

РАЗЛОМНО-БЛОКОВОЕ СТРОЕНИЕ И ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ЗЕМНОЙ КОРЫ БАРГУЗИНСКОГО РИФТА В ПОЗДНЕМ КАЙНОЗОЕ (Байкальский регион)

О.В. Лунина, А.С. Гладков

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

На основании новых данных структурно-геологических и тектонофизических исследований с привлечением опубликованных материалов геофизики и сейсмологии охарактеризованы разломно-блоковое строение и поля напряжений земной коры Баргузинского рифта на позднекайнозойском этапе развития. Определена роль разломов различных направлений в строении рифта. Показано, что дизъюнктивы северо-восточного направления доминируют. Установлено заметное влияние на структурное оформление рифта и вариации напряженного состояния крупного линеймента субмеридионального простирания протяженностью более 400 км, который проявляется в виде зоны разобщенных разломных сегментов между 110° и $110^\circ 30'$ в.д. На фоне господствующего растяжения в позднем кайнозое широкое развитие получили сдвиговые поля напряжений, возникающие как производные от регионального растяжения и реализующиеся путем сдвиговых смещений по разрывным нарушениям, поперечным к сбросам северо-восточного или север-северо-восточного направления, или в комбинации с ними. Векторы растягивающих напряжений в Баргузинском рифте относительно стабильны и ориентированы преимущественно на северо-запад—юго-восток практически ортогонально к рифтовой оси. Карты разломно-блокового строения и полей напряжений регионов предлагается использовать в качестве основы для оценки сейсмической опасности территорий, связанной с активизацией разломов и блоков, в постоянно действующем и изменяющемся поле напряжений.

Разломы, поля напряжений, поздний кайнозой, Баргузинский рифт, Байкальский регион.

LATE CENOZOIC FAULT PATTERN AND STRESS FIELDS IN THE BARGUZIN RIFT (Baikal region)

O.V. Lunina and A.S. Gladkov

New structural and tectonophysical data, combined with the published geophysical and seismological evidence, were used to map the Late Cenozoic fault pattern and crustal stress in the Barguzin rift. Faults striking in the NE direction are the most abundant elements of the rift structure. A special part in the Late Cenozoic patterns of faults and stresses belongs to an over 400 km long N-S lineament, which shows up as a system of separate fault segments between 110° and $110^\circ 30'$ E. The Late Cenozoic evolution of the rift has been controlled mainly by extension punctuated with local shear stresses derived from the regional extension stress and accommodated by strike-slip motions along NE or N-NE faults and/or along their subsidiary cross faults. The direction of extension was relatively stable, from NW to SE, almost rift-orthogonal. The obtained fault pattern and stress maps can be used for reference in mapping seismic risk associated with ongoing faulting in an active and changeable stress field.

Fault, stress field, Late Cenozoic, Barguzin rift, Baikal region

ВВЕДЕНИЕ

Изучение разломно-блокового строения и напряженного состояния земной коры природных регионов является одной из важнейших задач в геотектонике, так как именно разломы и движения по ним определяют рельеф, скорость и характер осадконакопления, особенности проявления сейсмичности, вулканизм и многие другие геолого-геофизические процессы. В свою очередь напряженное состояние есть тот главный фактор, который задает механизм тектонических перемещений и в целом режим геодинамического развития той или иной территории. В настоящей статье представляются результаты картирования разломно-блокового строения и реконструкций полей напряжений Баргузинского рифта и прилегающих к нему территорий (рис. 1). Особенность этого участка земной коры заключается в том, что значительную его площадь перекрывают слабосцементированные отложения преимущественно четвертичного возраста. Поэтому прослеживание разломных зон во внутренние части впадин с помощью структурно-геологических методов было затруднено. Использование последних разработок — метода спецкартирования [Семинский, 1994] в комплексе с оригинальными методическими приемами, направленными на изучение особенностей тектонических деформаций в слабосцементированных и рыхлых отложениях [Гладков, Лунина, 2004; Семинский и др., 2005], позволяет решать подобную задачу [Лунина, Гладков, 2004а,б]. В

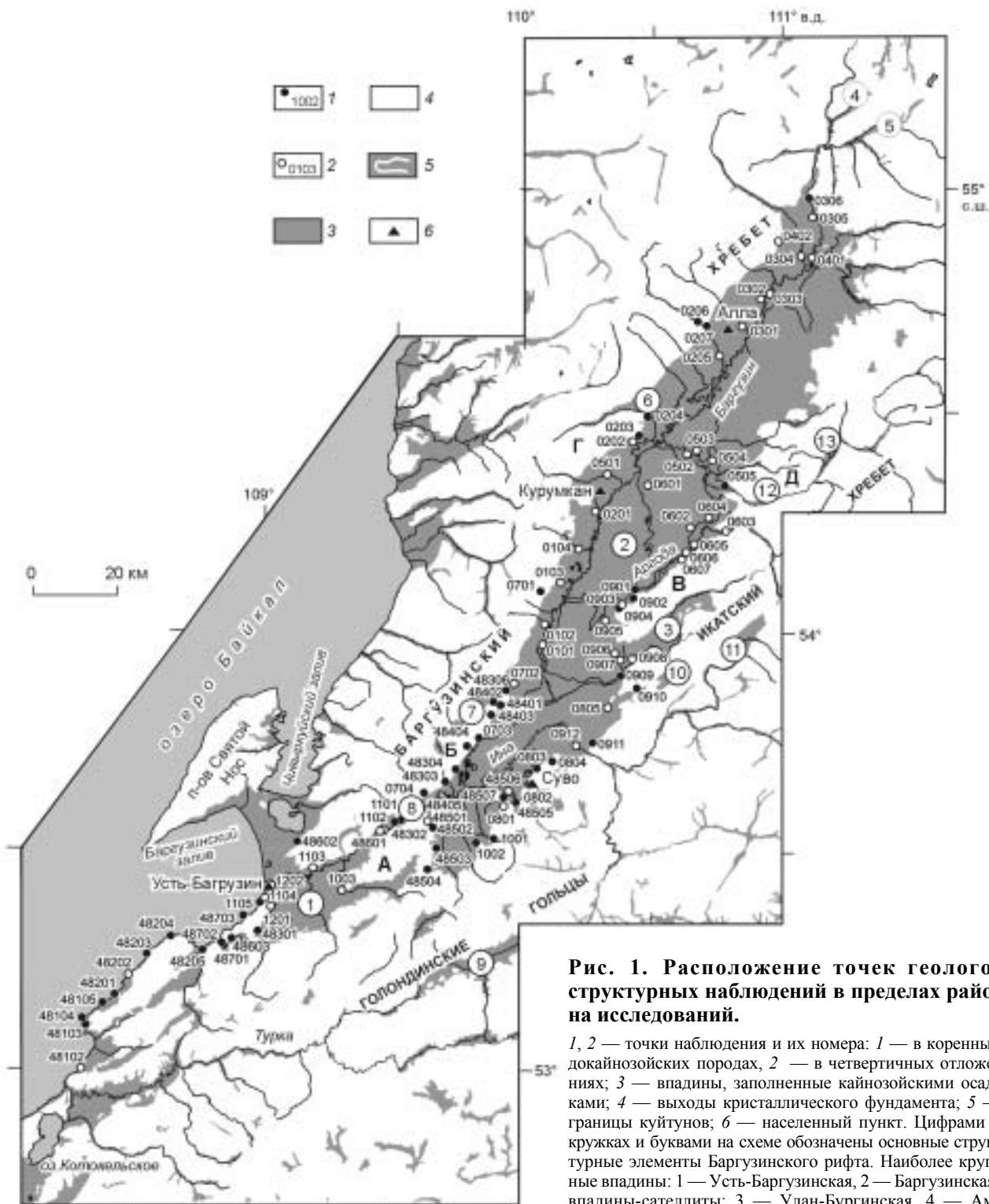


Рис. 1. Расположение точек геологоструктурных наблюдений в пределах района исследований.

1, 2 — точки наблюдения и их номера: 1 — в коренных докайнозойских породах, 2 — в четвертичных отложениях; 3 — впадины, заполненные кайнозойскими осадками; 4 — выходы кристаллического фундамента; 5 — границы куйтунов; 6 — населенный пункт. Цифрами в кружках и буквами на схеме обозначены основные структурные элементы Баргузинского рифта. Наиболее крупные впадины: 1 — Усть-Баргузинская, 2 — Баргузинская; впадины-сателлиты: 3 — Улан-Бургинская, 4 — Амундинская, 5 — Ковылейская, 6 — Шаманская, 7 —

Улонская, 8 — Ваулинская; впадины Икатского хребта: 9 — Ямбуйская, 10 — Ясская, 11 — Богундинская, 12 — Подулукская, 13 — Мариктинская; крупные межвпадинные перемычки (отроги): А — Шаманская, Б — Улонская, В — Аргондинская, Г — Сахулинская, Д — Молебенская.

сочетании с дистанционными методами картирования изучение разрывных нарушений в породах разного возраста и состава дает возможность составлять карты разломно-блокового строения регионов на новом уровне и делать относительную временную привязку полей напряжений и движений по активным разломам.

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ О БАРГУЗИНСКОМ РИФТЕ

Баргузинский рифт простирается в северо-восточном направлении от берегов одноименного залива оз. Байкал до верхнего течения р. Баргузин (см. рис. 1). Подобно другим рифтам Байкальской рифтовой зоны для него характерна ярко выраженная асимметрия, которая наиболее отчетливо проявляется в особенностях сочленения впадин с обрамляющими горными сооружениями. На северо-западе ложе рифта сочленяется с высокими поднятиями Баргузинского хребта, а на юго-востоке оно плавно переходит в склоны Икатского хребта и Голондинских гольцов. Основными бассейнами являются Усть-Баргузинская и Баргузинская впадины, сопровождаемые более мелкими впадинами-сателлитами. Крупные бассейны отделены друг от друга невысокой горной перемычкой — Шаманским отрогом. Ось максимального прогиба Баргузинской впадины, согласно геофизическим данным, смещена в сторону Баргузинского горста [Сейсмогеология..., 1968; Неведрова, Эпов, 2003], а наибольшая мощность осадков достигает 2.5 км примерно в 10 км южнее с. Курумкан [Сейсмогеология..., 1981; Неведрова, Эпов, 2003]. Особое место в Баргузинской впадине принадлежит крупным песчаным массивам — куйтунам. Н.А. Флоренсов [1960] считал их останцами сильно эродированного и частично перенесенного водными потоками поля водно-ледниковых отложений, сохранившегося в настоящее время лишь на выступах фундамента. По данным геоэлектрических зондирований куйтуны действительно соответствуют немного приподнятым относительно главных прогибов фундамента блокам, внутри которых могут существовать локальные прогибы [Неведрова, Эпов, 2003].

Некоторые разломы Баргузинского рифта были подробно описаны в ряде работ, изданных в конце 1960-х—начале 1980-х годов [Сейсмогеология..., 1968; Замараев и др., 1979; Сейсмогеология..., 1981]. К ним относятся, прежде всего, система кулисообразно расположенных разрывных нарушений, которая представляет собой Баргузинский разлом, разграничивающий главные впадины и северо-западное плечо рифта, а также серия дизъюнктивов в Икатском хребте. Единого разлома или системы разрывов между основными бассейнами и юго-восточным плечом рифта прослежено не было, поэтому считается, что там преобладают изгибовые деформации фундамента [Сейсмогеология..., 1981]. Необходимо отметить, что в позднем плейстоцене—голоцене в пределах Баргузинского рифта неоднократно происходили сильные разрывообразующие землетрясения с $M = 7.6—8$ [Сейсмогеология..., 1968; Чипизубов и др., 2000]. В течение инструментального периода с 1961 г. там наблюдается весьма высокая плотность сейсмических толчков [Sherman et al., 2004], но магнитуды землетрясений, согласно данным в работах [Солоненко и др., 1993; Мельникова, Радзиминович, 1998] и каталогу землетрясений, представленному на сайте Байкальского филиала ГС СО РАН (<http://seismo.crust.irk.ru>), не превышают 5.5.

ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Для картирования разломов в пределах Баргузинского рифта была создана сеть точек геолого-структурных наблюдений на площади от р. Турка на юго-западе до места выхода р. Баргузин из гор на северо-востоке (см. рис. 1). Всего задокументированы 95 точек наблюдений (т.н.), из которых 47 — в четвертичных осадочных отложениях, 48 — в коренных породах докайнозойского возраста. Методы сбора и обработки материала аналогичны описанным в работе [Семинский и др., 2005]. Полевые исследования были сосредоточены в основном во впадинах и на их границах с хребтами, так как на остальной территории, в пределах горных поднятий, активные в кайнозойе разломы достаточно хорошо выявляются дистанционными методами, в частности, на основе линеаментного анализа топографических карт, космоснимков и трехмерных моделей рельефа. Кроме того, разломы в горных поднятиях были откартированы при государственной геологической съемке м-ба 1:200 000. Все перечисленные данные (полевые геолого-структурные, результаты линеаментного анализа топокарт, дешифрирования космоснимков и трехмерных моделей рельефа, геологическая карта м-ба 1:200 000) составили исходную базу для составления новой карты разломно-блокового строения описываемого района (рис. 2). По результатам анализа имеющихся материалов на ней нашли отражения только те разрывные нарушения, которые в дополнение к другим признакам их существования выражены в рельефе и(или) в тектонических деформациях позднекайнозойских отложений.

Ранее нами [Гладков, Лунина, 2004; Лунина, Гладков, 2004а; Семинский и др., 2005; Гладков и др., 2005] в той или иной степени показано, что тектонические деформации в рыхлых и слабосцементированных осадках могут проявляться в нескольких видах, а именно: участки сгущения трещин, схожих с зонами повышенной трещиноватости и даже расщепления и дробления; смещения маркеров различающихся по цвету и составу суглинков, супесей или другого подобного материала; расколы галек и валунов, в том числе со смещениями; штрихи на поверхностях галек и валунов; дайки, выполняющие трещины растяжения; сейсмогенные конволюции. При картировании разрывов в рыхлых и слабосцементированных отложениях каждый подобный случай внимательно рассматривался для того, чтобы определиться — являлись ли в действительности данные структуры или следы подвижек следствием

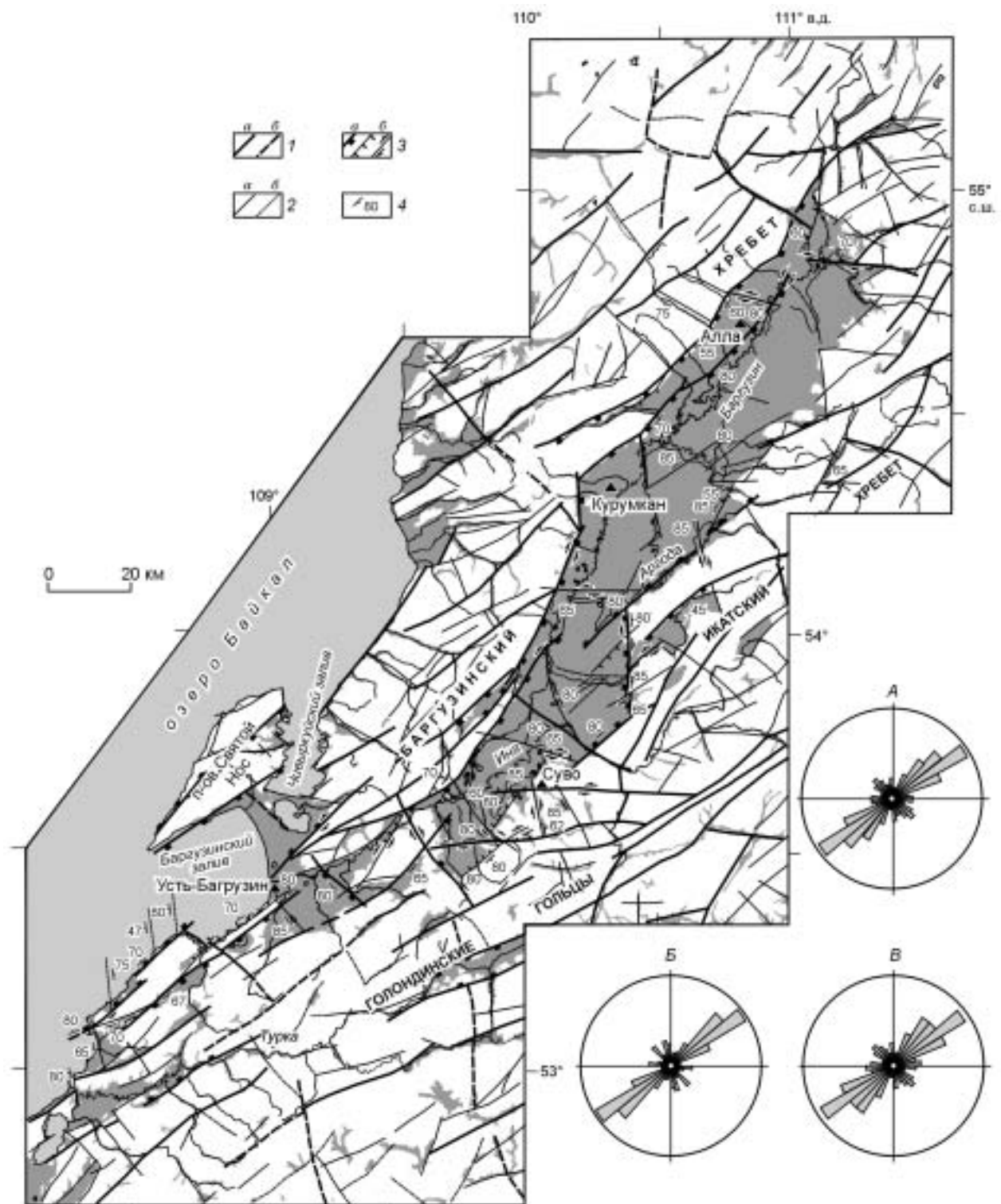


Рис. 2. Карта разломно-блокового строения Баргузинского рифта и прилегающей территории.

1, 2 — разломы достоверные (а), предполагаемые (б): 1 — региональные, 2 — локальные; 3 — сбросы (а), сдвиги (б); 4 — направление и угол падения разлома. Ост. усл. обозн. см. на рис. 1.

А—В — розы-диаграммы простирания разломов: А — для всей изученной площади (количество (n) — 318, шаг — 10, максимальный процент (макс.%) — 16), Б — для крупных впадин, включая ограничивающие их разломы и межвпадинные перемычки (n — 80, шаг — 10, макс.% — 20), В — за пределами впадины (n — 238, шаг — 10, макс.% — 15).

тектонических процессов, а не экзогенных и техногенных. В работах [Гладков, Лунина, 2004; Семинский и др., 2005; Гладков и др., 2005] приводится обоснование их тектонического генезиса.

Для реконструкции полей тектонических напряжений и последующего восстановления кинематики смещений по разломам применялись методы П.Н. Николаева [1992] и М.В. Гзовского [1975], опирающиеся на основы механики разрушения твердых тел, которые предполагают, что под действием относительно однородного напряженного состояния формируются две сопряженные системы разрывов. Метод П.Н. Николаева позволяет выделять их путем анализа диаграмм, которые строились по результатам массовых замеров трещин (по 50—100 штук) в каждой точке наблюдения. Метод М.В. Гзовского дает возможность по сопряженным сколам восстанавливать главные нормальные оси напряжений и в соответствии с ними определять вектор и тип подвижки по разрывам, который обязательно согласовывался с прямыми геолого-структурными наблюдениями за смещениями, если таковые имелись в точке наблюдения.

РАЗЛОМНО-БЛОКОВОЕ СТРОЕНИЕ

Анализ простираний откартированных разломов показывает, что в Баргузинском рифте доминируют дизъюнктивы северо-восточного направления (см. рис. 2, А). Их преобладающая ориентировка во впадинах (включая разломы на границах с хребтами) $40\text{—}60^\circ$ (см. рис. 2, Б), в обрамляющих горных поднятиях — $30\text{—}70^\circ$ (см. рис. 2, В), т. е. в общих чертах разрывная сеть в разных структурных элементах рифта очень схожа.

Разломы северо-восточного направления — это прежде всего главные структуры, ограничивающие борта крупных впадин и впадин-сателлитов и контролирующие их заложение и развитие. Некоторые из них прослеживаются в осадочном наполнении бассейнов. Наиболее крупные разрывные нарушения, откартированные нами с поверхности в рыхлых отложениях (см. рис. 2), выявляются в результате количественной интерпретации гравитационных аномалий (см. рис. 56 в работе [Сейсмогеология..., 1981]). К

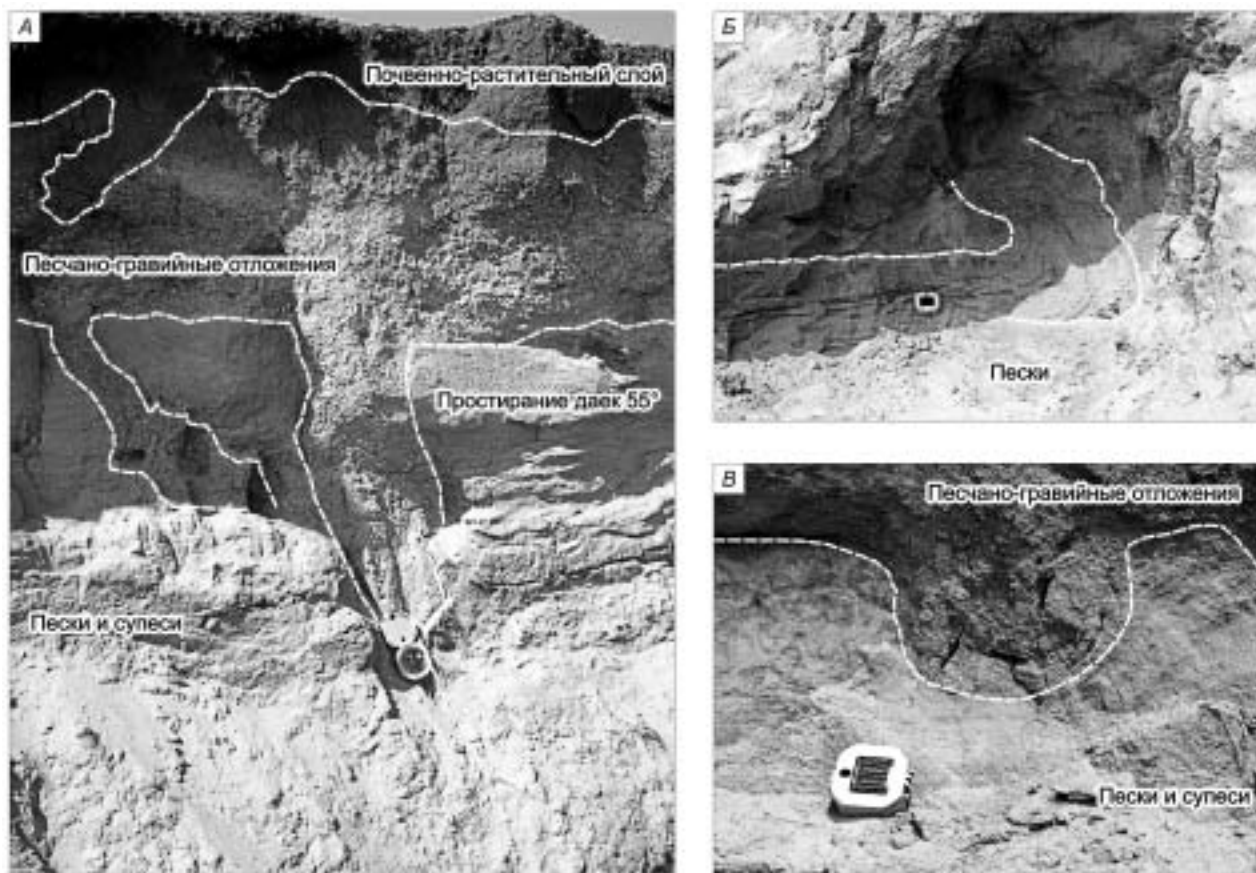


Рис. 3. Примеры разрывных и пластических деформаций четвертичных отложений в зонах разломов северо-восточного простирания.

А — неплунговая дайка в т.н. 0903 на границе Аргодинского отрога и Баргузинской впадины; Б — лежащая складка в т.н. 1202, расположенной в пос. Усть-Баргузин напротив станции технического обслуживания; В — сейсмиподобная структура в т.н. 1202.

ним относятся разломы, являющиеся, по существу, частью Баргузинской системы разломов в северо-западном борту одноименной впадины, а также те, которые представляют собой продолжение разлома между Аргодинским отрогом и Улан-Бургинской впадиной. С дизъюнктивами северо-восточного простирания связаны известные палеосейсмогенные структуры [Сейсмогеология..., 1981; Чипизубов и др., 2000]. Поскольку наши исследования были сосредоточены на изучении активных в кайнозое разломов, то мы отмечали все возможные признаки их активности. Одним из таких признаков являются трещины раскрытия с ровными краями, заполненные песчано-гравийным материалом, состав которого существенно отличается от вмещающих отложений (рис. 3, А). Подобные структуры в литературе известны как нептунические дайки, образованные зачастую сейсмическими сотрясениями (см. рис. 45 в работе [Николаев, 1992]). Другим типом деформационных структур, встречаемых в зонах разломов северо-восточного простирания, были складкообразные (см. рис. 3, Б) и сейсмитоподобные формы (см. рис. 3, В). Необходимо отметить, что осадочные разрезы, в которых документировались точки наблюдения, имели видимую мощность в первые метры от земной поверхности и были представлены в основном песками, суглинками, супесями, гравийными и реже галечными отложениями; в Баргузинском рифте они относятся к отложениям голоцена [Сейсмогеология..., 1981]. В соответствии с этим, описанные выше структуры, а также вся тектоническая трещиноватость, измеренная в слабосцементированных осадках, сформировались не ранее 10 тыс. лет назад.

Признаки современной активности одного из сегментов Баргузинского разлома, простирающегося на 20—25°, обнаружены у подножия Баргузинского хребта, примерно в 7 км южнее с. Саранхур. Здесь, в 200 м от т.н. 0701 на восток-юго-восток, зафиксированы разрывы с аз. пад. $290 \angle 65^\circ$ и $120 \angle 85^\circ$, рассекающие Бурятскую ступу, построенную предположительно в середине прошлого века (рис. 4, А). Две другие поперечные стенки постройки нарушены трещинами с аз. пад. $215 \angle 70^\circ$ и $180 \angle 80^\circ$ (см. рис. 4, Б), которые субпараллельны широтному разлому, откартированному вдоль нижнего течения р. Аргода (см. рис. 2). Возникновение разрывов от сейсмических сотрясений не вызывает сомнений. Если ступа была построена до 1961 г., то наиболее вероятно, что разрывы в ней могли образоваться при землетрясении 27.07.1961 г. с $M = 4.8$, эпицентр которого находился в точке с координатами 54.1° с.ш. и 110° в.д. [Солоненко и др., 1993] в 4—5 км от т.н. 0701.

По разломам северо-восточного простирания устанавливаются сбросы, что согласуется с известными данными о кинематике этих структур. На некоторых участках, чаще на дистальных окончаниях крупных разломов, отмечается незначительная правосторонняя сдвиговая составляющая. Наличие горизонтальной компоненты по некоторым разломам северо-восточного простирания отмечали и ранее по анализу трещиноватости [Замараев и др., 1979], однако доминирующим типом смещений по ним является все же сброс.

Субширотные разломы, как и разрывные нарушения других направлений, по сравнению с северо-восточными дизъюнктивами, проявлены значительно реже (см. рис. 2). Они наиболее развиты в Икатском хребте и часто прослеживаются далее в Баргузинскую впадину. Система из нескольких достоверно установленных и предполагаемых разломных сегментов проходит в горном обрамлении от Ковылейской впадины к берегу оз. Байкал. В центральной части рифта разломы субширотного простирания четко

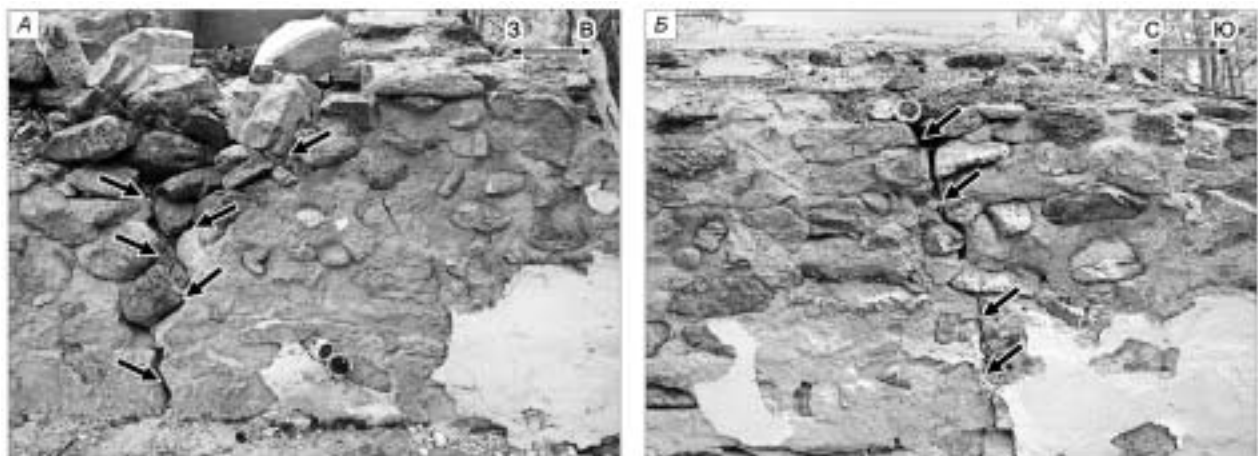


Рис. 4. Разрывы в стенках Бурятской ступы, расположенной в 200 м от т.н. 0701 на восток-юго-восток у подножия Баргузинского хребта:

А — с аз. пад. $290 \angle 65^\circ$ и $120 \angle 85^\circ$ в стенке, ориентированной запад—восток; Б — с аз. пад. $215 \angle 70^\circ$ и $180 \angle 80^\circ$ в стенке, ориентированной север—юг.



Рис. 5. Примеры разрывных и пластических деформаций четвертичных отложений в зонах разломов субширотного и северо-западного простираний.

А — сброс по трещине с аз. пад. $0 \angle 74^\circ$ в переслаивающихся песках и суглинках в т.н. 0303, расположенной в северной части Баргузинской впадины, амплитуда смещения около 5 см; *Б* — сброс по трещине с аз. пад. $250 \angle 43^\circ$ в разнородных осадках в т.н. 1003, расположенной в Усть-Баргузинской впадине вблизи Шаманского отрога, амплитуда смещения 1 м; *В* — сейсмическая структура в т.н. 1003.

прослеживаются с одного борта Баргузинской впадины на другой по зонам повышенной трещиноватости мощностью в первые метры в коренных породах. В рыхлых осадках они проявлены наиболее интенсивной системой трещин аналогичного направления. В них отмечались разрывы со смещениями как сдвигового, так и сбросового характера в первые сантиметры (рис. 5, *А*). Согласно результатам анализа трещиноватости, по разломам субширотной ориентировки однозначно реконструируются левые сдвиги, иногда со сбросовой компонентой. На этапе рифтогенеза они, очевидно, являются вспомогательными по отношению к северо-восточным и север-северо-восточным разломам, обеспечивающими возможность перемещения блоков по сбросам. Разрывы в Бурятской ступе (см. рис. 4) являются убедительным доказательством совместной активизации разрывов северо-восточного, север-северо-восточного и субширотного направлений.

Северо-западные разломы распространены в основном в Баргузинском хребте, южной части Баргузинской и Усть-Баргузинской впадин, а также вблизи побережья оз. Байкал. Для трех из них определен кинематический тип, причем знак смещений для всех разный. По первому разлому в Шаманском отроге, в месте его сближения с Баргузинским хребтом, в т.н. 48302 реконструируется правый сдвиг с незначительной взбросовой компонентой, а вблизи сочленения отрога с Икатским поднятием в т.н. 48504 — сброс. Севернее, по второму дизъюнктиву северо-западного простирания в т.н. 1001 смещения происходили по типу левого сдвига. По третьему разлому, расположенному в Усть-Баргузинской впадине, по анализу трещиноватости в т.н. 1003 и 1103 устанавливается сброс, подтверждаемый смещением песчано-гравийного слоя с амплитудой 1 м (см. рис. 5, *Б*). Его продолжением является выделенный по анализу рельефа разлом вдоль перешейка между Баргузинским и Чивыркуйским заливами. По разной мощности кайнозойских осадков в разных частях этого перешейка предполагается, что Баргузинский залив мог быть опущен по сбросу северо-западного простирания [Агафонов, 1970; Сейсмогеология..., 1981]. Наши геолого-структурные данные подтверждают это наблюдение. Кроме того, значительная амплитуда сброса в 1 м по разрыву (см. рис. 5, *Б*), интенсивные пластические деформации в разрезе (складки причудливой формы, растащенные в виде кусков суглинки и т. п.), насыщенная лимонитизация деформируемых слоев (см. рис. 5, *В*) свидетельствуют о сейсмогенной природе смещений по описываемой системе разломов.

Особое место принадлежит субмеридиональным разломам. Они немногочисленны, но большинство из них выстраиваются в широкую зону между примерно 110° и $110^\circ 30'$ в.д. (см. рис. 2). Последняя как бы

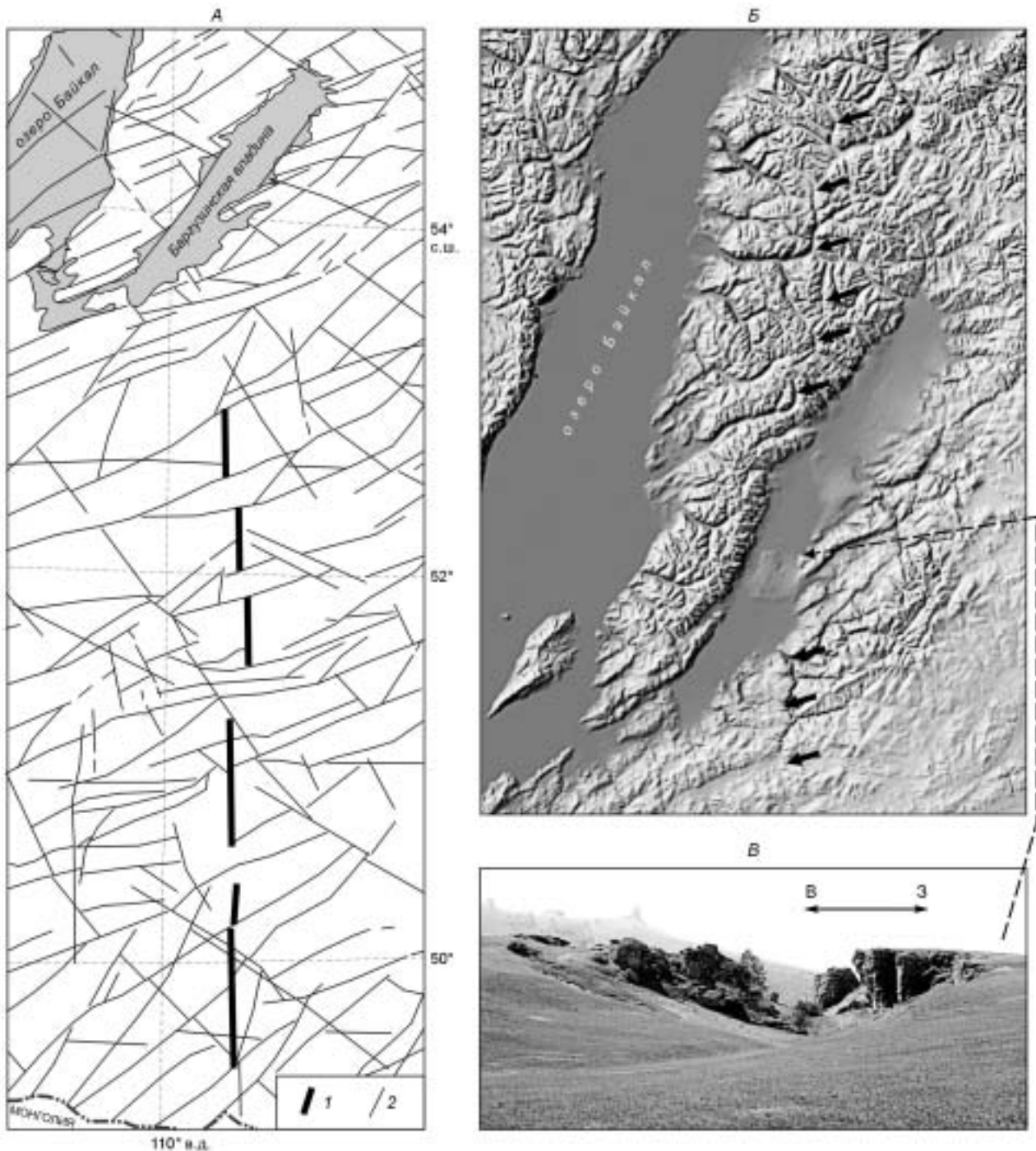


Рис. 6. Проявление крупного субмеридионального линеймента между 110° и $110^{\circ}30'$ в.д.

A — на упрощенном фрагменте карты разломов юга Восточной Сибири [Карта..., 1982]: *1* — крупный разлом по геофизическим данным, *2* — другие разломы; *B* — на трехмерной модели рельефа (доступна на www.geotarrp.org) в виде системы спрямленных речных долин и геоморфологических форм, показанных стрелками; *B* — в разломной зоне, к которой приурочена долина-расщелина шириной 15 м, простирающаяся на 180° , т.н. 0904.

продолжает крупный, разбитый на сегменты, предполагаемый разлом, выделенный по геофизическим данным и показанный на карте разломов юга Восточной Сибири (рис. 6, *A*) [Карта..., 1982]. Данный линеймент на упомянутой карте начинается у границы Монголии и заканчивается в 30 км южнее р. Турка, не достигая Баргузинской впадины. Очевидно, что он прослеживается и далее на север, а субмеридиональные разрывные нарушения, откартированные нами, являются частью этой крупной тектонической границы протяженностью более 400 км, которая при рифтогенезе была активизирована и еще больше

сегментирована. Наличие этой линейной неоднородности сыграло существенную роль в структурном оформлении Баргузинской впадины. В центральной части наблюдается заметный изгиб ее оси с северо-восточного направления на меридиональное. Этим же ориентировкам подчиняются и разрывные нарушения, ограничивающие борта впадины (см. рис. 2). На трехмерной модели рельефа (см. рис. 6, Б) хорошо видно, что субмеридиональный линеамент выходит за пределы собственно Баргузинского рифта и прослеживается по меридиану почти до северной границы оз. Байкал.

При сопоставлении данных глубинных геоэлектрических исследований, в частности карты изолиний мощности осадочной толщи, представленной на рис. 4 в работе [Неведрова, Эпов, 2003], с картой разломно-блокового строения (см. рис. 2) было обнаружено, что субмеридиональные разрывные нарушения в центральной части Баргузинской впадины маркируют границу между основным прогибом фундамента и относительно приподнятым Верхним куйтуном. Таким образом, определенно доказывается, что протяженная субмеридиональная разломная зона между 110° и 110°30' в.д., отчетливо выраженная в рельефе и тектонических деформациях древних и позднекайнозойских пород, существует в консолидированной коре и имеет глубинное заложение. Имеющиеся данные геоэлектрических исследований (см. рис. 5 и 6 в работе [Санчаа и др., 2004]) подтверждают существование еще одного предполагаемого нами разлома в северной части Баргузинской впадины. На своем южном окончании ближе к Икатскому хребту он имеет субмеридиональное направление, а на северном изменяет его к северо-западу (см. рис. 2). В геоэлектрическом разрезе (см. рис. 6 в работе [Санчаа и др., 2004]) этот дизъюнктив прослеживается на глубине 1200 м и ниже в породах фундамента по аномальному понижению удельного электрического сопротивления в близвертикальной зоне.

Согласно нашим геолого-структурным данным, по субмеридиональным разломам происходили правосторонние сбрососдвиговые и сдвигосбросовые смещения, что подтверждает сделанные ранее выводы о кинематике одного из звеньев Баргузинского разлома аналогичного простирания в устьевой части долины р. Тун [Замараев и др., 1979].

Охарактеризованные разломы разных направлений вычлениют блоки преимущественно четырехугольной формы, типичные для зон сжатия и растяжения, и реже треугольной формы, характерные для зон сдвига (см. рис. 2) [Шерман и др., 1999]. Карта плотности разрывных нарушений (рис. 7), построенная с помощью круглой скользящей ячейки с величиной окна, равной 1 % от изучаемой площади, наглядно показывает участки с наибольшей и наименьшей раздробленностью земной коры, которые соответствуют, как правило, встречаемости относительно мелких и крупных блоков. Кроме того, области с высокими значениями плотности дизъюнктивов, помимо разломных систем рифтового северо-восточного направления, отчетливо подчеркивают зону субмеридиональных разрывных нарушений, проходящую через центральную часть Баргузинского рифта.

ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ

В результате реконструкций полей напряжений методами П.Н. Николаева [1992] и М.В. Гзовского [1975] было получено 110 надежных решений в 92 точках наблюдения (рис. 8). По типам напряженного состояния, которые определяются из известных соотношений углов наклона главных осей напряжений по отношению к горизонту [Шерман, Днепровский, 1989], решения распределяются следующим обра-

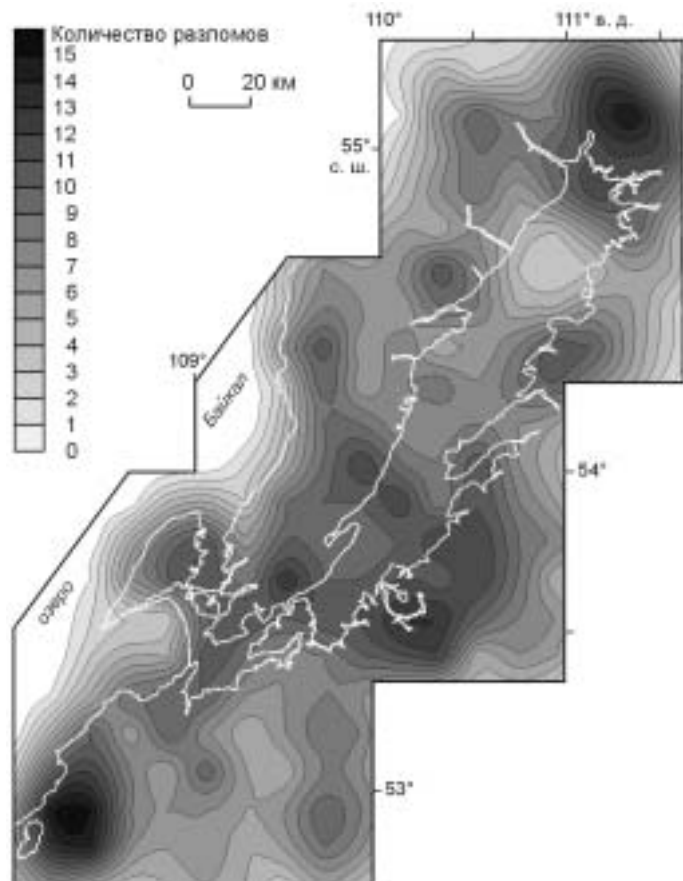


Рис. 7. Карта плотности разрывных нарушений Баргузинского рифта и прилегающей территории.

Построена с помощью круглой скользящей ячейки с величиной окна, равной 1 % от изучаемой площади. Белым контуром показаны границы крупных озер и впадин, заполненных кайнозойскими осадками.

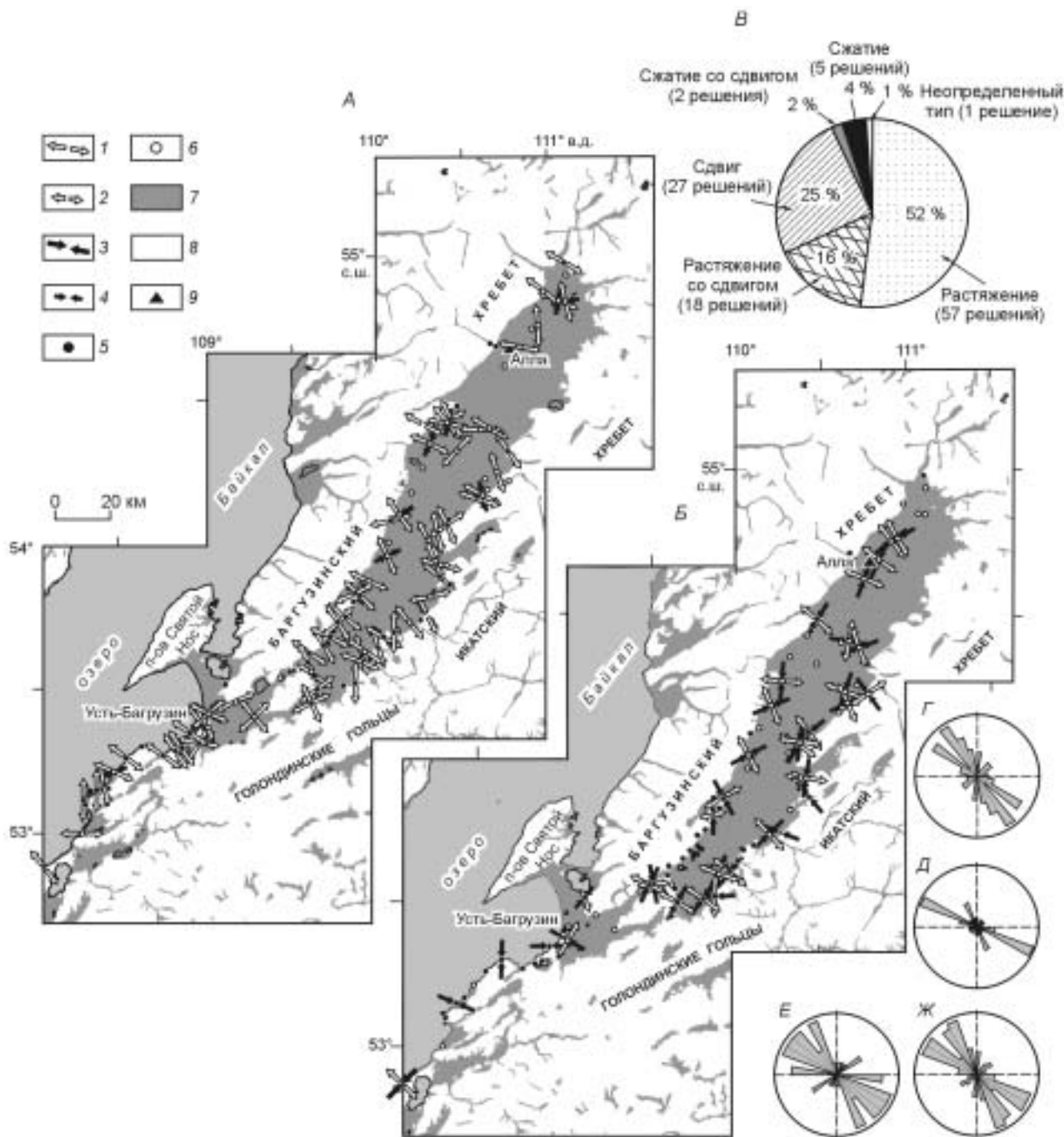


Рис. 8. Поля напряжений земной коры Баргузинского рифта и прилегающей территории по геолого-структурным данным:

1–4 — оси с углами наклона 0–30° и 31–60°: 1, 2 — растяжения, 3, 4 — сжатия; 5, 6 — точки наблюдения: 5 — в коренных докайнозойских породах, 6 — в четвертичных отложениях; 7 — впадины, заполненные кайнозойскими осадками; 8 — выходы кристаллического фундамента; 9 — населенный пункт. Схема с решениями о поле напряжений, соответствующими: А — растяжению и растяжению со сдвигом, Б — сдвигу, сжатию со сдвигом, сжатию и неопределенному типу; В — круговая диаграмма, показывающая в процентах вклад поля напряжений определенного типа в общую сумму полученных решений; Г–Ж — розы-диаграммы простирания осей растяжения в решениях, отвечающих: Г — растяжению ($n = 57$, шаг — 10, макс.% — 17), Д — растяжению со сдвигом ($n = 18$, шаг — 10, макс.% — 38), Е — сдвигу ($n = 27$, шаг — 10, макс.% — 14), Ж — всем трем перечисленным типам поля напряжений ($n = 102$, шаг — 10, макс.% — 13).

зом: растяжение — 57 (52 %); растяжение со сдвигом — 18 (16 %); сдвиг — 27 (25 %); сжатие со сдвигом — 2 (2 %); сжатие — 5 (4 %) и 1 (1 %) неопределенное решение, в котором оси сжатия и растяжения склоняются под углами 39 и 34° соответственно (см. рис. 8, В). Очевидно, что на фоне явного преобладания растяжения (см. рис. 8, А) сдвиговые напряжения широко проявлялись в Баргузинском рифте (см. рис. 8, Б). Пространственно и те, и другие распределены относительно равномерно, за исключением того, что вблизи оз. Байкал и в Усть-Баргузинской впадине решения сдвигового типа единичны. Создается впечатление, что они наиболее проявлены в северной части Шаманского отрога и вблизи него в Икатском хребте, а также в районе Аргодинского отрога, где осевая линия Баргузинской впадины изменяет свое направление с северо-восточного на меридиональное (см. рис. 8, Б).

Ориентировка осей растягивающих напряжений в решениях, отвечающих растяжению, преимущественно находится в пределах 300—310 и 320—340° (см. рис. 8, Г); в решениях, отвечающих растяжению со сдвигом, — 290—300 и 330—340° (см. рис. 8, Д); в решениях, отвечающих сдвигу, — 270—280, 290—320 и 330—340° (см. рис. 8, Е). За исключением некоторого разброса, характерного для полей напряжений локального уровня, особенно сдвигового типа, ориентировка осей растяжения в целом достаточно стабильна (см. рис. 8, Ж). Их заметный разворот с северо-запада к север-северо-западу происходит в центральной части Баргузинской впадины (см. рис. 8, А). В то же время во многих решениях сдвигового типа на этом участке оси растяжения разворачиваются с северо-западного к субширотному направлению (см. рис. 8, Б).

В некоторых местах в Баргузинском рифте фиксируется радиальное растяжение, на что указывают характерные структурные рисунки пирамид скалывания на диаграммах массовых замеров трещиноватости [Расцветаев, 1992], дающие два решения о поле напряжений с примерно перпендикулярными друг другу субгоризонтальными осями растяжения и субвертикальными осями сжатия. Три подобных решения из семи отмечены в Усть-Баргузинской впадине (см. рис. 8, А), в том числе в т.н. 1003, где был обнаружен сброс по разлому северо-западного простирания (см. рис. 5, Б).

Поля напряжений, соответствующие сжатию и сжатию в сочетании со сдвигом, немногочисленны (см. рис. 8, Б). Все они реконструированы по трещиноватости, измеренной в горных породах докайнозойского возраста. Точки наблюдения, в которых отмечены проявления чистого сжатия, расположены вдоль побережья оз. Байкал и в подножии Икатского хребта. В трех из них оси сжатия ориентированы на северо-запад, в двух остальных — меридионально и широтно. Сжатие в сочетании со сдвигом зафиксировано в небольшом отроге Баргузинского хребта, в районе Шаманской перемычки, и в пределах Улюнского отрога. В обоих решениях этого типа оси сжатия простираются в меридиональном направлении.

Для установления причин возникновения полей напряжений разных типов и их роли в формировании структуры Баргузинского рифта необходимо рассмотреть вопрос об их возрастной привязке. Не вызывает сомнений, что поля напряжений, отвечающие растяжению и, вероятно, растяжению со сдвигом (см. рис. 8, А), характерны для позднего кайнозоя и настоящего времени, что прослеживается в известных механизмах очагов землетрясений (рис. 9). Наличие полей напряжений сдвигового типа, отраженных в разрывных деформациях горных пород, связывают с существованием сдвигового режима на ранней стадии развития Байкальской рифтовой зоны [San'kov et al., 1997]. Наши данные свидетельствуют, что их довольно широкое проявление в Баргузинском рифте характерно и для позднего кайнозоя, поскольку 17 из 27 сдвиговых решений о поле напряжений реконструированы по трещинам, измеренным в четвертичных отложениях. При этом, как показал анализ направлений сопряженных систем разрывов, по которым они были восстановлены, поля напряжений сдвигового типа чаще всего не связаны с региональными разломами северо-восточного простирания. Единственный чисто сдвиговый механизм землетрясения 25 мая 2003 г., зарегистрированного в Баргузинском хребте в районе северного окончания Баргузинской впадины (см. рис. 9), подтверждает это заключение, показывая северо-западное и субмеридиональное направления возможных плоскостей смещений в очаге [Мельникова, Радзиминович, 2004]. Малое количество чисто сдвиговых механизмов очагов землетрясений (практически их отсутствие) в Баргузинском рифте может указывать либо на ослабление сдвиговых деформаций на современном этапе развития этой части Байкальской рифтовой зоны, либо на неспособность геолого-геофизической среды в этом районе накапливать большие напряжения, которые могли бы реализоваться по типу сдвига в виде ощутимого землетрясения. Однако в последнем случае такие напряжения могут разряжаться путем малоамплитудных сдвиговых смещений, не превышающих первые сантиметры, что можно наблюдать только в трещиноватости.

Что касается полей напряжений типа сжатия и сжатия со сдвигом, то их возрастная привязка сейчас затруднительна, так как все подобные решения были получены по трещинам, измеренным в породах докайнозойского возраста. Они могут ассоциироваться как с древним дорифтовым этапом развития территории, так и отражать локальные возмущения действующего в позднем кайнозое регионального поля напряжений. В пользу последнего могут свидетельствовать механизмы очагов современных землетря-

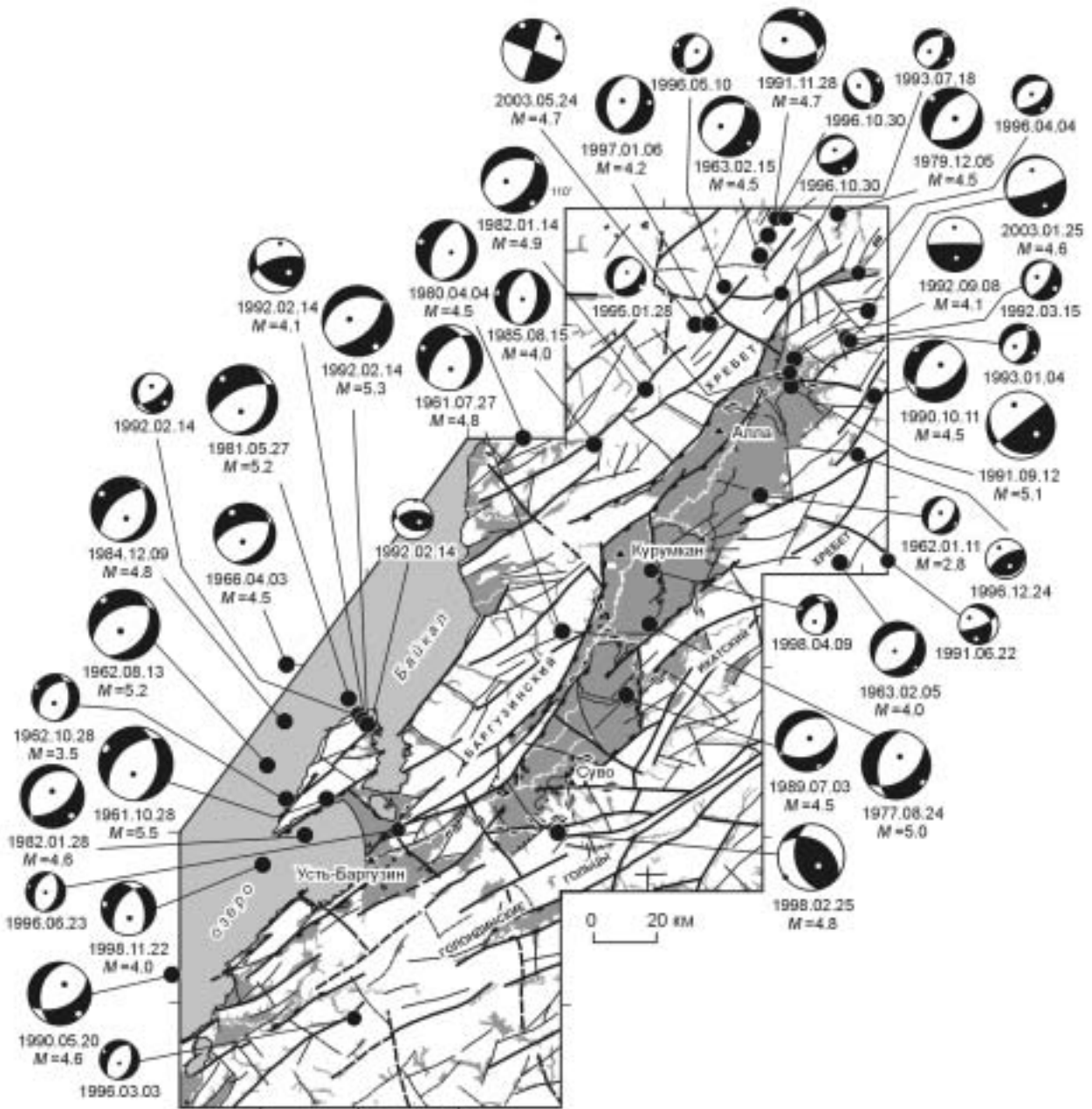


Рис. 9. Известные определения механизмов очагов землетрясений Баргузинского рифта и прилегающей территории.

Схема составлена по материалам, представленным в работах [Солоненко и др., 1993; Мельникова, Радзиминович, 1998, 2003, 2004а,б], и охватывает период наблюдений с 1961 по 1998 г., а также 2003 г. Показаны эпицентры только тех событий, для которых приводятся механизмы очагов, построенные по опубликованным данным с помощью программного пакета RAKE в проекции нижней полусферы. Закрашены квадранты сжатия. Под механизмом очага указаны дата и магнитуда события (если имеется). Ост. усл. обозн. см. на рис. 1, 2.

сений: в пределах исследуемой территории три из них отвечают взбросу и одно — сдвиговзбросу (см. рис. 9).

Встречаемость полей напряжений разных типов в Баргузинском рифте свидетельствует о мозаичном строении поля напряжений. Это обусловлено его непрерывной перестройкой в процессе активизации разломно-блоковой структуры, на которую влияют подвижки даже по единичному разлому. Совместное проявление разнотипных полей напряжений или их относительно быстрое чередование в сравнительно короткий период, от первых часов во время одной последовательности землетрясений до нескольких

тысяч лет в течение геологического периода, показано для многих регионов земного шара [Plenefisch, Bonier, 1997; Muller et al., 1997; Семинский, 2001; Лунина, Гладков, 2004а; Caputo, 2005; и др.].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в настоящей работе результаты позволили на основании новых структурно-геологических материалов с привлечением опубликованных данных геофизики и сейсмологии охарактеризовать разломно-блоковое строение и поля напряжений земной коры Баргузинского рифта на позднекайнозойском этапе развития этой территории и сделать следующие основные выводы.

1. Главную роль в разломной сети играют дизъюнктивы северо-восточного байкальского направления, которые существенно доминируют как во впадинах, так и в горном обрамлении рифта. Заметное влияние на его структурное оформление оказал крупный разлом субмеридионального простирания протяженностью более 400 км, начинающийся у границ Монголии. На карте юга Восточной Сибири [Карта..., 1982] он заканчивается за 80—90 км до Баргузинской впадины. Согласно полученным результатам, этот разлом продолжается и далее, проявляясь как в кристаллическом фундаменте, так и в осадочном наполнении бассейна в виде зоны разобщенных разломных сегментов. Некоторые из них наряду с северо-восточными разломами отделяют Баргузинскую впадину от обрамляющих хребтов. В рельефе субмеридиональный тектонический линеамент прослеживается почти до северной границы оз. Байкал, совпадая с осевой частью трансконтинентальной зоны Вебис, оживленные дискуссии по которой проходили в конце 70-х годов прошлого столетия [Трансазиатская..., 1978]. Немаловажную роль играют субширотные и северо-западные разломы, разделяющие сбросовые пластины на более мелкие блоки, тем самым облегчая их перемещение. Таким образом, разломно-блоковое строение Баргузинского рифта в позднем кайнозое закономерно и предопределено ранее существовавшими тектоническими структурами.

2. Господствующим типом напряженного состояния в Баргузинском рифте является растяжение. Вместе с тем в позднем кайнозое широкое развитие получили сдвиговые поля напряжений, возникающие, вероятно, как производные от регионального растяжения и реализующиеся путем смещений по разрывным нарушениям, поперечным к сбросам, или в комбинации со сбросами. Векторы растягивающих напряжений в Баргузинском рифте ориентированы преимущественно на северо-запад—юго-восток, т. е. практически ортогонально к рифтовой оси. Их заметное отклонение от указанного направления происходит на участке, где осевая линия Баргузинской впадины меняет свое простирание с северо-восточного на меридиональное. Там же отмечается наибольшее количество сдвиговых решений о поле напряжений. Очевидно, что наличие крупной разломной зоны, проявленной в виде системы субмеридиональных разрывных нарушений между 110° и $110^\circ 30'$ в.д., вызывает локальные вариации ориентировок и углов наклона главных нормальных осей напряжений в Баргузинском рифте.

3. Изучение разрывных нарушений в Баргузинском рифте и их сопоставление с доступными в литературе гравиметрическими [Сейсмогеология..., 1981] и геоэлектрическими [Неведрова, Эпов, 2003; Санчаа и др., 2004] данными еще раз показало эффективность картирования разломов в разновозрастных породах, представленных как скальными, так и рыхлыми грунтами.

Нам представляется, что карты разломно-блокового строения и полей напряжений земной коры, составленные для позднекайнозойского этапа развития на базе м-ба 1:200 000, могли бы быть полезными в качестве первоначальной основы для оценки сейсмической опасности территорий, связанной с активизацией разломов и блоков, в постоянно действующем и изменяющемся поле напряжений. Это обусловлено тем, что землетрясения изначально происходят в неоднородной геологической среде, обладающей различными структурными свойствами (механическими, химическими, физическими), без учета которых невозможно решать проблемы деформирования твердой Земли и сопровождающего это деформирование сейсмического процесса [Садовский, Писаренко, 1991]. Далее на имеющейся основе в виде указанных карт необходимо проводить интегрированный анализ дополнительных геолого-структурных, палеосейсмогеологических, инструментальных сейсмологических и, возможно, других данных для того, чтобы получить возможность описать модели возможного поведения разломно-блоковой среды и изменения ее напряженного состояния в ответ на крупное сейсмическое событие, вызванное движениями по сейсмоактивному разлому. Подобная модель должна предполагать, как минимум, оценку постсейсмических движений по другим близлежащим разрывным нарушениям, кинематику их смещений, интенсивность сотрясений в окружающем пространстве, которая зависит от пространственного положения разломов по отношению к очагу землетрясения, фокальный механизм основного толчка и локальные изменения напряженного состояния. Авторы данной работы видят в этом одно из перспективных направлений своих исследований.

Искреннюю благодарность авторы выражают рецензентам рукописи Е.А. Рогожину и Н.Н. Неведровой.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-1645.2005.5, комплексного интеграционного проекта СО РАН 2006 № 6.13, проектов INTAS 05-109-4383 и РФФИ (грант 04-05-64148).

ЛИТЕРАТУРА

- Агафонов Б.П.** Условия сноса продуктов выветривания с полуострова Святой Нос // Донные отложения Байкала. М., Наука, 1970, с. 29—42.
- Гзовский М.В.** Основы тектонофизики. М., Недра, 1975, 536 с.
- Гладков А.С., Лунина О.В.** Трещины в позднекайнозойских отложениях: новые возможности для структурного анализа // Докл. РАН, 2004, т. 398, № 6, с. 782—785.
- Гладков А.С., Лунина О.В., Дзюба И.А., Орлова Л.А.** Новые данные о возрасте разрывных деформаций в Тункинской рифтовой впадине // Докл. РАН, 2005, т. 405, № 2, с. 229—232.
- Замараев С.М., Васильев Е.П., Мазукабзов А.М., Ружич В.В., Рязанов Г.В.** Соотношение древней и кайнозойской структур в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск, Наука, 1979, 124 с.
- Карта** разломов юга Восточной Сибири, м-б 1:1 500 000 / Ред. П.М. Хренов, Л., ВСЕГЕИ, 1982, 4 л.
- Лунина О.В., Гладков А.С.** Разломная структура и поля напряжений западной части Тункинского рифта (юго-западный фланг Байкальской рифтовой зоны) // Геология и геофизика, 2004а, т. 45 (10), с. 1235—1247.
- Лунина О.В., Гладков А.С.** Разломная структура Тункинского рифта — отражение процесса косога растяжения // Докл. РАН, 2004б, т. 398, № 4, с. 516—518.
- 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.** Очаговые параметры землетрясений Байкальского региона в 2003 г. // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Иркутск, ИЗК СО РАН, ИрГТУ, 2004а, с. 197—201.
- Мельникова В.И., Радзиминович Н.А.** Прибайкалье и Забайкалье: Каталог механизмов очагов землетрясений (CD-ROM) // Землетрясения Северной Евразии в 1998 г. Обнинск, ГС РАН, 2004б, с. 481.
- Неведрова Н.Н., Эпов М.И.** Глубинные геоэлектрические исследования в сейсмоактивных районах // Материалы 2-го международного симпозиума „Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов“. М.; Бишкек, 2003, с. 153—163.
- Николаев П.Н.** Методика тектонодинамического анализа / Ред. Н.И. Николаева. М., Недра, 1992, 295 с.
- Расцветаев Л.М.** Структурные рисунки трещиноватости и их геомеханическая интерпретация // Докл. АН СССР, 1982, т. 267, № 4, с. 904—909.
- Садовский М.А., Писаренко В.Ф.** Сейсмический процесс в блоковой среде. М., Наука, 1991, 96 с.
- Санчаа А.М., Неведрова Н.Н., Яковлев А.В.** Особенности геоэлектрического строения Баргузинской и Тункинской впадин Байкальской рифтовой зоны // Сборник докладов международной научной конференции „Сейсмические исследования земной коры“. Новосибирск, Ин-т геофизики СО РАН, 2004, с. 465—470.
- Сейсмогеология** и детальное сейсмическое районирование Прибайкалья / Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск, Наука, 1981, 168 с.
- Сейсмотектоника** и сейсмичность рифтовой системы Прибайкалья / Ред. В.П. Солоненко. М., Наука, 1968, 220 с.
- Семинацкий К.Ж.** Принципы и этапы спецкартирования разломно-блоковой структуры на основе изучения трещиноватости // Геология и геофизика, 1994, т. 35 (9), с. 112—130.
- Семинацкий К.Ж.** Тектонофизические закономерности деструкции литосферы на примере Гималайской зоны сжатия // Тихоокеанская геология, 2001, т. 20, № 6, с. 17—30.
- Семинацкий К.Ж., Гладков А.С., Лунина О.В., Тугарина М.А.** Внутренняя структура континентальных разломных зон. Прикладной аспект. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал „Гео“, 2005, 293 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.
- Трансазиатская** континентальная зона Вебурс / Ред. С.И. Шерман. Иркутск, Вост.-Сиб. филиал СО АН СССР, 1978, 52 с.
- Флоренсов Н.А.** Мезозойские и кайнозойские впадины Прибайкалья. М.; Л., Изд-во АН СССР, 1960, 258 с.
- Чипизубов А.В., Семенов Р.М., Аржанников С.Г., Смекалин О.П.** Новые данные о палеосейсмодислокациях в зоне Баргузинского разлома // Докл. РАН, 2000, т. 372, № 3, с. 393—396.

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

Шерман С.И., Семинский К.Ж., Черемных А.В. Деструктивные зоны и разломно-блоковые структуры Центральной Азии // Тихоокеанская геология, 1999, т. 18, № 2, с. 41—53.

Caputo R. Stress variability and brittle tectonic structures // Earth Sci. Rev., 2005, v. 70, p. 103—127.

Muller B., Wehrle V., Zeyen H., Fuchs K. Short-scale variations of tectonic regimes in the western European stress province north of the Alps and Pyrenees // Tectonophysics, 1997, v. 275, p. 199—219.

Plenefisch T., Bonier K.-P. The stress field in the Rhine Graben area inferred from earthquake focal mechanisms and estimation of frictional parameters // Tectonophysics, 1997, v. 275, p. 71—97.

San'kov V., Miroshnichenko A., Levi K., Likhnev A., Melnikov A., Delvaux D. Cenozoic stress field evolution in the Baikal rift zone // Bull. Centre Rech. Elf. Explor. Prod., 1997, v. 21, № 2, p. 435—455.

Sherman S.I., Dem'yanovich V.M., Lysak S.V. Active faults, seismicity and fracturing in the lithosphere of the Baikal rift system // Tectonophysics, 2004, v. 380, № 3—4, p. 261—272.

*Поступила в редакцию 13 декабря 2005 г.,
после доработки — 16 июня 2006 г.*