. Так, в работе [San'kov et al., 2000] приводится расчетный возраст депрессий, отождествляемый с началом основной рифтовой фазы формирования рельефа при допущении, что скорость погружения впадин сохранилась с начала последней активизации движений до голоцена. Опираясь только на минимальную скорость голоценовых вертикальных смещений по разломам и мощность осадков, эти авторы оценили возраст начала активизации, который получился существенно меньше (но пропорционально для каждого бассейна), чем это было известно из геологических данных. Тем не менее результаты расчетов В.А. Санькова представляют большой интерес для других типов анализа, требующих численных характеристик, так как они выполнены по одной и той же методике для всех крупных впадин северо-восточного фланга.

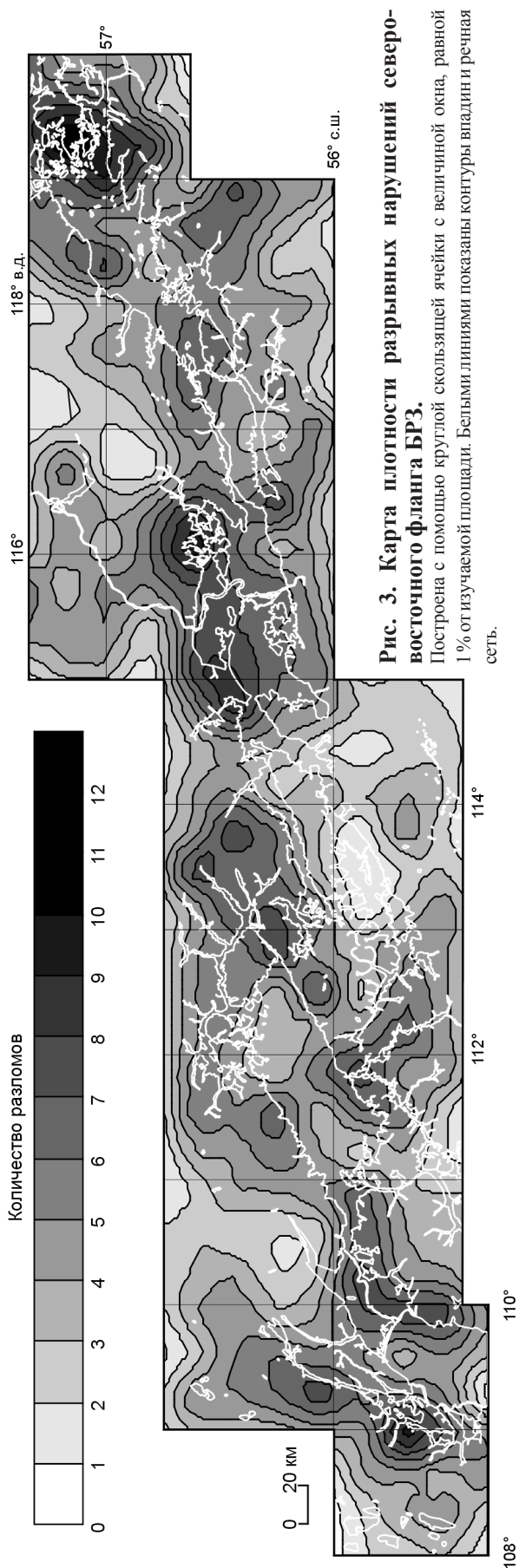
Наиболее значимые крупные разломы северо-восточного фланга БРЗ были охарактеризованы в монографии [Шерман и др., 1984]. Ее авторы отмечают, что разрывные нарушения северо-восточного и субширотного простираний являются, чаще всего, левыми сбрососдвигами, а северо-западные и субмеридиональные разломы — правыми сдвигами. Локальные дизъюнктивы они относят в основном к структурам растяжения (раздвигам, сбросам, сдвиго-сбросам и т. п.). Однако, по крайней мере, для голоценового времени приведенные выводы могут быть не совсем справедливы, так как для большинства разломов и сейсмодислокаций, описанных в работах [Солоненко и др., 1985; San'kov et al., 2000], определены только вертикальные компоненты смещений. Кроме того, фокальные механизмы очагов современных землетрясений чаще показывают преобладание сбросовой составляющей по северо-восточным и субширотным разрывным нарушениям. Вопрос о кинематике разломов является принципиальным, так как тип смещений — один из важных параметров, который свидетельствует в пользу тех или иных взглядов на формирование системы рифтовых впадин. Существуют две основные модели тектонического развития исследуемого региона: первая подразумевает, что северо-восточный фланг БРЗ представляет собой крупную сдвиговую зону или трансформный разлом [Sherman, 1992]; вторая, что он сформировался в результате косоугольного растяжения, по крайней мере, в течение фазы „быстрого“ рифтообразования [San'kov et al., 2000].

Для северо-восточного фланга БРЗ характерна высокая сейсмическая активность в голоцене и на современном этапе, что определяет необходимость исследований разломов данной территории не только для решения фундаментальных, но и прикладных задач. В ее пределах проходит Байкало-Амурская железнодорожная магистраль (БАМ), расположено несколько относительно крупных населенных пунктов, а сравнительно недалеко от этой площади ведется строительство трубопровода Тайшет—Сковородино. Изучение активных разломов, по мнению авторов, должно проходить в два основных этапа. Первый включает общее картирование разломно-блоковой структуры для плиоцен-четвертичного периода развития и сопутствующее ему изучение напряженного состояния на основе анализа трещиноватости для восстановления кинематики разрывов и в целом определения особенностей геодинамического режима территории. Второй этап состоит в том, чтобы выделить разломы, представляющие реальную опасность для активизации сейсмических и инженерно-геологических процессов, и изучить их более детально. В настоящей работе рассматриваются результаты первого этапа такого исследования.

#### **КАРТИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ РАЗЛОМОВ, АКТИВНЫХ В ПОЗДНЕМ КАЙНОЗОЕ**

Изучение разрывных нарушений на северо-восточном фланге БРЗ проводилось на базе аналогичного методологического подхода, использованного для Тункинского и Баргузинского рифтов [Лунина, Гладков, 2004б, 2007]. В основу карты разломно-блокового строения региона (рис. 2), которая явилась одним из главных результатов этого исследования, были положены материалы государственной геологической съемки м-ба 1:200 000, материалы дешифрирования цифровых космических снимков „Landsat“ (серия 2000) и трехмерных моделей рельефа, а также полевые данные о разломах и трещиноватости, собранные в 105 точках геолого-структурных наблюдений (т.н.) между населенными пунктами Северобайкальск и Икабья (см. рис. 1). При этом в отложениях позднего кайнозоя, представленных в основном плейстоцен-голоценовыми валунно-галечными и обломочными отложениями, песками, супесями и суглинками было задокументировано 69 т.н. Остальные — в гранитах, гранитогнейсах, сланцах, диоритах, габбро и габбро-диабазе докайнозойского возраста. Определение элементов залегания разломных зон в рыхлых отложе-





**Рис. 3. Карта плотности разрывных нарушений северовосточного фланга БРЗ.**  
 Построена с помощью круглой скользящей ячейки с величиной окна, равной 1% от изучаемой площади. Белыми линиями показаны контуры впадин и речная сеть.

Примечательно, что строение крупных впадин изучаемой площади заметно различается. Так, например, Верхнеангарская, Муяжанская и Муйская впадины ограничены крупными системами разломов с обоих бортов, в то время как в Кичерском и Чарском бассейнах с юго-восточной стороны многочисленные разрывные нарушения не образуют единых хорошо выраженных систем. Согласно карте плотности (рис. 3) дизъюнктивов, наибольшая раздробленность земной коры отмечается в зоне перехода от БРЗ к Сибирской платформе, по берегам оз. Байкал и в юго-восточной части Кичерской впадины, в районе Верхнеангарско-Муяжанской межвпадинной перемычки, в Муйской впадине и на северо-восточном замыкании Чарского бассейна. Сравнение возможных возрастов впадин ( $A$ ), приведенных в работе [San'kov et al., 2000], с относительной степенью их раздробленности ( $N$ ) (максимальной плотностью разломов на единице площади, зафиксированной во впадине или на ее периферии) (рис. 4,  $a, б$ ) показывает, что прямая зависимость между этими двумя параметрами не всегда существует. Это свидетельствует о том, что динамика их развития во времени различается. Для ее характеристики нами введен параметр скорости формирования разломной сети ( $R$ ), который рассчитывался путем деления  $N/A$  (максимальной плотности разломов на единице площади во впадине на возраст впадины). При этом имеется в виду, что какая-то часть разрывных нарушений (из этой разломной сети) существовала ранее и на этапе рифтогенеза активизировалась. Поскольку активизация подразумевает вскрытие залеченного разлома, мы используем обобщенное понятие для нового параметра. Кроме того, по данным в работе [San'kov et al., 2000], для каждой впадины рассчитана скорость осадконакопления ( $v$ ). Оба показателя ( $R$  и  $v$ ) хорошо коррелируют между собой (при коэф. корреляции  $r = 0.90$ ), т. е., как правило, чем выше скорость формирования разломной сети (см. рис. 4,  $в, з$ ). Наибольшая динамика развития характерна для Муйской впадины. Высокие скорости процессов разломообразования и осадконакопления отмечаются также в Чарской и Верхнеангарской впадинах. По-видимому, это и обуславливает их большие размеры по сравнению с Кичерским и Муяжанским бассейнами.

Кинематика разломов северо-восточного фланга БРЗ, установленная по прямым наблюдениям и анализу трещиноватости (рис. 5), подчиняется в основном тем же закономерностям, что и разрывные нарушения других районов БРЗ, т. е. СВ—ЮЗ, ВСВ—ЗЮЗ и субширотные дизъюнктивы являются сбросами, левосторонними сдвигосбросами или сбрососдвигами. Локально наблюдаются обратные подвижки. Субмеридиональные, СЗ—ЮВ и ССЗ—ЮЮВ разломы несут следы преимущественно правосторонних сдвиговых смещений, а ЗСЗ—ВЮВ — левосторонних. Многие из них также имеют сбросовую компоненту.

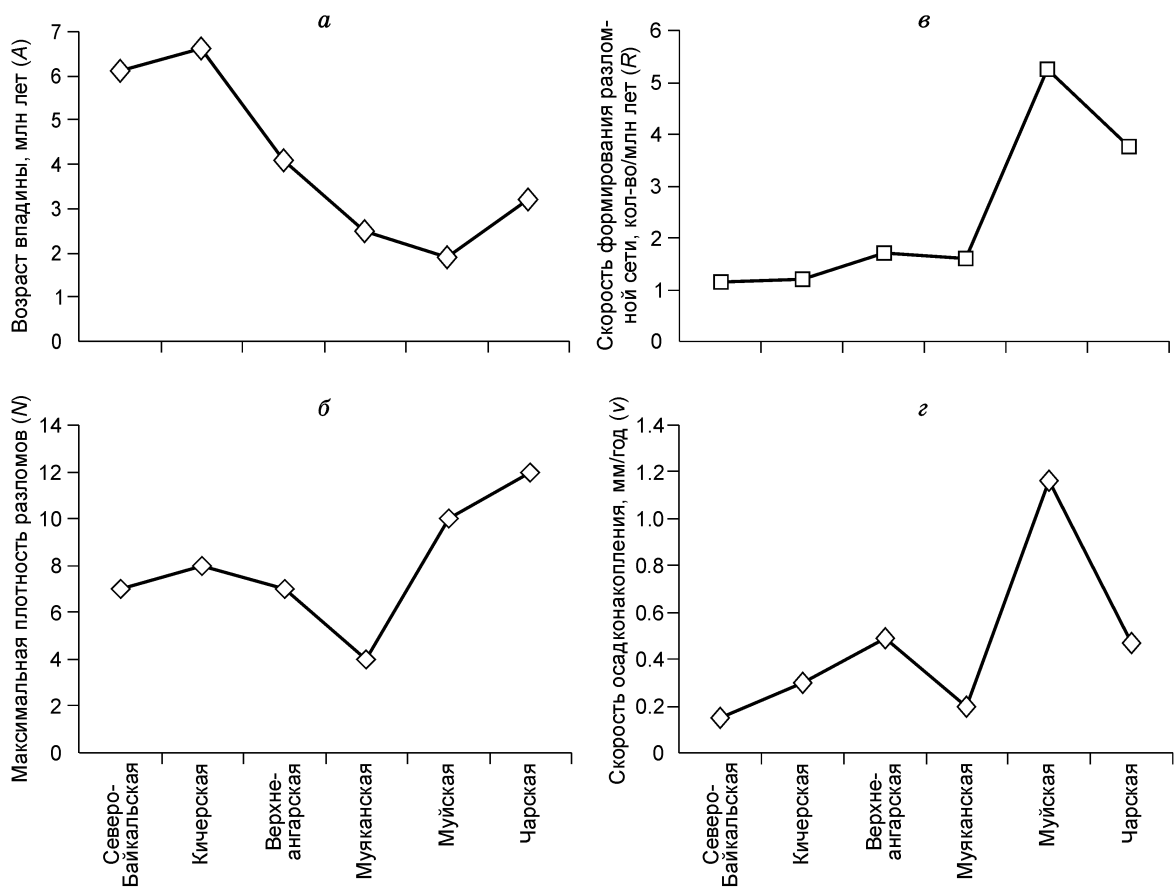


Рис. 4. Графики изменения различных параметров во впадинах северо-восточного фланга БРЗ.

*a* — возраст впадин; *б* — максимальная плотность разломов; *в* — скорость формирования разломной сети; *г* — скорость осадконакопления.

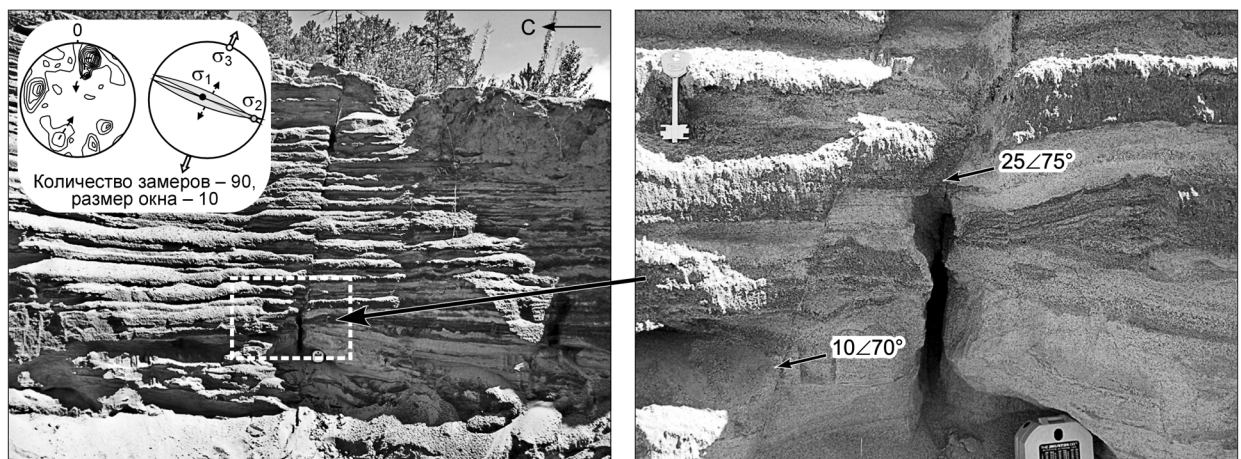


Рис. 5. Пример сбросовых смещений (возможно, с незначительной левосторонней сдвиговой компонентой) с амплитудой 3—5 см в разноцветных песках, вскрытых карьером в пос. Куанда (расположение поселка и т.н. см. на рис. 1).

В левом верхнем углу приведена диаграмма массового замера трещин в проекции верхней полусферы и реконструированное поле напряжений для данной т.н. Изолинии плотности максимумов трещиноватости проведены через 1.5; 2.5; 3.5; 4.5 и более %. Черными стрелками внутри диаграмм показаны направления преимущественных разбросов в максимумах трещиноватости, указывающие на сопряженность систем трещин по методике П.Н. Николаева [1992].  $\sigma_1$  — ось сжатия,  $\sigma_2$  — промежуточная ось,  $\sigma_3$  — ось растяжения.



Рис. 6. *а* — эпицентры землетрясений с  $K \geq 10$  за период с 1950 по 2005 г. (данные каталога Байкальского филиала Геофизической службы СО РАН) и известные механизмы очагов сейсмических событий за период с 1957 по 1999 г. по данным, опубликованным в работах [Мельникова, Радзиминович, 1998, 2003, 2004, 2005; Солоненко и др., 1993].

Механизмы очагов построены с помощью программного пакета RAKE в проекции нижней полушеры. Закрашены квадранты сжатия. Под механизмом очага указаны дата и магнитуда события (если имеется).

*б* — розы-диаграммы простираения нодальных плоскостей в механизмах очагов землетрясений, представленных на рис. *а* ( $n$  — 216, шаг — 10, макс.% — 10), макс.% — 10). *в* — круговая диаграмма, показывающая в процентах вклады полей напряжений разных типов в разрывную структуру северо-восточного фланга БРЗ по сейсмологическим данным.

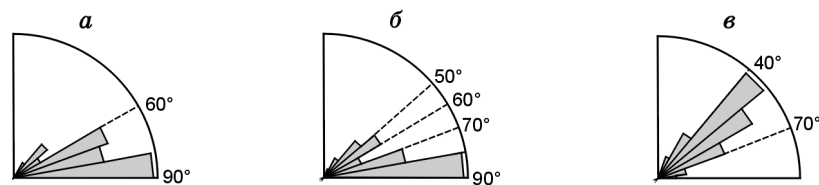


Рис. 7. Розы-диаграммы углов падения разрывных нарушений разного иерархического уровня:

*а* — сопряженных систем трещин ( $n$  — 160, шаг — 10, макс.% — 32), *б* — разломных зон ( $n$  — 65, шаг — 10, макс.% — 32), *в* — нодальных плоскостей ( $n$  — 216, шаг — 10, макс.% — 29).

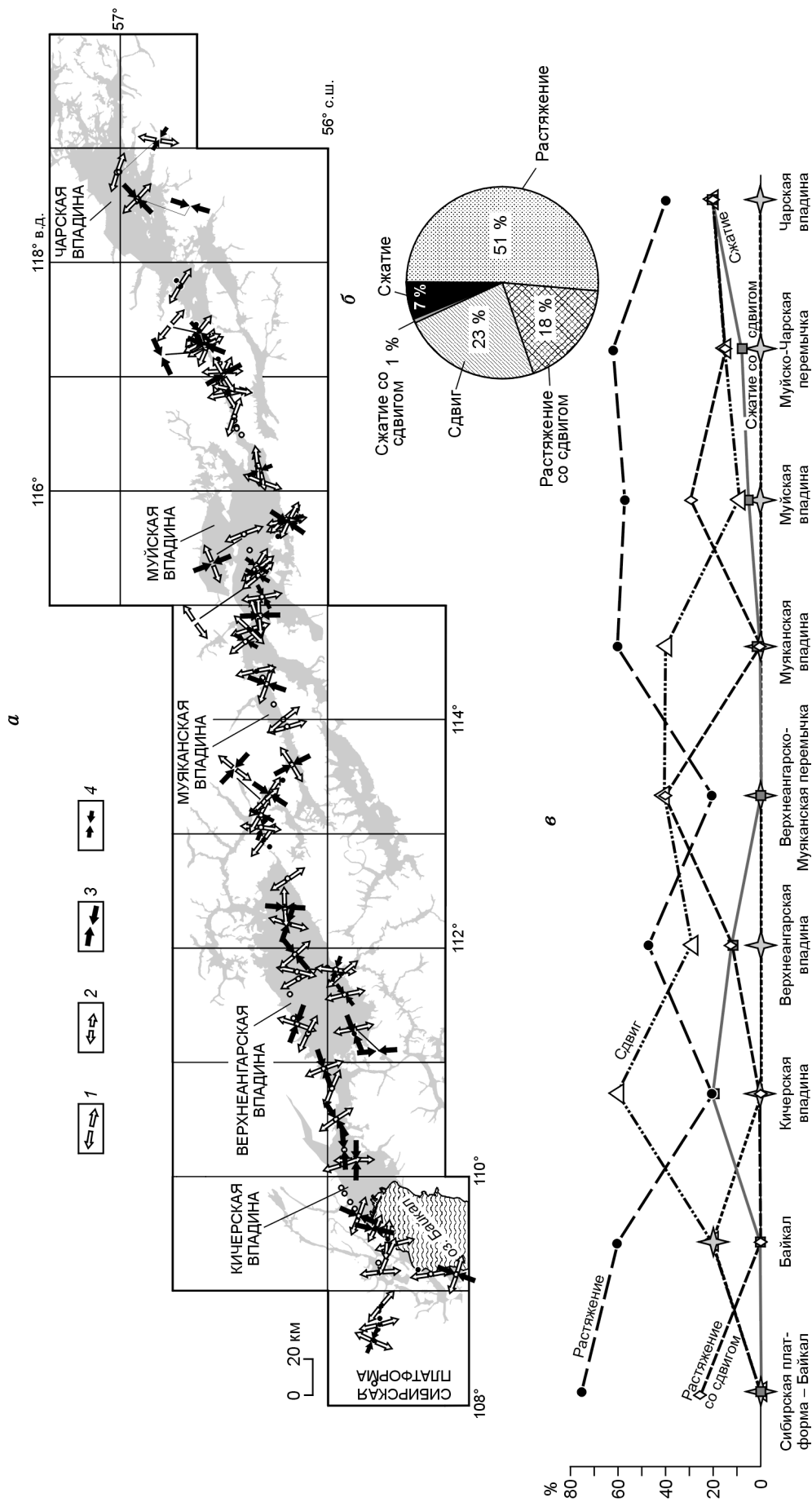
Нами проведено пространственное сопоставление разломов и землетрясений за период с 1957 по 1999 г., для которых известны механизмы очагов (рис. 6, *а*), полученные иркутскими сейсмологами и доступными в ряде их публикаций [Мельникова, Радзиминович, 1998, 2003, 2004, 2005; Солоненко и др., 1993]. Розы-диаграммы простираения установленных нодальных плоскостей (см. рис. 6, *б*) и откартированных разломов (см. рис. 2, *а—в*) практически совпадают, что может свидетельствовать о потенциальной активности последних не только в позднем кайнозое, но и на современном этапе. При этом СВ—ЮЗ, ВСВ—ЗЮЗ и субширотные дизъюнктивы являются главными сейсмоконтролирующими структурами, хотя разломы других направлений иногда также генерируют сейсмические события с магнитудой, достигающей 5.5. Анализ углов падения сопряженных систем трещин, разломных зон и нодальных плоскостей показывает, что на глубине наклон разрывных нарушений положе, чем в приповерхностной части: основной максимум на розе-диаграмме для первых находится в пределах 60—90°, для вторых — 50—60 и 70—90°, для третьих — 40—70° (рис. 7). Эпицентры землетрясений с  $K \geq 10$  за период с 1950 по 2005 г. (данные каталога Байкальского филиала Геофизической службы СО РАН, <http://www.seis-bykl.ru>) на северо-восточном фланге БРЗ располагаются как вблизи разломов, так и в блоковом пространстве (см. рис. 6, *а*), что может указывать на активное формирование новых дизъюнктивов, которые еще не получили яркой выраженности на поверхности. При этом в первом приближении можно увидеть, что более сильные сейсмические события чаще приурочены к зонам разломов, а не к центральным частям блоков.

#### НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПО ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНЫМ И СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Для реконструкции поля напряжений земной коры северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны первичным материалом традиционно служили массовые замеры трещин (в среднем по 50—100 трещин, в 11 т.н. — от 26 до 44 трещин), по которым строились диаграммы трещиноватости и обрабатывались с помощью хорошо известных в России методов П.Н. Николаева [1992] и М.В. Гзовского [1975]. Для отдельных точек наблюдения реконструкции были дополнены кинематическим методом [Yamaji, 2000], а также анализом поясов трещиноватости В.Н. Даниловича [1961]. Аналогичный подход нами был применен и для других частей БРЗ [Лунина, Гладков, 2004а,б, 2007].

Более ранние реконструкции напряженного состояния земной коры рассматриваемого региона были выполнены для отдельных участков трассы БАМ [Шерман и др., 1984; Шерман, Днепровский, 1989; Саньков и др., 1991]. Из последней обобщающей работы, посвященной изучению этой проблемы [Парфеев и др., 2002], следует, что среди стресс-тензоров, восстановленных по разрывам со штрихами скольжения, в пределах северо-восточного фланга БРЗ преобладают сдвиг и сдвиг с растяжением, а среди стресс-тензоров, определенных по механизмам очагов землетрясений, — растяжение и растяжение со сдвигом. Новые данные по разломам и трещиноватости, полученные нами за последние годы, позволили расширить количество точек наблюдений с решениями о поле напряжений по сравнению с приведенными в работе [Парфеев и др., 2002]. Для 72 т.н., 47 из которых задокументированы в осадках позднего кайнозоя, реконструировано 80 решений (рис. 8, *а*). Следует отметить, что такой обширный материал по





**Рис. 8. Поля напряжений земной коры северо-восточного фланга БРЗ по геолого-структурным данным:**

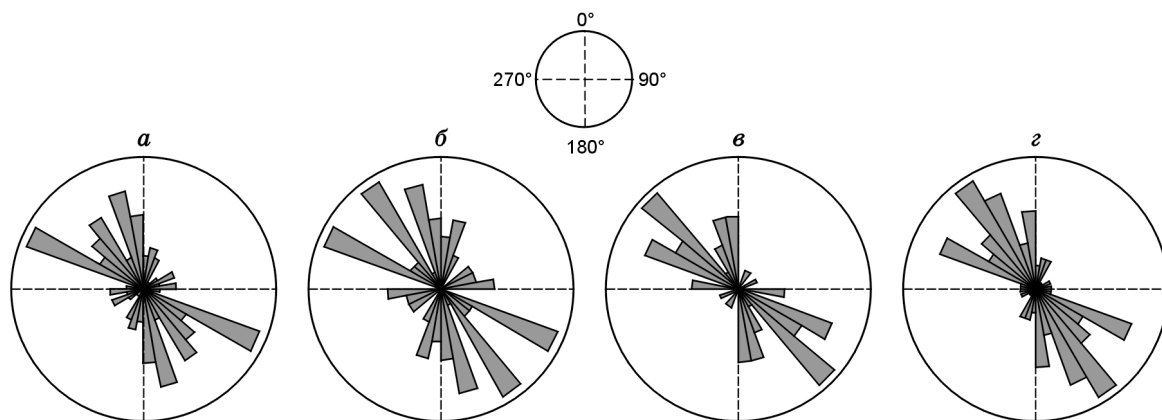
**а** — схема ориентировок осей главных напряжений растяжения и сжатия: оси с углами наклона 1, 3 — 0—30° и 2, 4 — 31—60°; 1, 2 — растяжения, 3, 4 — сжатия. Ост. усл. обозн. см. на рис. 1. **б** — круговая диаграмма, показывающая процентные вклады разных типов напряженного состояния в разрывную структуру района исследований; **в** — график, отражающий соотношение разных типов напряженного состояния на разных участках северо-восточного фланга.

трещиноватости в плиоцен-четвертичных отложениях, позволивших провести тектонофизический анализ, впервые получен для северо-восточного фланга БРЗ.

Прежде чем перейти к анализу результатов наших реконструкций необходимо оговорить, что под напряжениями сжатия и растяжения понимаются девиаторные напряжения, так как с помощью используемых нами методов оценить их величину невозможно. Кроме того, далее используется понятие о типах (режимах) напряженного состояния, которые определяются из известных соотношений углов наклона осей главных напряжений по отношению к горизонту [Шерман, Днепровский, 1989]. К ним относятся растяжение ( $\sigma_1 = 61\text{—}90^\circ$ ,  $\sigma_2 = 0\text{—}30^\circ$ ,  $\sigma_3 = 0\text{—}30^\circ$ ), растяжение со сдвигом ( $\sigma_1 = 31\text{—}60^\circ$ ,  $\sigma_2 = 31\text{—}60^\circ$ ,  $\sigma_3 = 0\text{—}30^\circ$ ), сдвиг ( $\sigma_1 = 0\text{—}30^\circ$ ,  $\sigma_2 = 61\text{—}90^\circ$ ,  $\sigma_3 = 0\text{—}30^\circ$ ), сжатие со сдвигом ( $\sigma_1 = 0\text{—}30^\circ$ ,  $\sigma_2 = 31\text{—}60^\circ$ ,  $\sigma_3 = 31\text{—}60^\circ$ ) и сжатие ( $\sigma_1 = 0\text{—}30^\circ$ ,  $\sigma_2 = 0\text{—}30^\circ$ ,  $\sigma_3 = 61\text{—}90^\circ$ , где  $\sigma_1$  — ось сжатия,  $\sigma_2$  — промежуточная ось,  $\sigma_3$  — ось растяжения).

Традиционно примененному ранее подходу [Лунина, Гладков, 2004а,б, 2007], были рассчитаны процентные вклады разных типов напряженного состояния в разрывную структуру северо-восточного фланга БРЗ. Из всех полученных решений 51 % отвечает растяжению, 18 % — растяжению со сдвигом, 23 % — сдвигу, 1 % — сжатию со сдвигом и 7 % — сжатию (см. рис. 8, б). Приведенное соотношение разных типов напряженного состояния характерно в целом для изучаемой площади, но оно отличается для разных частей северо-восточного фланга (см. рис. 8, в). Так, растяжение доминирует на сегменте Сибирская платформа—Байкал протяженностью примерно 50 км и вдоль его побережья, в Верхнеангарской, Муяканской, Муйской и Чарской впадинах, а также в Муйско-Чарской перемычке. В Кичерской впадине существенно преобладают сдвиговые деформации. Их значительный вклад отмечается и в Муяканской долине. В пределах Верхнеангарско-Муяканской межвпадинной перемычки в равной степени проявлены сдвиг и растяжение со сдвигом, а растяжение меньше. На основании результатов, приведенных на рис. 8, в, можно сделать вывод об активном разрастании узкой Муяканской впадины и разрушении Муйско-Чарской перемычки за счет преимущественно сбросов по ВСВ—ЗЮЗ разломам. В пользу этого свидетельствуют также морфологические признаки: со стороны юг-юго-восточных бортов рек Муякан и Сюльбан четко выражены сбросовые фасы. Сжатие и сжатие со сдвигом проявлены на изучаемой территории лишь в семи точках наблюдения (см. рис. 8, а), причем не только в докайнозойских породах, но и в плейстоцен-голоценовых осадках. Данный факт подтверждает, что в областях растяжения и трансензии проявления локального сжатия в один и тот же временной период закономерны.

Ориентировка субгоризонтальных осей растяжения находится преимущественно в северо-западных румбах, что согласуется с общеизвестными данными для северо-восточного фланга и в целом для всей БРЗ. Максимумы на розе-диаграмме для всех решений растяжения, растяжения со сдвигом и сдвига приходятся на интервалы  $290\text{—}300$ ,  $310\text{—}330$ ,  $340\text{—}360^\circ$  (рис. 9, а). Разделение данных в зависимости от возраста не дало существенных различий. Большинство субгоризонтальных осей растяжения, реконструированных по замерам трещин в плиоцен-четвертичных отложениях, простираются в интервалах  $290\text{—}300$ ,  $320\text{—}330$ ,  $340\text{—}20^\circ$  (см. рис. 9, б), в докайнозойских породах — в интервалах  $290\text{—}320$ ,  $340\text{—}360^\circ$  (см. рис. 9, в). Это еще раз свидетельствует о том, что, делая статистический замер незалеченных, „свежих на вид“ сколовых трещин в докайнозойских породах, мы фиксируем главным образом



**Рис. 9. Ориентировка осей растяжения с углами наклона  $\leq 30^\circ$ :**

*a* — во всех решениях, реконструированных по трещиноватости ( $n = 73$ , шаг — 10, макс. % — 15); *б* — в решениях, реконструированных по трещиноватости, измеренной в позднекайнозойских отложениях ( $n = 47$ , шаг — 10, макс. % — 14); *в* — в решениях, реконструированных по трещиноватости, измеренной в докайнозойских породах ( $n = 26$ , шаг — 10, макс. % — 19); *г* — в механизмах очагов землетрясений, приведенных на рис. 6, *а* ( $n = 92$ , шаг — 10, макс. % — 16).

результат последних деформаций, т. е. вновь образованные или активизированные разрывы. Анализ осей растяжения с углами наклона до  $30^\circ$  в механизмах очагов землетрясений также показывает преобладание ориентировок между  $290$  и  $360^\circ$  с наиболее проявленными максимумами в интервалах  $290$ — $300$  и  $320$ — $340^\circ$  (см. рис. 9, з).

Исходя из количества известных для изучаемой площади механизмов очагов землетрясений (108), были рассчитаны процентные вклады разных типов напряженного состояния в разрывную структуру северо-восточного фланга БРЗ. Результаты показывают, что 57 % всех доступных для анализа решений отвечает растяжению, 24 % — растяжению со сдвигом, 1 % — сдвигу, 5 % — сжатию со сдвигом, 6 % — сжатию и 7 % — неопределенному типу, когда обе оси сжатия и растяжения имеют углы наклона более  $30^\circ$  по отношению к горизонту (см. рис. 6, в). Таким образом, за исключением напряженного состояния сдвига, процентные вклады, рассчитанные по геолого-структурным и сейсмологическим данным, очень близки, что определенно свидетельствует об относительной стабильности напряженного состояния регионального уровня на северо-восточном фланге БРЗ на протяжении плейстоцена—голоцена и современного этапа. Что касается сдвиговых деформаций, которые фиксируются в трещиноватости, но редко отражаются в сейсмических событиях, то здесь, как и для Баргузинского рифта, можно предположить следующее. Значительное несоответствие указывает либо на ослабление сдвиговых деформаций на современном этапе, либо на неспособность геолого-геофизической среды в этом районе накапливать напряжения, которые могли бы реализоваться по типу сдвига в виде ощутимого землетрясения [Лунина, Гладков, 2007]. В последнем случае такие напряжения могут разряжаться путем малоамплитудных сдвиговых смещений, не превышающих первые сантиметры, что можно наблюдать только в трещиноватости.

Исследование напряженного состояния земной коры подтвердило некоторые ранее известные выводы для северо-восточного фланга БРЗ о превалировании СЗ—ЮВ растяжения на современном этапе [Парфеевец и др., 2002]. В то же время оно позволило установить, что значительных изменений напряженного состояния с позднего кайнозоя, т. е., по-видимому, на протяжении всего развития впадин северо-восточного фланга БРЗ, формирование которых, согласно работе [San'kov et al., 2000], началось не ранее 7 млн лет назад, не было. Можно лишь допустить некоторое ослабление сдвиговых деформаций на современном этапе. Существуют локальные вариации в ориентировках и углах наклона осей главных напряжений, которые характерны и для других районов БРЗ, а также изменения соотношений разных типов напряженного состояния для разных частей северо-восточного фланга.

#### ОСОБЕННОСТИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО РАЗВИТИЯ И МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОГО ФЛАНГА БРЗ

Система суходольных впадин на северо-восточном фланге БРЗ по сравнению с Тункинской и Южно-Байкальской рифтовыми долинами моложе по времени образования, но ее протяженность сопоставима с центральной частью рифтовой зоны. Исходя из абсолютных возрастов впадин, рассчитанных В.А. Саньковым с соавторами [San'kov et al., 2000], и мощности осадков, достигающей в Верхнеангарском и Муйском бассейнах 2000 и 2200 м соответственно, можно сделать вывод, что разломообразование и формирование впадин на северо-восточном фланге происходили во много раз быстрее, чем, например, в Тункинской долине с максимальной мощностью осадков 2500 м и однозначно установленным олигоценным возрастом заложения [Logatchev, Zorin, 1987]. Неравномерная скорость осадконакопления в разных частях БРЗ отмечалась Н.А. Логачевым [2003]. Для Байкала она колеблется в пределах  $0.04$ — $0.2$  мм/год [Коллектив..., 2000]. Для собственно Верхнеангарской и Муйской депрессий известны единичные определения по  $^{14}\text{C}$ , равные  $2.0$ — $20.2$  мм/год [Кульчицкий, 1991], которые хотя и могут быть эпизодическими, указывают на очень высокий темп тектонического опускания (приведенные на рис. 4, з скорости осадконакопления можно рассматривать как средние). Не случайно именно для северо-восточного фланга БРЗ известно наибольшее количество сильных землетрясений как по макросейсмическим и инструментальным, так и по палеосейсмогеологическим данным [Солоненко и др., 1985]. Плотное скопление сейсмических событий (см. рис. 6, а) в некоторых тектонических блоках свидетельствует об активном продолжении разломообразования на глубине, и можно ожидать новые разрывные нарушения на поверхности в таких местах. Исходя из приведенных данных, следует, что интенсивное формирование впадин на северо-восточном фланге БРЗ началось после компрессионной фазы сжатия в позднем миоцене—раннем плиоцене (около  $7$ — $5$  млн лет назад), когда увеличилась скорость вертикальных тектонических движений [Логачев, 2003], что согласуется с выводами в работе [San'kov et al., 2000]. Учитывая находки миоценовых отложений в подошве Чарской впадины [Белова, Ендрихинский, 1979] и возможность их присутствия в других бассейнах района исследований (например, в Верхнеангарской и Кичерской впадинах), необходимо иметь в виду, что заложение депрессий могло произойти несколько раньше, но, вероятно, без участия процессов, связанных с разломообразованием.

Наши исследования на северо-восточном фланге подтвердили результаты В.А. Санькова с соавторами [San'kov et al., 2000] о преимущественно сбросовом и сдвиго-сбросовом характере смещений по главным СВ—ЮЗ, ВСВ—ЗЮЗ и субширотным разломам в плейстоцен-голоценовое и современное время. В свою очередь, это противоречит выводам о кинематике дизъюнктивов в работе [Шерман и др., 1984], в которой предпочтение отдается преобладанию сдвиговой компоненты. Данную несогласованность следует связывать, по-видимому, с накоплением новых данных о разломной структуре и трещиноватости, измеренной в позднекайнозойских отложениях. Ранее изучению разрывов в молодых рыхлых и слабо-цементированных осадках уделялось очень мало внимания. Таким образом, модель формирования северо-восточного фланга БРЗ в виде сдвиговой (трансформной) зоны не находит фактического подтверждения ни в полевых геолого-структурных, ни в сейсмологических данных, известных на сегодняшний день. Результаты реконструкций напряженного состояния также свидетельствуют, что растяжение в пределах изученной территории преобладает над другими типами стресс-тензоров.

Модель формирования северо-восточного фланга БРЗ в результате косоугольного растяжения является наиболее приемлемой, по мнению авторов. Сопоставление системы эшелонированных сбросов, сдвиго-сбросов и сбрососдвигов и их геометрических параметров с экспериментальными моделями в общих чертах уже было проведено для этого региона [San'kov et al., 2000]. Наши исследования разломно-блоковой структуры и напряженного состояния земной коры подтверждают сделанные ранее наблюдения о подобии структуры в природной обстановке и получаемой в лабораторных условиях при приложении вектора растягивающих усилий под углом  $\alpha \leq 30\text{--}40^\circ$  к воображаемому перпендикуляру деформируемой зоны. Рассмотренные в настоящей работе данные о возрасте впадин и эксперименты по косоугольному растяжению, выполненные на центрифуге при наличии имитированной магмы в континентальной коре и без нее [Corti et al., 2001], позволяют уточнить модель косоугольного растяжения для северо-восточного фланга БРЗ. В модели при  $\alpha \leq 35^\circ$  с магмой в основании деформация накапливалась главным образом путем смещений вдоль разломов, определяющих выпуклый центральный грабен. Однако в начальные стадии рифтообразования ему предшествовало формирование двух грабенов в боковых окончаниях модели, ограниченных эшелонированными сбросами и сдвиго-сбросами. Этот эксперимент хорошо объясняет формирование в процессе косоугольного растяжения сначала Кичерской, Верхнеангарской и Чарской впадин, расположенных на краях фланга, а затем центрального Муйского грабена с довольно высокой плотностью разломов. Именно под Кичерской, Верхнеангарской и Чарской впадинами расположены стволы части мантийных плюмов, выявленные по геофизическим данным [Зорин, Турутанов, 2005]. Они, вероятно, и инициировали в первую очередь развитие перечисленных бассейнов на северо-восточном фланге БРЗ. Эксперименты, проведенные при  $\alpha \geq 45^\circ$  и (или) без магмы в основании коры [Corti et al., 2001], не удовлетворяют так хорошо структурной обстановке изучаемого региона, как описанная выше модель.

Геометрические взаимоотношения и кинематика активных в позднем кайнозое разломов, откартированных нами, а также особенности проявления поля напряжений находятся в абсолютном соответствии с уточненной моделью развития северо-восточного фланга БРЗ. Активное разрастание узкой Муяканской впадины и разрушение Муйско-Чарской перемычки за счет сбросов указывают на то, что в будущем, по крайней мере, Муйская, Чарская и Муяканская депрессии должны соединиться в одну рифтовую долину. В моделях без магмы в основании коры формировались два эшелонированных грабена, которые никогда не объединялись, и поэтому их центральная часть оставалась частично недеформированной и подвергалась вращению [Corti et al., 2001], что не соответствует структурной обстановке изучаемого региона. Кроме того, розы-диаграммы простираний разломов на северо-восточном фланге (см. рис. 2, а—в) сопоставимы с гистограммами ориентации разломов для моделей с магмой [Corti et al., 2001, см. рис. 4]. В экспериментах без магмы разрывная сеть в конечной стадии формирования более сложная. Таким образом, приведенные данные свидетельствуют, что косоугольное растяжение в исследуемом регионе было инициировано мантийными плюмами, расположенными на окончаниях северо-восточного фланга БРЗ [Зорин, Турутанов, 2005, см. рис. 6].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволили уточнить ранее существовавшие представления об особенностях геодинамического развития северо-восточного фланга Байкальской рифтовой зоны, а также выявить некоторые новые закономерности в строении разломной сети, особенностях распределения поля напряжений земной коры и развитии рифтовых впадин в пределах изученной площади. Ниже приводятся основные выводы данной работы.

1. На северо-восточном фланге БРЗ в позднем кайнозое формировались и активизировались разрывные нарушения различных направлений, среди которых преобладают разломы СВ—ЮЗ и ВСВ—ЗЮЗ ориентировки, являющиеся, наряду с субширотными дизъюнктивами, главными сейсмоконтролирующими структурами в регионе. В горном обрамлении по сравнению с впадинами наблюдается более широкое распространение разломов СЗ—ЮВ ориентировки.

2. Кинематика разломов северо-восточного фланга подчиняется тем же закономерностям, что и разрывные нарушения других районов БРЗ. Дизъюнктивы СВ—ЮЗ, ВСВ—ЗЮЗ и субширотного простираются в основном сбросами, левосторонними сдвигосбросами или реже сбрососдвигами. Субмеридиональные, СЗ—ЮВ и ССЗ—ЮЮВ разломы несут следы преимущественно правосторонних сдвиговых смещений, а ЗСЗ—ВЮВ — левосторонних. Для многих из них также типична сбросовая компонента.

3. Эпицентры современных землетрясений с  $K \geq 10$  располагаются в пределах изученной площади как вблизи разломов, так и в блоковом пространстве, что указывает на активное формирование новых дизъюнктивов, которые еще не получили яркой выраженности на поверхности. При этом сильные сейсмические события приурочены в основном к зонам разломов, а не к центральным частям блоков.

4. Динамика развития впадин северо-восточного фланга во времени различна. Введенный показатель скорости формирования разломной сети (с использованием плотности разломов) хорошо коррелирует со скоростью осадконакопления, показывая, что чем выше первый параметр, тем выше второй. Наибольшая динамика развития характерна для Муйской впадины. Высокие скорости разломообразования и осадконакопления отмечаются также в Чарской и Верхнеангарской впадинах.

5. Сопоставление геолого-структурных и сейсмологических данных свидетельствует об относительной стабильности напряженного состояния регионального уровня на северо-восточном фланге БРЗ на протяжении плейстоцена—голоцена и современного этапа при превазировании СЗ—ЮВ растяжения. Существуют локальные вариации в ориентировках и углах наклона осей главных напряжений, которые характерны и для других районов БРЗ, а также изменения в соотношениях разных типов напряженного состояния для отдельных частей изученной территории.

6. Анализ опубликованных материалов предшественников показывает, что интенсивное формирование впадин на северо-восточном фланге БРЗ началось после компрессионной фазы сжатия в позднем миоцене—раннем плиоцене около 7—5 млн лет назад, когда увеличилась скорость вертикальных тектонических движений [Логачев, 2003], что согласуется с выводами в работе [San'kov et al., 2000]. При этом, учитывая находки миоценовых отложений в подошве Чарской впадины [Белова, Ендрихинский, 1979] и возможность их присутствия в других бассейнах района исследований, предполагается, что заложение депрессий могло произойти несколько раньше, но без участия процессов, связанных с разломообразованием.

7. Развитие северо-восточного фланга БРЗ происходит под действием косоугольного растяжения с углом менее  $35^\circ$  между растягивающими усилиями и воображаемым перпендикуляром рифтовой структуры. На это указывают сопоставленные с результатами моделирования [Corti et al., 2001] пространственные взаимоотношения и кинематика активных в позднем кайнозойском разломов, расположение впадин относительно друг друга, особенности распределения разных типов напряженного состояния и данные по современной сейсмичности. Косое растяжение было инициировано мантийными плюмами, расположенными под Кичерской, Верхнеангарской и Чарской депрессиями [Зорин, Турутанов, 2005], что обусловило их формирование раньше других впадин северо-восточного фланга.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что карта разломно-блокового строения, составленная для позднекайнозойского этапа развития на базе тщательного анализа различных материалов и геолого-структурных данных о тектонических деформациях в рыхлых и слабосцементированных отложениях, является важным результатом, открывающим новые возможности для проведения различных исследований геолого-геофизических процессов, в которых роль разломов имеет ведущее значение.

Авторы искренне благодарны Ю.Л. Ребецкому и анонимному рецензенту за конструктивные замечания и полезные советы, позволившие улучшить статью.

Исследования проводились при поддержке гранта № 134 Лаврентьевского конкурса СО РАН, комплексного (интеграционного) проекта СО РАН № 6.13, гранта РФФИ (04-05-64148) и INTAS (05-109-4383), гранта Президента РФ МК-1323.2007.5 и премии Фонда содействия отечественной науке.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Белова В.А., Ендрихинский А.С.** Новое местонахождение миоценовых отложений на территории Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика, 1979 (12), с. 42—47.

**Геодинамическая** экспертиза при оценке эколого-промышленной опасности объектов недропользования: <http://www.tehnoprogress.ru/geodynamic.html>, 2006.

**Гзовский М.В.** Основы тектонофизики. М., Недра, 1975, 536 с.

**Данилович В.Н.** Метод поясов в исследовании трещиноватости, связанной с разрывными смещениями. Иркутск, Иркут. политех. ин-т, 1961, 48 с.

**Зорин Ю.А., Турутанов Е.Х.** Плюмы и геодинамика Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (5), с. 685—699.

**Коллектив** участников проекта „Байкал-бурение“. Позднекайнозойская палеоклиматическая запись в осадках озера Байкал // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (1), с. 3—32.

**Кульчицкий А.А.** Скорость накопления верхнеплейстоценовых отложений Верхнеангарской и Муйской впадин Байкальской рифтовой зоны // Докл. АН СССР, 1991, т. 320, № 4, с. 941—945.

**Логачев Н.А.** История и геодинамика Байкальского рифта // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (5), с. 391—406.

**Лунина О.В., Гладков А.С.** Морфотектоника и поля напряжений Тункинского рифта // Рельефообразующие процессы: теория, практика, методы исследования. Материалы XXVIII пленума Геоморфологической комиссии РАН. Новосибирск, ИГ СО РАН, 2004а, с. 171—173.

**Лунина О.В., Гладков А.С.** Разломная структура Тункинского рифта — отражение процесса косоугольного растяжения // Докл. РАН, 2004б, т. 398, № 4, с. 516—518.

**Лунина О.В., Гладков А.С.** Разломно-блоковое строение и поля напряжений земной коры Баргузинского рифта в позднем кайнозое (Байкальский регион) // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (7), с. 775—790.

**Мельникова В.И., Радзиминович Н.А.** Механизм очагов землетрясений Байкальского региона за 1991—1996 годы // Геология и геофизика, 1998, т. 39 (11), с. 1598—1607.

**Мельникова В.И., Радзиминович Н.А.** Прибайкалье и Забайкалье. Каталог механизмов землетрясений (CD-ROM) // Землетрясения Северной Евразии в 1997 г. Обнинск, ГС РАН, 2003, с. 218.

**Мельникова В.И., Радзиминович Н.А.** Прибайкалье и Забайкалье. Каталог механизмов очагов землетрясений (CD-ROM) // Землетрясения Северной Евразии в 1998 г. Обнинск, ГС РАН, 2004, с. 481.

**Мельникова В.И., Радзиминович Н.А.** Прибайкалье и Забайкалье. Каталог механизмов очагов землетрясений (CD-ROM) // Землетрясения Северной Евразии в 1999 г. Обнинск, ГС РАН, 2005, с. 731—733.

**Несмеянов С.А., Ларина Т.А., Латынина Л.А., Миндель И.Г., Серебрякова Л.И., Соколов В.С., Хайме Н.М.** Выявление и прогноз опасных разрывных тектонических смещений при инженерных изысканиях для строительства // Инженерная геология, 1992, № 2, с. 17—32.

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

**Никонов А.А.** Активные разломы: определение и проблемы выделения // Геоэкология, 1995, № 4, с. 16—27.

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

**Рассказов С.В., Логачев Н.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Иванов А.В.** Геохронология и геодинамика позднего кайнозоя: (Южная Сибирь—Южная и Восточная Азия). Новосибирск, Наука, 2000, 288 с.

**Саньков В.А., Днепровский Ю.И., Коваленко С.Н., Борняков С.А., Гилева Н.А., Горбунова Н.Г.** Разломы и сейсмичность Северо-Муйского геодинамического полигона. Новосибирск, Наука, 1991, 111 с.

**Солоненко В.П., Николаев В.В., Семенов Р.М., Демьянович М.Г., Курушин Р.А., Хромовских В.С., Чипизубов А.В.** Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмогеология и сейсмическое районирование. Новосибирск, Наука, 1985, 192 с.

**Солоненко А.В., Солоненко Н.В., Мельникова В.И., Козьмин Б.М., Кучай О.А., Суханова С.С.** Напряжения и подвижки в очагах землетрясений Сибири и Монголии // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии, Вып. 1. М., ИФЗ РАН, 1993, с. 113—122.

**Трифонов В.Г., Кожурин А.И., Лукина Н.В.** Изучение и картирование активных разломов // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии, Вып. 1. М., ИФЗ РАН, 1993, с. 196—205.

**Шерман С.И., Днепровский Ю.И.** Поля напряжений земной коры и геологоструктурные методы их изучения. Новосибирск, Наука, 1989, 158 с.

**Шерман С.И., Леви К.Г., Ружич В.В., Саньков В.А., Днепровский Ю.И., Рассказов С.В.** Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника. Новосибирск, Наука, 1984, 208 с.

**Corti G., Bonini M., Innocenti F., Manetti P., Mulugeta G.** Centrifuge models simulating magma emplacement during oblique rifting // J. Geodyn., 2001, v. 31, p. 557—576.

**Hutchinson D.R., Golmshtok A.J., Zonenshain L.P., Moore T.C., Scholz C.A., Klitgord K.D.** Depositional and tectonic framework of the rift basins of lake from multichannel seismic data // Geology, 1992, v. 20, p. 589—592.

**International stratigraphic chart** // International Commission on Stratigraphy. <http://www.stratigraphy.org/chus.pdf>, 2005.

**Logatchev N.A., Zorin Yu.A.** Evidence and causes of the two-stage development of the Baikal rift // Tectonophysics, 1987, v. 143, № 1—3, p. 225—334.

**Logatchev N.A., Zorin Y.A.** Baikal rift zone: structure and geodynamics // Tectonophysics, 1992, v. 208, p. 273—286.

**San'kov V., Déverchère J., Gaudemer Y., Houdry F., Filippov A.** Geometry and rate of faulting in the North Baikal Rift, Siberia // Tectonics, 2000, v. 19, № 4, p. 707—722.

**Sherman S.I.** Fault and tectonic stresses of the Baikal rift system // Tectonophysics, 1992, v. 208, p. 297—307.

**Vita-Finzi C.** Recent Earth movements. London, Toronto, Acad. Press, 1986, 226 p.

**Yamaji A.** The multiple inverse method: a new technique to separate stresses from heterogeneous fault-slip data // J. Struct. Geol., 2000, v. 22, p. 441—452.

*Рекомендована к печати 22 мая 2007 г.  
О.П. Полянским*

*Поступила в редакцию  
24 октября 2006 г.*