

*ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ*

**ПОЗДНЕЧЕТВЕРТИЧНЫЙ И СОВРЕМЕННЫЙ РЕЖИМЫ ДЕФОРМИРОВАНИЯ  
ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ТУНКИНСКОЙ СИСТЕМЫ ВПАДИН ПО СТРУКТУРНО-  
ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИМ И СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ ДАННЫМ**

**А.В. Аржанникова, В.И. Мельникова, Н.А. Радзиминович**

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

В результате комплексного сейсмологического и структурно-геоморфологического анализа западной части Тункинской системы впадин установлено, что современная сейсмичность отражает общую тенденцию развития структур в позднечетвертичное время. Определено, что преобладающим деформационным режимом земной коры на позднечетвертичном этапе развития является сдвиг со сжатием. Деформации сжатия приурочены к границам блоков и к северному горному обрамлению, а деформации растяжения характерны для внутренних частей впадин, остающихся в „тектонической тени“ при левосдвиговом перемещении по субширотным разломам. По сейсмологическим данным системы главных напряжений в очагах землетрясений, локализующихся во впадинах, чаще всего представлены сочетаниями близгоризонтального СЗ растяжения с наклонным или близвертикальным сжатием, в то время как на границах блоков и в хребтах доминируют близвертикальное растяжение и близгоризонтальное СВ сжатие. В целом определяющую роль в напряженно-деформированном состоянии земной коры исследуемого района играют сдвиги, при этом деформации укорочения преобладают над деформациями удлинения.

*Структурная геоморфология, механизмы очагов землетрясений, деформационный режим, юго-западный фланг Байкальской рифтовой зоны.*

**LATE QUATERNARY AND CURRENT DEFORMATION IN THE WESTERN TUNKA SYSTEM  
OF BASINS: EVIDENCE FROM STRUCTURAL GEOMORPHOLOGY AND SEISMOLOGY**

**A.V. Arzhannikova, V.I. Mel'nikova, and N.A. Radziminovich**

Integrated seismological and structural geomorphological studies of the western Tunka system of basins in the southwestern Baikal rift show that the historic seismicity reflects the general Late Quaternary evolution trend of structures. Crustal deformation occurs mainly as transpression. Compression follows block boundaries and the northern mountainous borders of basins, whereas extension acts upon basin's inner parts, which remain in "tectonic shadow" during left-lateral strike-slip motions on W-E faults. Principal stresses inferred from earthquake mechanisms are most often a combination of horizontal NW extension and oblique or vertical compression in the basins and vertical extension with horizontal NE compression in the bordering ridges and along block boundaries. The general deformation style in the region is dominated by strike-slip faulting, and compression (shortening) dominates over extension.

*Structural geomorphology, earthquake mechanisms, deformation style, southwestern flank of Baikal rift system*

**ВВЕДЕНИЕ**

В последнее время при изучении Байкальского рифта большой интерес вызывает вопрос о его позднечетвертичной геодинамике. В частности, одной из проблем является определение режима деформирования земной коры. При этом, если для центральной части Байкальского рифта, где, по сейсмологическим и геолого-структурным данным, преобладает поперечное к простиранию основных рифтовых структур близгоризонтальное растяжение [Солоненко и др., 1993; Леви и др., 1996], деформационный режим определяется однозначно, то для юго-западного фланга, в частности Тункинской системы впадин, он является предметом дискуссий. В настоящий момент существуют несколько точек зрения на проблему, основными из них являются предположения о преобладании режима сдвига со сжатием [Парфеев, Саньков, 2004] и режима косоугольного растяжения [Лунина, Гладков, 2004а]. Чтобы ответить на вопрос, какой режим деформирования является преобладающим в позднечетвертичное время (включая современную

стадию), нами была проанализирована вся имеющаяся информация о механизмах очагов землетрясений, в том числе и слабых, в сопоставлении со структурно-геоморфологическими данными. Основное внимание было уделено западной части Тункинской системы впадин как наиболее выраженной в современной сейсмичности.

#### КРАТКАЯ ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТУНКИНСКОЙ СИСТЕМЫ ВПАДИН

Тункинская система впадин (рис. 1, А) представлена цепочкой чередующихся депрессий и межвпадинных перемычек (с запада на восток): Мондинская впадина, Хара-Дабанская перемычка, Хойтогольская, Туранская впадины, Ниловский отрог, Тункинская впадина, Еловский отрог, Торская впадина, Быстринская перемычка и Быстринская впадина. С севера Тункинская система впадин обрамляется хр. Тункинские Гольцы, с юга — хр. Хамар-Дабан. Граница в обоих случаях проходит по зонам крупных региональных разломов: с севера — по Тункинскому, с юга — по Байкало-Мондинскому.

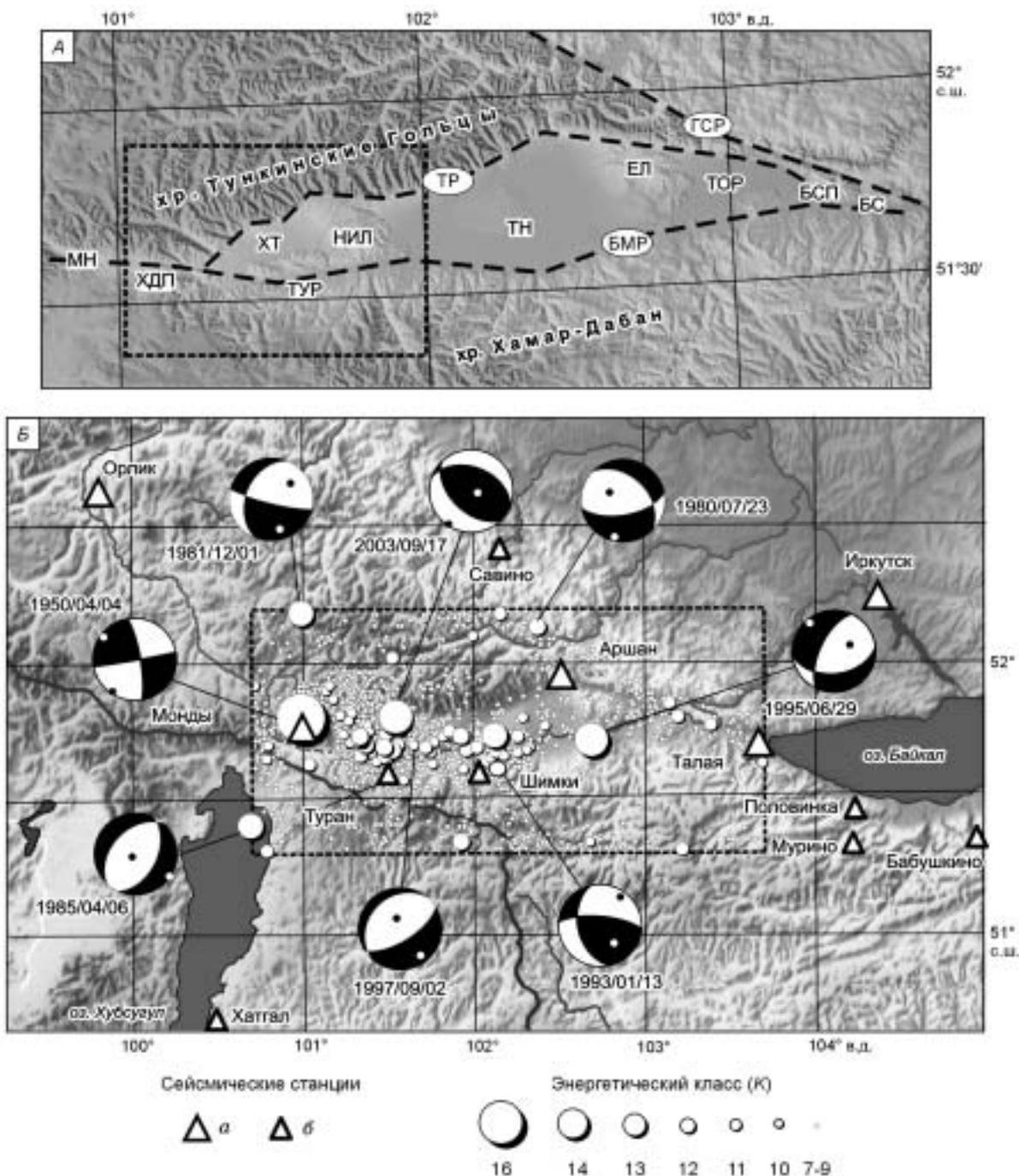
Первый этап формирования Тункинской системы впадин приходится на олигоцен-миоценовое время [Мазиллов и др., 1993; Логачев, 2003], при этом происходит разрастание Тункинского рифта с востока на запад. Прогибание западной части Тункинской системы впадин, исходя из данных бурения [Мазиллов и др., 1972], началось в среднем миоцене, а в среднем плиоцене значительно усилилось, о чем свидетельствует постепенное накопление сначала мелкозернистых отложений (миоцен), а затем грубообломочных (со второй половины плиоцена). В позднем плиоцене—раннем плейстоцене продолжалось опускание впадин и накопление русловых отложений, перекрывающих грубообломочные плиоценовые осадки. Основную роль в то время играл деформационный режим растяжения со сдвигом [Шерман, Днепровский, 1989; Лунина, Гладков, 2004а,б] (при кратковременном этапе сжатия на границе миоцена и плиоцена [Логачев, 2003; Парфеев, Саньков, 2004]), при котором бортовые разломы развивались как сбрососдвиги.

Деформационный режим на позднечетвертичном этапе развития Тункинской системы впадин определяется неоднозначно. Выводы, сделанные по результатам структурно-геологических исследований [Парфеев, Саньков, 2004; Лунина, Гладков, 2004б] (реконструкция полей тектонических напряжений по данным о трещиноватости) различны. В первом случае [Парфеев, Саньков, 2004] преобладающим считается режим сдвига со сжатием север-северо-восточного направления. Во втором [Лунина, Гладков, 2004б] — на всех этапах развития тункинской части Байкальской рифтовой зоны, включая современный, преобладает косоое растяжение (доминирующая СЗ ось растяжения при СВ оси сжатия), а деформации сжатия отражают лишь локальные кратковременные вариации напряженного состояния. При этом для оценки современного поля напряжений авторами [Парфеев, Саньков, 2004; Лунина, Гладков, 2004б] использовалась информация о фокальных механизмах землетрясений.

#### СЕЙСМИЧНОСТЬ И ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗЕМНОЙ КОРЫ

Сейсмостатистические данные свидетельствуют о том, что в исследуемом районе в XIX—XX веках произошло несколько достаточно сильных ( $M > 5$ ) землетрясений [Сейсмическое районирование..., 1977; Голенецкий, 1998]. Их очаговые зоны, как правило, располагались в тех областях, к которым было приурочено и большинство слабых толчков. Сеть стационарных и временных сейсмических станций России и Монголии, развернутая на территории юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны в 1958—1976 гг. (см. рис. 1, Б), позволила установить в районе Тункинских впадин и их горного обрамления повышенную сейсмическую активность (ошибка определения эпицентров землетрясений не превышала  $\delta = \pm 5 - 10$  км [Сеймотектоника и сейсмичность..., 1975]). В целом распределение эпицентров землетрясений здесь носит фрагментарный характер и следует двум направлениям — субширотному и северо-западному (см. рис. 1, Б), что подтверждается и более точной ( $\delta = \pm 2 - 5$  км) локализацией эпицентров землетрясений, зарегистрированных цифровыми сейсмическими станциями в последние годы (использовались материалы БФ ГС РАН за 1999—2003 гг.).

На рассматриваемой территории 4 апреля 1950 г. произошло одно из сильнейших землетрясений Восточной Сибири — Мондинское ( $M_L = 7.0$ ;  $K = 16$ ) [Сейсмическое районирование..., 1977; Новый каталог..., 1977]. Его очаг тяготеет к субширотно ориентированному сегменту Байкало-Мондинского разлома, ограничивающему с севера Мондинскую впадину. Именно для этого события, впервые в данном районе, А.В. Введенская и Л.М. Балакина [1960] определили фокальный механизм по знакам первых вступлений  $P$ -волн, записанных удаленными станциями мировой сети. Согласно полученному решению, обе возможные плоскости разрывов имели широтное простирание, одна из них была субгоризонтальной, другая — субвертикальной. Под действием вертикального растяжения и горизонтального СВ сжатия в очаге осуществлялись взбросовые подвижки (верхнее крыло разрыва поднималось, а нижнее — опускалось). Другую комбинацию очаговых параметров для Мондинского события предложила Л.А. Миша-

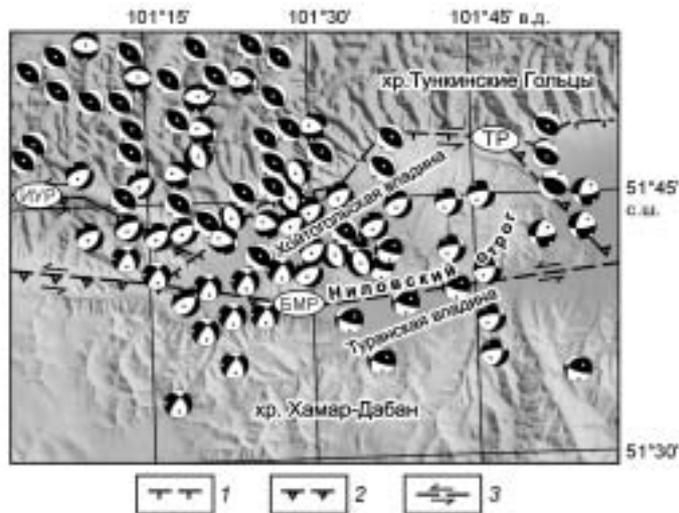


**Рис. 1. Основные структурные элементы Тункинской системы впадин (А).**

*Впадины:* МН — Мондинская, ХТ — Хойтогорская, ТУР — Туранская, ТН — Тункинская, ТОР — Торская, БС — Быстринская; межвпадинные перемычки: НИЛ — Ниловский отрог, ЕЛ — Еловский отрог, ХДП — Хара-Дабанская, БСП — Быстринская перемычки; *главные активные разломы:* ТР — Тункинский, БМР — Байкало-Мондинский; ГСР — Главный Саянский. Прямоугольником выделена область исследования.

**(Б). Эпицентры землетрясений на территории, выделенной прямоугольником, за период с 1950 по 2003 г. и индивидуальные фокальные механизмы в проекции нижней полусферы.**

На стереограммах закрашены области волн сжатия; главные оси напряжений растяжения и сжатия обозначены светлыми и темными точками соответственно. Сейсмические станции: *a* — постоянные, *b* — временные.



**Рис. 2.** Механизмы очагов слабых ( $K < 12$ ,  $M < 4.5$ ) землетрясений западного сектора Тункинской системы впадин (проекция нижней полусферы), определенные групповым методом [Сейсмотектоника и сейсмичность..., 1975; Мишарина, Солоненко, 1981] за период 1962—1974 гг.

Стереогаммы объяснены на рис. 1, Б. Разломы: ТР — Тункинский, БМР — Байкало-Мондинский, ИУР — Ихе-Ухгунский. 1—3 — кинематика разломов: 1 — сброс, 2 — взброс, 3 — сдвиг.

рина (устное сообщение): лево- и праводвиговые смещения по субширотной и субмеридиональной плоскостям разрывов осуществлялись под влиянием близгоризонтальных осей главных напряжений сжатия и растяжения СВ

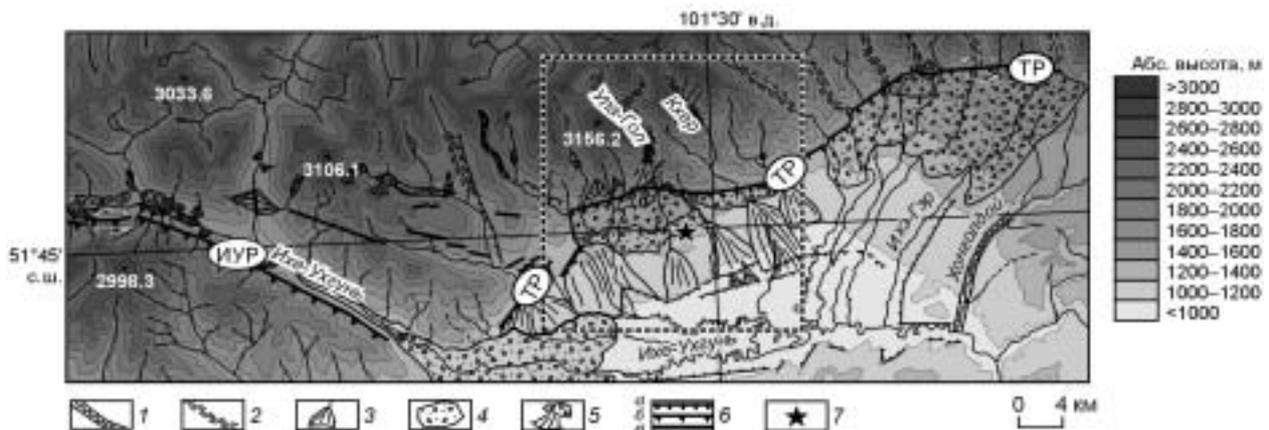
и СЗ ориентации соответственно. К сожалению, оба определения приблизительны, так как для надежного решения данных было недостаточно. Попытку уточнения фокального механизма землетрясения с помощью моделирования волновых форм на телесеизмических расстояниях предприняла Д. Досер [Doser, 1991]. Она установила, что перемещение в очаге имеет характер сдвига с небольшой сбросовой составляющей, причем по субвертикальной нодальной плоскости широтного простирания происходил правый сдвиг. Повторное моделирование, выполненное Б. Делюисом с соавторами [Delouis et al., 2002], подтвердило наличие почти горизонтальных движений в очаге, но в отличие от предыдущего результата [Doser, 1991] в этом решении по широтной плоскости реализовались леводвиговые смещения.

Индивидуальные фокальные механизмы еще двух относительно сильных землетрясений, локализованных в зоне Байкало-Мондинского разлома (13.01.1993,  $K = 12$  и 29.06.1995,  $K = 14$  [Мельникова, Радзиминович, 1998]), показывают леводвиговую компоненту смещений по субширотным плоскостям разрывов (см. рис. 1, Б). Такие плоскости, по приблизительным оценкам, установлены и в очагах Кыренских землетрясений (10.08.1958 г.,  $K = 12$ ; 22.10.1958 г.,  $K = 13$  [Хованова, 1960]). Таким образом, сейсмическая составляющая тектонических движений, проявленная в очагах рассмотренных сейсмических событий, позволяет установить в зоне сейсмогенерирующего Байкало-Мондинского разлома активную близвертикальную или наклонную плоскость субширотного простирания, характеризующуюся преимущественно левыми сдвигами. Принципиальное различие имеют индивидуальные механизмы землетрясений, произошедших на юге Хойтогольской впадины (02.09.1997,  $K = 11$  [Мельникова, Радзиминович, 2003]) и на ее северной границе с хр. Тункинские Гольцы (17.09.2003,  $K = 13.6$  [Мельникова и др., 2004]). Сбросовые и взбросовые подвижки в этих очагах реализовались по плоскостям разрывов СВ и СЗ простираний соответственно (см. рис. 1, Б).

При слабых ( $K < 12$ ) толчках, для которых решения механизмов были получены методом групповой обработки данных (погрешность в азимутах и углах погружений осей напряжений в 72 % случаев не превышала  $\pm 10^\circ$ , в остальных —  $15\text{--}25^\circ$  [Сейсмотектоника и сейсмичность..., 1975; Мишарина, Солоненко, 1981]), наблюдается многообразие простираний плоскостей разрывов и типов смещений в очагах (рис. 2). Рассматривалось 190 землетрясений, из которых 63 % характеризовались сдвиговыми подвижками в очагах, 34 % — взбросовыми и лишь 3 % — сбросовыми. Пространственно-временной анализ информации об очаговых параметрах слабых событий выявил кратковременные (эпизодические) флуктуации деформационного режима [Дядьков и др., 1999]. В то же время средний тензор сейсмического момента, рассчитанный по совокупным данным о фокальных механизмах и сейсмических моментах тункинских землетрясений, показал, что отличительной чертой района является сдвиговый деформационный режим, при котором вклад сжимающих усилий более значителен, чем растягивающих [Melnikova et al., 2004].

#### СТРУКТУРНО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ И СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗЫ

Чтобы определить, является ли современный деформационный режим кратковременным (в геологическом понятии времени) или унаследованным от более ранних периодов развития Тункинской системы впадин, имеющаяся сейсмологическая информация была сопоставлена со структурно-геоморфологическими данными. Последние получены в результате детального дешифрирования аэрофото- и крупномасштабных космических снимков с выявлением активных сегментов разломов по смещенным элементам рельефа, анализа речных террас и полевой геоморфологической завершенки ряда выделенных



**Рис. 3.** Геоморфологическая схема района сочленения Хойтогорьской впадины и хр. Тункинские Гольцы.

1 — террасы; 2 — троговые долины; 3 — конусы выноса; 4 — морены; 5 — обвалы; 6 — активные сегменты разломов: *a* — преобладающей сбросовой, *b* — взбросовой компонентой, *в* — кинематика не установлена; 7 — эпицентр Хойтогорьского землетрясения (17.09.2003 г.,  $K = 13.7$ ,  $MPSP = 4.8$ ). ТР — Тункинский, ИУР — Ихе-Ухгуньский разломы. Прямоугольником показан центральный сегмент Тункинского разлома.

объектов. Для подобного исследования был выбран район, отмеченный прямоугольником на рис. 1, А, так как именно здесь наблюдалась наибольшая сейсмическая активность.

Хойтогорьская впадина ограничена с севера хр. Тункинские Гольцы, а с востока и юга — Ниловским отрогом (см. рис. 1, А). Последний представляет собой межвпадинную перемычку, отделяющую Хойтогорьскую впадину от Туранской (на юге) и Тункинской (на востоке). Северо-восточный склон Ниловского отрога более крутой, чем остальные. Он контролируется взбросовым разломом СЗ простирания [Лунина, Гладков, 2004б]. В целом Ниловский отрог представляет собой наклонный блок, приподнятый в восточной части и опущенный в западной. Хойтогорьская впадина также асимметрична: по данным гравимагнитной съемки, наибольшая глубина залегания поверхности фундамента наблюдается в северо-западной части впадины [Объяснительная записка..., 1968].

Основную морфоконтролирующую роль в развитии Хойтогорьской впадины играет Тункинский разлом, сдвигосбросовые движения по которому приводят к опусканию северо-западного борта впадины. На геоморфологической схеме района сочленения Хойтогорьской впадины и хр. Тункинские Гольцы (рис. 3) Тункинский разлом представлен сегментами субширотного и северо-восточного простирания, хорошо дешифрируемыми на аэрофотоснимках. Наиболее активным, по геоморфологическим данным, является центральный сегмент разлома, обозначенный прямоугольником на рис. 3. В рельефе он проявлен ярко выраженными фасетами, у подножия которых находятся скальный оползень и огромные массы колювния обрушения (площадью до 10 км<sup>2</sup>), возможно, свидетельства мощных сейсмических событий прошлого. Несмотря на общее северо-восточное простирание сегмента, стенка отрыва меняет направление от субширотного до восток-северо-восточного. Этот сегмент является сейсмически-активным и на современном этапе. В очагах некоторых слабых землетрясений, локализованных в данном районе, он выражен плоскостью СВ простирания, падающей на юго-восток, и сбросовым типом смещений [Мишарина, Солоненко, 1981]. Группа подобных толчков наблюдается также в западном горном обрамлении Хойтогорьской впадины, но здесь в очагах отражены более мелкие, локальные разрывы, почти не проявленные в рельефе.

В хр. Тункинские Гольцы повсеместно встречаются землетрясения с СЗ простиранием плоскостей разрывов, по которым осуществляются движения типа взброса. Система напряжений в этом случае имеет „нерифтовую“ ориентацию: растяжение — вертикальное, СВ сжатие — близгоризонтальное. Такие события наиболее энергетически представительны в данном районе [Сейсмотектоника и сейсмичность..., 1975]. Землетрясения со взбросовыми механизмами частично проникают и в Хойтогорьскую впадину. Наиболее ярким примером является очаг достаточно сильного Хойтогорьского землетрясения (17.09.2003 г. в 02 ч 59 мин,  $K = 13.7$ ,  $MPSP = 4.8$ ;  $\varphi = 51.75^\circ$  N,  $\lambda = 101.46^\circ$  E), которое произошло в северной части Хойтогорьской впадины близ границы с хр. Тункинские Гольцы (см. рис. 3) [Мельникова и др., 2004]. Механизм его очага показал „нерифтовую“ ориентацию главных осей напряжений (близвертикальное растяжение и близгоризонтальное сжатие), СЗ простирание наклонных нодальных плоскостей и взбросовые типы подвижек (см. рис. 1, Б). Небольшое число таких землетрясений наблюдается в районе

Ниловского отрога (в зоне взбросового разлома северо-западного простирания). Отметим, что разломы этой ориентации широко распространены в изучаемом районе. На схеме разломно-блокового строения западной части Тункинского рифта [Лунина, Гладков, 2004б] они преобладают и хорошо выражены в рельефе, что является свидетельством их позднекайнозойской активности.

По ряду геоморфологических признаков (см. рис. 3) развитие Хойтогольской впадины на позднекайнозойском этапе не является однонаправленным. Формирование мощных конусов выноса первой генерации средне- и позднеплейстоценового возраста [Объяснительная записка..., 1968; Уфимцев и др., 2002] и широкая заболоченная долина р. Ихе-Ухгунь в пределах Хойтогольской впадины свидетельствуют о преобладании нисходящих движений в среднем и позднем плейстоцене. Со второй половины позднего плейстоцена начался новый врез с образованием террас р. Ихе-Ухгунь (вторые надпойменные террасы, по данным [Уфимцев и др., 2002]) и второй генерации конусов выноса ее левых притоков, на которых, в свою очередь, формируются раннеголоценовые [Уфимцев и др., 2002] первые надпойменные террасы. Новые террасы образуются также в восточной части впадины и на западном склоне Ниловского отрога, в долинах притоков р. Ихе-Ухгунь — рек Хонголдой и Ихэ-Гэр. Примечательно, что в западной части впадины притоки р. Ихе-Ухгунь не террасированы. Формирование нового комплекса террас в южной и восточной частях впадины свидетельствует о преобладании в голоцене восходящих вертикальных движений в их пределах. Об инверсионном поднятии этих частей впадин вместе с Ниловским отрогом свидетельствуют и геоморфологические данные, как, например, молодой V-образный врез долины р. Ихе-Ухгунь при пересечении ею Ниловского отрога [Щетников, Уфимцев, 2004]. Северо-западный же борт Хойтогольской впадины продолжает погружаться. Такая динамика отражена и в фокальных механизмах локализованных здесь слабых землетрясений, характеризующихся сбросовыми и сбрососдвиговыми подвижками в очагах по плоскостям разрывов СВ и субширотного простирания соответственно (см. рис. 2). В пределах Хойтогольской впадины и Ниловского отрога встречаются и другие комбинации главных осей сжатия и растяжения в очагах землетрясений, приводящие к взбросам по СЗ плоскостям разрывов и к правым сдвигам по субмеридиональным.

В зоне Байкало-Мондинского разлома и прилегающих районах хр. Хамар-Дабан, меридиональное наклонное сжатие и субширотное горизонтальное растяжение приводят к левым и правым сбрососдвигам по плоскостям разрывов СВ и СЗ простирания соответственно. Такая кинематика не согласуется с левосдвиговым движением в зоне Байкало-Мондинского разлома, представленного в очаге крупного Мондинского землетрясения (левосторонний сдвиг по субширотной плоскости при СВ оси сжатия и СЗ оси растяжения). Вероятно, после крупного толчка создались предпосылки к перераспределению напряжений и их разрядке в последующие годы в виде мелких землетрясений по плоскостям северо-восточного и северо-западного простирания.

Таким образом, комплексный структурно-геоморфологический и сейсмологический анализ западной части Тункинской системы впадин показывает, что современные землетрясения в целом унаследуют общую тенденцию развития структур в позднечетвертичное время. Механизмы очагов слабых землетрясений отражают общую картину напряженного состояния на данный промежуток времени. При этом подвижки в большинстве однотипных очагов соответствуют кинематике выраженных в рельефе разломов, что свидетельствует об их устойчивой активизации на протяжении всего позднечетвертичного этапа, включая современную стадию.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В общей структуре современного напряженно-деформированного состояния юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны район Тункинских впадин с их горным обрамлением занимает особое положение. Здесь наиболее ярко проявляются особенности перехода от структур растяжения Байкальского рифта к структурам регионального сжатия Северной Монголии: „взаимопрокиновение“ очагов землетрясений байкальского типа на запад и очагов, характерных для Северной Монголии, — на восток.

В крупном масштабе рассматриваемая территория находится в сдвиговом деформационном поле, о чем наглядно свидетельствуют типы смещений, реализуемые в очаге сильнейшего Мондинского события 04.04.1950 г. (см. рис. 1, Б). Фокальные механизмы фоновых землетрясений показывают, что в формировании особенностей поля напряжений и деформаций Тункинского района важную роль играет устойчивое близгоризонтальное СВ сжатие [Melnikova et al., 2004].

Деформации сдвига со сжатием характерны для Тункинской системы впадин на всем позднечетвертичном этапе развития. В результате предыдущих исследований в районе Мондинской впадины (западное замыкание Тункинской системы впадин) [Аржанникова и др., 2003; Arjannikova et al., 2004] были обнаружены позднеплейстоцен-голоценовые взбрососдвиговые деформации в зонах Ихе-Ухгуньского и Мондинского разломов. Остановимся подробнее на кинематике последнего, так как он, являясь западным сегментом регионального Байкало-Мондинского разлома, вместе с Тункинским играет определяющую роль в геодинамическом развитии изучаемого района.

Левосдвиговые смещения по Мондинскому разлому отмечались многими исследователями и разногласий не вызывают [Шерман и др., 1973; Лукина, 1989; Лунина, Гладков, 2004б; и др]. Спорной является вертикальная компонента смещений по разлому. По данным Н.В. Лукиной [1989], О.В. Луниной, А.С. Гладкова [2004б], Мондинский разлом имеет падение на юг и является левосторонним сбрососдвигом. Однако при сбросовой подвижке разлом должен быть представлен в рельефе прямым уступом. Геоморфологический анализ показывает, что осевая зона выражена обратным уступом, формирование которого, при падении разлома на юг, говорит о взбросовой компоненте смещения. Об этом же свидетельствует наличие взбросовых голоценовых деформаций по оперяющему Мондинский разлому северо-западного простирания [Аржанникова и др., 2005]. В ходе сейсмогеологических исследований, выполненных С.Г. Аржанниковым, А.В. Чипизубовым и Р.М. Семеновым, на правом борту долины р. Горхон были выявлены следы палеосейсмического события. Они представлены пластическими и разрывными взбросовыми дислокациями суглинистых и песчано-галечных отложений, а также древнего почвенного покрова. Проведенное датирование образцов деформированной почвы ( $530 \pm 30$  ГИН 11321) показало, что подвижка произошла в интервале 500—560 лет назад [Аржанникова и др., 2005].

Поднятие южного крыла Мондинского разлома привело к активному врезу водотоков. Так, в западной части Мондинской впадины (в южном крыле Мондинского разлома) продатирована погребенная палеопочва в верхней части поднятой на 13 м террасы р. Иркут [Arjannikova et al., 2004]. Возраст террасы достигает 8105—8026 лет. Таким образом, рассчитанная приблизительная скорость поднятия висячего (южного) крыла Мондинского разлома в голоцене составляет 1.5 мм/год [Arjannikova et al., 2004]. Кинематика движений по этому разлому нашла свое отражение в очагах известного Мондинского события 1950 г. с  $M_L = 7.0$ , одного из Кыренских землетрясений 1958 г. с  $K = 13$  и землетрясения 13.01.1993 с  $K = 12$  (пространственные координаты всех событий приурочены к осевой зоне разлома): по крутопадающим плоскостям субширотного простирания осуществлялись левосторонние сдвиги, в двух последних случаях со взбросовой компонентой смещения.

Материалы исследований свидетельствуют о том, что Байкало-Мондинский разлом (по крайней мере, Мондинский его сегмент) на позднечетвертичном этапе развития проявил себя как левосторонний взбрососдвиг. Данные, приведенные в работе [Лунина, Гладков, 2004а] о сбрососдвиговой его кинематике, основанные на структурном анализе зоны разлома в основном в породах фундамента, относятся, скорее всего, к более раннему этапу его развития.

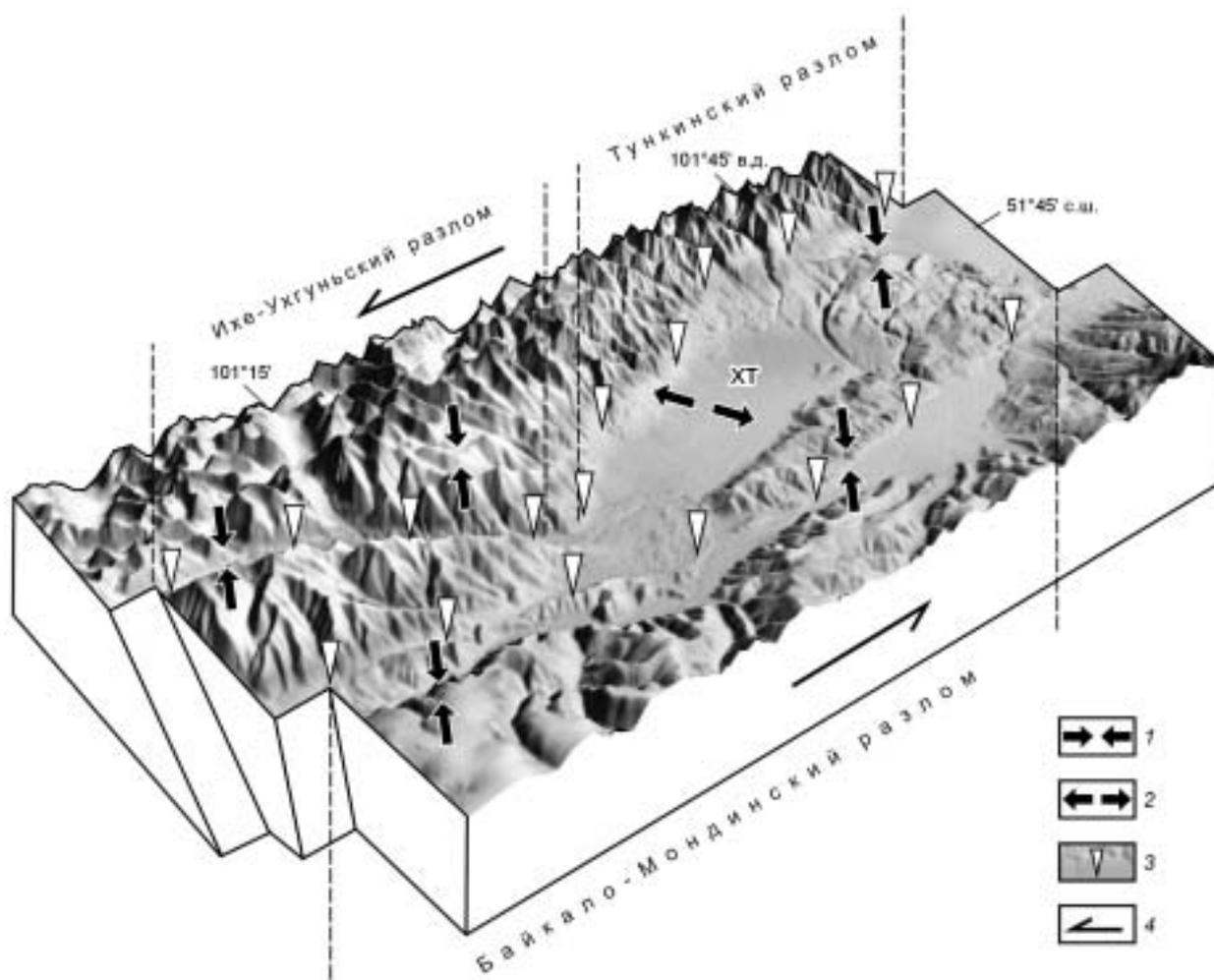
Взбрососдвиговые деформации также были обнаружены в зоне Тункинского разлома в пределах Тункинской и Торской впадин [Чипизубов и др., 2003]. Авторами указанной работы выявлены и датированы многоактные голоценовые взбрососдвиговые дислокации Аршанской (северный борт Тункинской впадины) и Торской (северный борт Торской впадины) палеосейсмоструктур. Формирование сейсмодислокаций такого типа в голоцене также свидетельствует о деформационном режиме сдвига со сжатием под воздействием регионального поля напряжений с осью сжатия ССВ направления.

К деформациям сдвига со сжатием мы также относим инверсионные поднятия впадин Тункинской системы, описанные в работе [Щетников, Уфимцев, 2004], по геоморфологическим данным из которой Мондинская и Быстринская впадины практически полностью вовлечены в поднятие, Торская — на 40 % (в южной ее части), Хойтогольская и Тункинская — частично (на границах с Ниловским и Еловским отрогами и хр. Хамар-Дабан).

Таким образом, развитие Тункинской системы впадин в рассматриваемом временном масштабе не является однонаправленным. Преобладающий с миоцена режим сдвига с растяжением и формированием сбросов и сдвиго-сбросов по зонам главных разломов, раскрытием впадин и накоплением мощных толщ рыхлых отложений на позднечетвертичном этапе сменился режимом сдвига со сжатием. Этот вывод согласуется с результатами структурно-геологических исследований [Парфеев, Саньков, 2004], свидетельствующих о смене деформационного режима этой территории в позднечетвертичное время.

Характер позднечетвертичных деформаций во многом зависит от расположения структур внутри „Тункинской сдвиговой зоны“. Для западной части Тункинской системы впадин деформации сжатия тяготеют к границам блоков (граница Ниловского отрога с прилегающими впадинами), а также к северному горному обрамлению, где происходит активизация разломов северо-западного простирания (рис. 4). Деформации растяжения характерны для внутренней части Хойтогольской впадины, остающейся в „тектонической тени“ при сдвиговом перемещении блоков по Байкало-Мондинскому разлому. В очагах землетрясений, локализующихся во впадине, чаще встречаются сочетания близгоризонтального СЗ растяжения с наклонным или близвертикальным сжатием, в то время как на границах блоков и в хребтах доминирует близвертикальное растяжение и близгоризонтальное СВ сжатие.

Выявленные закономерности находят объяснение с точки зрения общей геодинамической обстановки региона. Передача к северу напряжений, вызванных Индо-Азиатской коллизией, приводит к выжиманию блоков западной части Монголии с их вращением по часовой стрелке [Саньков и др., 2002]. При этом Тункинская система впадин является северной границей одного из блоков и характеризуется



**Рис. 4. Трехмерная модель рельефа района Хойтогольской впадины (ХТ).**

Преобладающие деформации: 1 — сжатия, 2 — растяжения; 3 — главные активные разломы; 4 — направление относительного движения блоков.

преобладанием левосдвиговых деформаций. Перераспределение напряжений на границах блоков более мелкого масштаба в пределах Тункинской системы впадин приводит к формированию структур сжатия и растяжения, непостоянных в пространственно-временном аспекте.

Авторы выражают благодарность А.В. Прокопьеву и анонимному рецензенту, замечания которых позволили улучшить текст статьи, а также Байкальскому филиалу ГС РАН за предоставленные материалы сейсмологических наблюдений.

Работа поддержана РФФИ (гранты 04-05-64460, 03-05-65418, 05-05-66812-НЦНИЛ), Фондом содействия отечественной науке и Президиумом РАН (программа № 13).

#### ЛИТЕРАТУРА

**Аржанникова А.В., Ларрок К., Аржанников С.Г.** К вопросу о голоценовом режиме деформаций в районе западного окончания системы Тункинских впадин (юго-западный фланг Байкальской рифтовой зоны) // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (4), с. 373—379.

**Аржанникова А.В., Аржанников С.Г., Семенов Р.М., Чипизубов А.В.** Позднекайнозойская кинематика разломов в зоне сочленения Хубсугульской и Тункинской рифтогенных впадин // Труды V Российско-Монгольской конференции по астрономии и геофизике. Иркутск, Институт солнечно-земной физики СО РАН, 2005, с. 15—17.

**Введенская А.В., Балакина Л.М.** Методика и результаты определения напряжений, действующих в очагах землетрясений Прибайкалья и Монголии // Бюл. Совета по сейсмологии, 1960, № 10, с. 73—84.

**Голенецкий С.И.** Сейсмичность района Тункинских впадин на юго-западном фланге Байкальского рифта в свете инструментальных наблюдений второй половины XX века // Геология и геофизика, 1998, т. 39 (2), с. 260—270.

**Дядьков П.Г., Мельникова В.И., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Саньков В.А.** Сейсмотектоническая активизация Байкальского региона в 1989—1995 годах: результаты экспериментальных наблюдений и численное моделирование изменений напряженно-деформированного состояния // Геология и геофизика, 1999, т. 40 (3), с. 373—386.

**Леви К.Г., Солоненко А.В., Кочетков В.М., Мельникова В.И., Голенецкий С.И., Солоненко Н.В., Штейман Е.А., Масальский О.К., Хромовских В.С., Смекалин О.П., Дельянский Е.А., Демьянович В.М., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Ружич В.В., Аржанникова А.В., Кириллов П.Г., Лухнев А.В.** Современная геодинамика: сейсмология, активные разломы, сейсмоструктоника (фундаментальные аспекты) // Литосфера Центральной Азии. Новосибирск, Наука, 1996, с. 134—149.

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

**Лукина Н.В.** Четвертичные движения по разломам юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны // Геотектоника, 1989, № 2, с. 89—100.

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

**Лунина О.В., Гладков А.С.** Разломная структура и поля напряжений западной части Тункинского рифта // Геология и геофизика, 2004б, т. 45 (10), с. 1235—1247.

**Мазилов В.Н., Ломоносова Т.К., Климанова В.М., Кашаева Г.М., Ершов Р.И., Семенова Г.О.** Литология третичных отложений впадин юго-западной части Байкальской рифтовой зоны. М., Наука, 1972, 119 с.

**Мазилов В.Н., Кашик С.А., Ломоносова Т.К.** Оligоценовые отложения Тункинской впадины (Байкальская рифтовая зона) // Геология и геофизика, 1993, т. 34 (8), с. 81—88.

**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 // Землетрясения Северной Евразии в 1997 году (IV. Каталоги механизмов очагов землетрясений. CD\Baykal\_97.doc). Обнинск, ГС РАН, 2003.

**Мельникова В.И., Радзиминович Н.А., Гилева Н.А.** Очаговые параметры землетрясений Байкальского региона в 2003 г. // Современная геодинамика и опасные природные процессы в Центральной Азии. Иркутск, ИЗК СО РАН, ИрГТУ, 2004, с. 197—201.

**Мишарина Л.А., Солоненко Н.В.** Механизм очагов землетрясений юго-западного фланга Байкальской рифтовой зоны // Сейсмические исследования в Восточной Сибири. М., Наука, 1981, с. 3—11.

**Новый каталог** сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. / Под ред. Н.В. Кондорской, Н.В. Шебалина. М., Наука, 1977, 536 с.

**Объяснительная записка** к геологической карте м-ба 1:200 000, серия Восточно-Саянская, лист М-47-VI. М., Недра, 1968, 50 с.

**Парфеевец А.В., Саньков В.А.** Эволюция напряженно-деформированного состояния земной коры в юго-западном окружении Сибирской платформы на неотектоническом этапе // Эволюция тектонических процессов в истории Земли: Материалы XXXVII тектонического совещания, Т. 2. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал „Гео“, 2004, с. 72—75.

**Саньков В.А., Леви К.Г., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Парфеевец А.В., Радзиминович Н.А., Мельникова В.И., Девершер Ж., Кале Э., Пети-Мариани К., Амаржаргал С., Дельво Д.** Современная геодинамика Монголо-Сибирского подвижного пояса по данным геолого-структурных и инструментальных исследований // Тектоника и геофизика: Материалы XXXV тектонического совещания. М., Геос, 2002, с. 170—174.

**Сейсмическое районирование** Восточной Сибири и его геолого-геофизические основы / Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск, Наука, 1977, 302 с.

**Сейсмоструктоника** и сейсмичность юго-восточной части Восточного Саяна / Ред. В.П. Солоненко. Новосибирск, Наука, 1975, 135 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., 1993, с. 111—122.

**Уфимцев Г.Ф., Шибанова И.В., Кулагина Н.В., Машук И.М., Перевалов А.В., Резанова В.П., Фогт Т., Игнатова Н.В., Мишарина В.А.** Верхнеплейстоценовые и голоценовые отложения Тункин-

ского рифта (Южное Прибайкалье) // Стратиграфия. Геологическая корреляция, 2002, т. 10, № 3, с. 90—99.

**Хованова Р.И.** Кыренское землетрясение 22 октября 1958 г. // Бюл. Совета по сейсмологии, 1960, № 10, с. 40—43.

**Чипизубов А.В., Смекалин О.П., Семенов Р.М.** Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения в зоне Тункинского разлома (Юго-Западное Прибайкалье) // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (6), с. 587—602.

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

**Шерман С.И., Медведев М.Е., Ружич В.В., Киселев А.И., Шмотов А.П.** Тектоника и вулканизм юго-западной части Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск, Наука, 1973, 135 с.

**Щетников А.А., Уфимцев Г.Ф.** Структура рельефа и новейшая тектоника Тункинского рифта (Юго-Западное Прибайкалье). М., Научный мир, 2004, 160 с.

**Arjannikova A., Larroque C., Ritz J.-F., Déverchère J., Stéphane J.-F., Arjannikov S., San'kov V.** Geometry and kinematics of recent deformation in the Mondy-Tunka area (south-westernmost Baikal rift zone, Mongolia-Siberia) // Terra Nova, 2004, v. 16, № 5, p. 265—272.

**Delouis B., Déverchère J., Melnikova V., Radziminovitch N., Loncke L., Larroque C., Ritz J.F., San'kov V.** A reappraisal of the 1950 (Mw 6.9) Mondy earthquake, Siberia, and its relationship to the strain pattern at the south-western end of the Baikal rift zone // Terra Nova, 2002, v. 14, № 6, p. 491—500.

**Doser D.I.** Faulting within the western Baikal rift as characterized by earthquake studies // Tectonophysics, 1991, v. 196, p. 87—107.

**Melnikova V.I., Radziminovich N.A., Adyaa M.** Mechanisms of earthquake foci and seismotectonic deformations of the Mongolia region // Complex geophysical and seismological investigations in Mongolia. Ulaan-Baatar — Irkutsk, 2004, p. 165—170.

*Рекомендована к печати 10 мая 2006 г.  
В.А. Верниковским*

*Поступила в редакцию  
20 декабря 2005 г.*