ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, 2010, том 11, № 2, с.52-61

УДК 550.341

СКОРОСТИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАЗРЫВОВ В ОЧАГАХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ

© 2010 г. А.А. Добрынина, В.А. Саньков

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Исследованы параметры разрывов в очагах землетрясений Байкальской рифтовой системы с использованием трех методов – для группирующихся событий, построения азимутальных годографов и катакластического анализа. Для Южно-Байкальской и Кичерской последовательностей землетрясений 1999 г. получены данные о скоростях и направлениях вспарывания, ориентации плоскостей подвижки в очагах. Уточнены сценарии процесса разрушения для межвпадинных перемычек и внутривпадинных структур.

Ключевые слова: Байкальская рифтовая система, афтершоковые и роевые последовательности, скорость и направление распространения разрыва.

Введение

Скорости и направления распространения разрывов в очагах землетрясений, тесно связанные с величиной и типом действующих тектонических напряжений, характеризуют условия геодинамического развития отдельных сегментов земной коры [*Шамина*, 1981]. Знание скорости распространения разрыва необходимо при оценке таких параметров очага, как размер источника, амплитуда подвижки, величина сброшенного напряжения. Нами анализировались скорости и направления вспарывания в источнике для двух последовательностей землетрясений – Южно-Байкальской и Кичерской, имевших место на территории Байкальской рифтовой системы (БРС) в 1999 г. Для определения параметров разрыва в источнике применялись три метода: метод для группирующихся событий, предложенный в работе [*Солоненко*, *Солоненко*, 1987], который далее будет именоваться методом Солоненко, метод построения азимутальных годографов из работы [*Горбунова*, *Кальметьева*, 1988], метод катакластического анализа, разработанный Ю.Л. Ребецким [2007]. Способы определения скорости и направления распространения разрыва, предложенные в работах [*Солоненко*, *Солоненко*, 1987, *Горбунова*, *Кальметьева*, 1988], основаны на сейсмическом подобии эффекта Доплера и используют зависимость от скорости и направления распространения разрыва видимых периодов максимальных смещений на сейсмограмме [*Солоненко*, *Солоненко*, 1987] и длительности процесса разрушения в очаге [*Горбунова*, *Кальметьева*, 1988]. Предложенный в методе катакластического анализа критерий идентификации плоскости в очаге землетрясения является следствием закона Кулона и определяет в качестве реализованной ту из нодальных плоскостей, для которой достигается большая величина сбрасываемых напряжений [*Ребецкий*, 2007].

Характер распределения во времени выделившейся энергии для сейсмических последовательностей напрямую связан с напряженно-деформированным состоянием среды и отражает процесс разрядки напряжений в сейсмоактивной области. Выделение однородных стадий реализации напряжений для рассматриваемых последовательностей проводилось на основе анализа графика Г. Беньоффа [1961], показывающего распределение сейсмической энергии E_S во времени (E_S=10^KДж, где K – энергетический класс по [*Раутиан,* 1960]). В дальнейшем было сделано предположение о квазистабиль-

ности напряженного состояния в течение выделенных фаз и по методу Солоненко для каждой фазы в отдельности выполнены расчеты скоростей и направлений вспарывания.

Южно-Байкальская последовательность землетрясений 1999 г.

Неотектоническая схема разломов Южно-Байкальской впадины по [*Radziminovich et al*., 2005], используемая при дальнейшем анализе, представлена на рис. 1, I. Впадина ограничена с запада Главным Саянским разломом (тип смещений в кайнозое – левый сбросо-сдвиг), с севера и юга Обручевским разломом и системой разломов Черского (сдвиго-сбросы восточно-северо-восточного простирания). По результатам сейсмического профилирования и данным батиметрии в центральной части впадины установлены разломы субширотного и северо-восточного простирания. Рассматриваемая последовательность землетрясений локализована в Южно-Байкальской впадине, в восточной части Култукской депрессии, в зоне пересечения внутривпадинных разломов субширотного, северо-восточного и северо-западного простирания [*Радзиминович и др.,* 2006]. Данная последовательность является крупнейшей инструментально зарегистрированной на территории Южного Байкала – всего за 1999 г. здесь зафиксировано более 400 толчков с энергетическим классом $K \geq 8$ [*Леонтьева*, *Гилева*, 2005]. Для 20 энергетически наиболее представительных ($K \geq 9$) землетрясений Южно-Байкальской последовательности в Институте земной коры СО РАН получены решения фокальных механизмов [*Радзиминович и др*., 2006]. Главное событие последовательности произошло 25.02.1999 г. в 18^h58^m с Mw=5.9 (здесь и далее Mw – моментная магнитуда по данным Гарвардского университета). Вслед за Среднебайкальским землетрясением 29.08.1959 г. (M_S=6.8) и Култукским 27.08.2007 г. (Mw=6.2) оно принадлежит к сильнейшим событиям района Южного Байкала, произошедшим в период инструментальных наблюдений с 1950 г. по 2007 г.

Для трех сильнейших событий, произошедших в Южно-Байкальской впадине в 1981, 1999 и 2008 гг., на рис. 1, I показаны их эпицентры (звездочки), обозначены дата, время и моментная магнитуда по данным Гарвардского университета (для события 22.05.1981 г. магнитуда пересчитана из энергетического класса с использованием зависимости из [*Раутиан,* 1960]). Для события 25.02.1999 г. приведен его фокальный механизм; области волн сжатия залиты серым цветом, положение нодальных плоскостей обозначено кривыми линиям; выходы осей главных напряжений обозначены кружками (залитый – напряжения сжатия, без заливки – растяжения).

На основе анализа графика Беньоффа (рис. 1, II) для рассматриваемой последовательности выделены четыре стадии развития сейсмического процесса: 1 – начало активности (09.02–11.02), 2 – затишье (12.02–24.02), 3 – основная фаза (25.02–28.02), 4 – затухание (с 01.03), что согласуется с пространственно-временным анализом, приведенным в работе [*Радзиминович и др.,* 2006].

С использованием двух из вышеназванных методов – построения азимутальных годографов и катакластического анализа – для 6 событий в первом случае и 18 во втором были установлены наиболее вероятные плоскости разрывов в очагах. Решения, полученные двумя разными методами, не противоречат друг другу, что может свидетельствовать о надежности определений. Большинство плоскостей ориентировано субширотно (рис. 1, III), плоскости другого простирания представлены в меньшем количестве. На диаграмме углов падения (рис. 1, IV) четко видно преобладание крутых плоскостей разрывов. Для основного события последовательности (25.02.1999 г., 18^h58^m, Mw =5.9) по результатам обоих методов в качестве рабочей установлена плоскость, крутопадающая на северо-запад (см. рис. 1, I), что соответствует определению, сделан-

ному ранее на основе анализа эпицентрального поля афтершоков, фокальных механизмов и результатов релокализации афтершоков [*Радзиминович и др.,* 2006].

Для 12 землетрясений последовательности по методу Солоненко получены значения скоростей и определены направления распространения разрывов в их очагах. Практически во всех случаях разрывы в очагах распространяются в одном направлении (азимут 241–254°) (см. рис. 1, I). Значения скоростей вспарывания, найденные с использованием двух методов (для группирующихся событий и построения азимутальных годографов), близки между собой и в среднем составляют $1.0 \cdot V_S$ (V_S – скорость поперечных волн). Результаты определения скоростей и направлений вспарывания в очагах

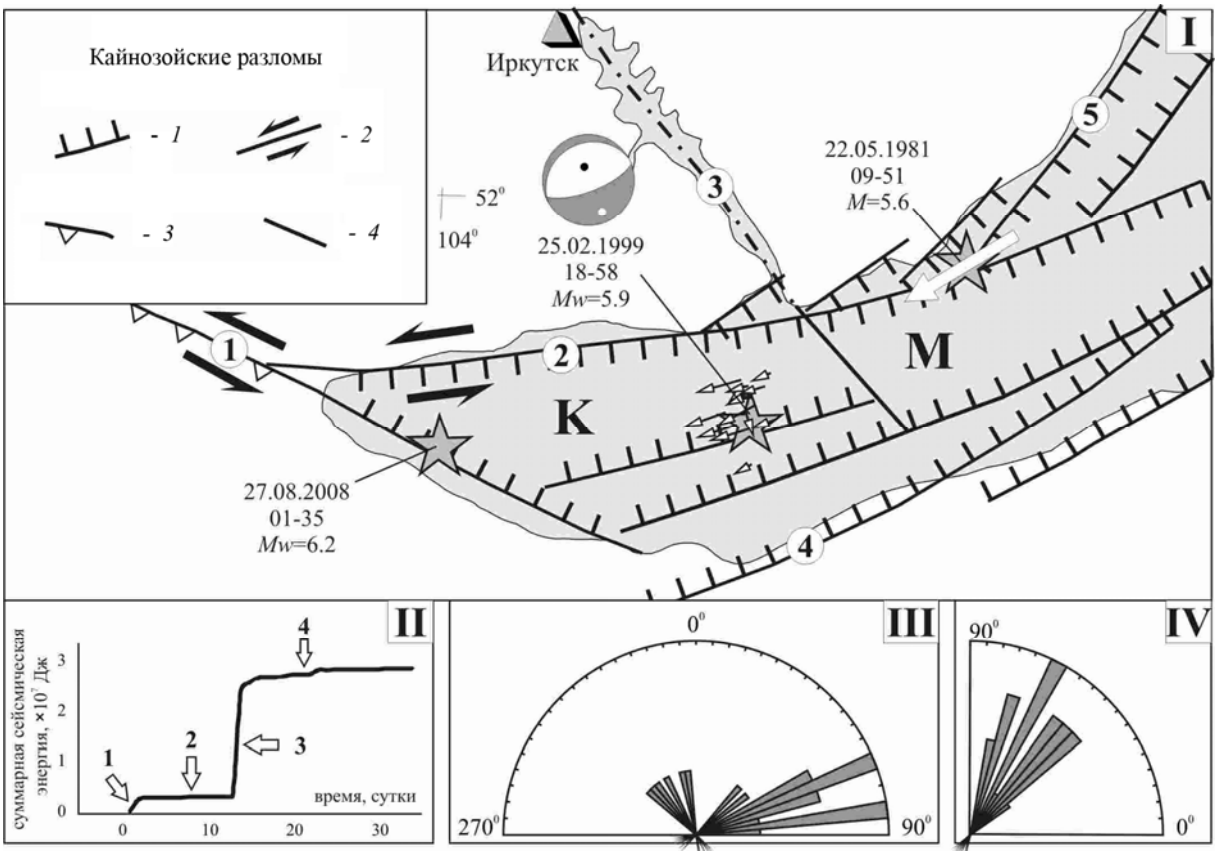

Рис. 1. I. Неотектоническая схема разломов Южно-Байкальской впадины по [*Radziminovich et al*., 2005]

1–4 – типы разломов (*1* – сброс, *2* – сдвиг, *3* – взброс, *4* – не установлен). Цифрами 1–5 в кружках отмечены кайнозойские разломы: Главный Саянский (1), Обручевский (2), Ангарский (3), Черский (4), Приморский (5). Берг-штрихи направлены в сторону опущенного крыла разлома. К – Култукская внутривпадинная депрессия, М – Мишихинская. Стрелки на схеме – направления распространения разрывов в очагах землетрясений Южно-Байкальской впадины: белая стрелка – общее направление вспарывания в очагах афтершоков землетрясения 22.05.1981 г. по [*Солоненко, Солоненко*, 1987]; черные стрелки – направления распространения разрывов в очагах Южно-Байкальской последовательности землетрясений 1999 г., определенные по методу Солоненко [*Солоненко, Солоненко*, 1987]; длина стрелок соответствуют длине очагов, полученной по корреляционной зависимости Ю.В. Ризниченко [1985], с учетом проекции на земную поверхность

II. График Беньоффа. Стрелками с номерами 1–4 отмечены стадии развития сейсмического процесса (см. текст)

III, IV. Розы-диаграммы простирания плоскостей разрывов (III) и углов их падения (IV), установленных по методам, представленным в работе [*Горбунова, Кальметьева,* 1988; *Ребецкий*, 2007]

Южно-Байкальской последовательности землетрясений 1999 г. согласуются с данными, полученными для другой части Южно-Байкальской впадины при анализе афтершоков землетрясения 22.05.1981 г. [*Солоненко*, *Солоненко*, 1987].

Ретроспективный анализ данных, представленных в работе [*Солоненко*, *Солоненко*, 1987], и их совместная интерпретация с результатами наших расчетов позволяют предположить, что процесс деструкции развивается последовательно в пределах зоны активных деформаций, а направление распространения разрывов может служить индикатором зоны будущего сильного землетрясения [*Добрынина*, *Саньков*, 2008]. В случае Южно-Байкальской впадины разрывы в очагах афтершоков события 22.05.1981 г. указывают на фокальную область Южно-Байкальского землетрясения 25.02.1999 г., а разрывы в очагах афтершоков данного землетрясения ориентированы на юго-запад Култукской депрессии, где 27.08.2008 г. в 13^h35^m произошло сильное Култукское землетрясение с *Mw*=6.2 (см. рис. 1, I). В работе [*Ребецкий*, 2007] показано, что очаг сильного землетрясения возникает в области высокого градиента напряжений, куда, по-видимому, и стремятся прорасти сейсмогенные разрывы, предшествующие сильному событию. Помимо направления вспарывания другим показателем существования зоны высокоградиентных напряжений в земной коре Южно-Байкальской впадины могут служить данные геодезических измерений с использованием спутниковой системы *GPS*. Для этой территории рассчитано поле скоростей максимальных горизонтальных сдвиговых деформаций, согласно которому одна из высокоградиентных зон находится на западном замыкании Южно-Байкальской впадины [*Лухнев и др.*, 2003].

Кичерская последовательность землетрясений 1999 г.

Вторая из анализируемых нами последовательностей землетрясений 1999 г. – Кичерская – крупнейшая в Байкальской рифтовой системе (БРС) за инструментальный период регистрации. В течение года в данном районе было зарегистрировано около 4500 событий с энергетическим классом *K*≥7 [*Леонтьева*, *Гилева*, 2005]. Сильнейшие события последовательности произошли 21.03, 30.05 и 21.12.1999 г. (таблица). Для 63 событий с *K*>9.5 ранее были получены решения фокальных механизмов [*Мельникова и др.*, 2007]. Землетрясения локализованы в зоне Верхнеангарского разлома [Геология…, 1985], вблизи юго-восточного борта Кичерской впадины и в пределах Кичеро-Верхнеангарской межвпадинной перемычки (рис. 2, I), их эпицентральное поле имело форму эллипса, вытянутого в северо-восточном направлении [*Мельникова и др.*, 2007].

Для четырех сильнейших событий последовательности на рис. 2, I показаны их эпицентры, дата, время, моментная магнитуда по данным Гарвардского университета и

Характеристика сильнейших событий
Кичерской последовательности землетрясений 1999 г.

Событие		Моментная магнитуда *Mw* по данным Гарвардского университета	Магнитуды по поверхностным волнам M_S		Магнитуды по объемным волнам в дальней (Δ≥2000 км) зоне	
Дата	Время		по данным [Сейсмологический…, 1999–2000]	по данным [Bulletin…, 2001]	*MPSP* по данным [Сейсмологический…, 1999–2000]	m_b по данным [Bulletin…, 2001]
1	2	3	4	5	6	7
21.03.1999	16^h16^m	5.9	6.0	5.8	5.8	5.5
21.03.1999	16^h17^m	5.9	6.1	-	5.7	5.6
21.03.1999	21^h14^m	-	4.5	3.8	4.9	4.7
30.05.1999	15^h56^m	5.2	4.9	4.7	5.6	5.2
21.12.1999	11^h00^m	5.4	5.2	5.0	5.8	5.5

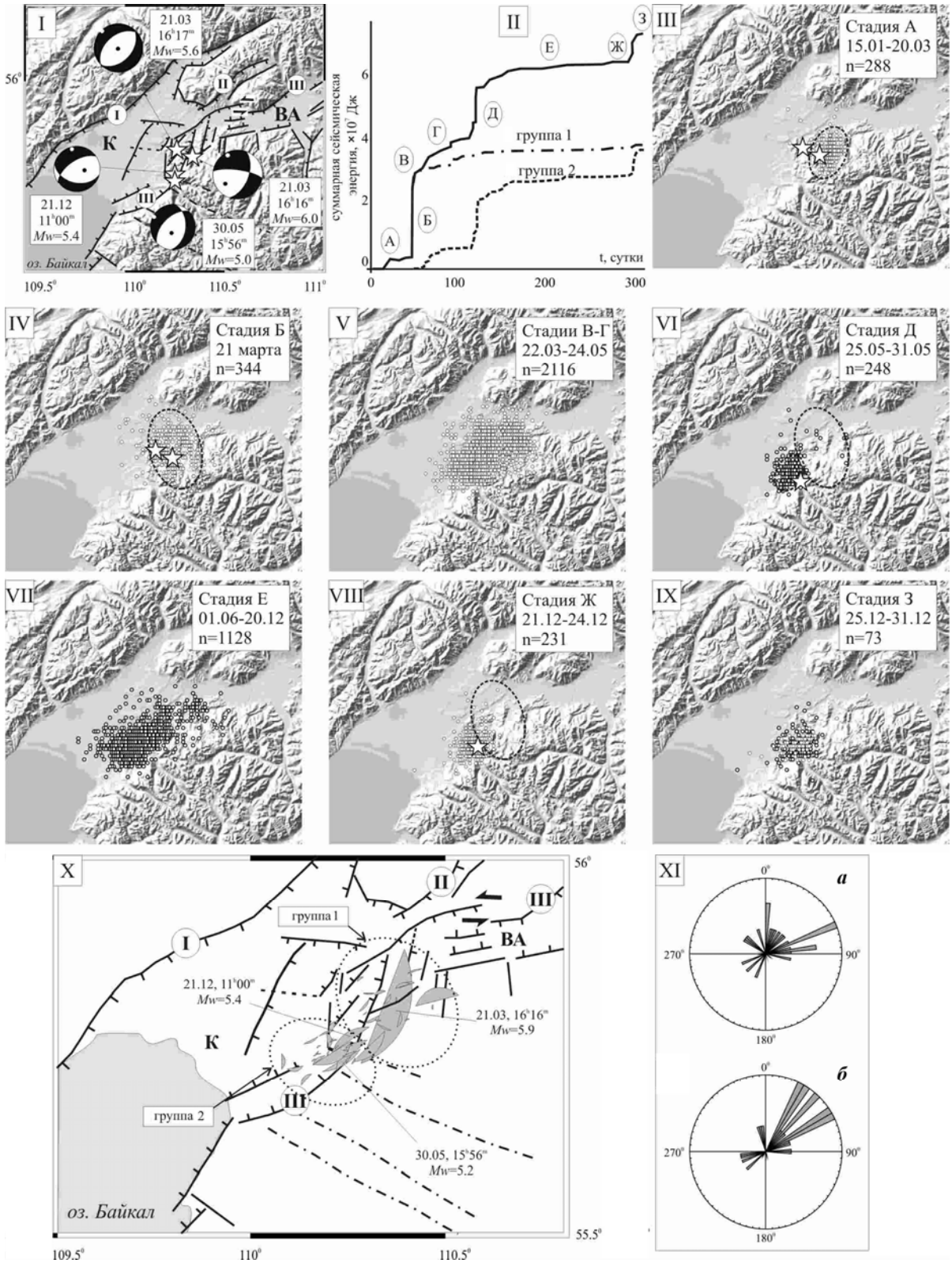

Рис. 2. Неотектонические условия, пространственно-временное развитие и характеристики разрывов в очагах землетрясений Кичерской сейсмической последовательности 1999 г.

I. Схема разломов. Сплошные линии – установленные разломы, пунктирные – предполагаемые, штрих-пунктирные – прослеженные по линеаментам. Цифры в кружках – разломы Кичерский (I), Дзелиндинский (II), Верхнеангарский (III). К – Кичерская впадина, ВА – Верхнеангарская. Берг-штрихи направлены в сторону опущенного крыла разлома. Комментарии к стереограммам см. в тексте (с. 53)

приведены стереограммы фокальных механизмов (условные знаки те же, что на рис. 1, I; см. с. 53).

Район перемычки характеризуется сложным блоковым строением, в котором принимают участие разломы трех главных направлений – северо-восточного, субмеридионального и субширотного (см. рис. 2, I). Эти разломы морфологически выражены в рельефе уступами, что говорит о большой вертикальной (сбросовой) составляющей движений. Разломы северо-восточного простирания, падающие на северо-запад и юго-восток, образуют здесь нехарактерную для района правостороннюю кулису. В зоне этих разломов часть смещений происходит по плоскостям близмеридионального простирания. По данным А.В. Чипизубова [2007], широтные разломы в районе перемычки имеют ярко выраженную левостороннюю компоненту смещений в голоцене (Чалаутская сейсмодислокация). Помимо этого, наблюдаются линеаменты северо-западного простирания, которые не проявляются в разломной структуре, однако трассируются в рельефе долинами и выражены в магнитном поле, на что указывалось ранее в работе [*Мельникова и др*., 2007].

В результате совместного анализа графика Беньоффа (рис. 2, II) и данных о пространственной локализации событий ход сейсмического процесса при Кичерской последовательности землетрясений был разделен на 8 стадий (рис. 2, III–IX). С 15.01 по 20.03 (стадия А) формируется поле форшоков, эпицентральная область расположена к западу от будущих сильных событий 21.03 (см. рис. 2, III, сильные события показаны звездочками) и имеет форму эллипса близмеридиональной ориентации. Основная стадия процесса (стадия Б) приходится на 21.03 и начинается сразу с двух сильнейших (Mw=5.9) событий в 16^h16^m и 16^h17^m; эпицентральное поле афтершоков ориентировано в направлении север–северо-запад (см. рис. 2, IV). На следующей стадии (стадия В, 22.03–24.03) эпицентральная область вытягивается в северо-восточном направлении (см. рис. 2,V). Затем с 25.03 по 24.05 (стадия Г) поле эпицентров разрастается в юго-западном направлении к акватории оз. Байкал (см. рис. 2, V).

Третье из сильнейших событий последовательности (30.05.1999 г., 15^h56^m, Mw=5.2) произошло на пятой стадии развития процесса (стадия Д, 25.05–31.05). Эпицентральное поле компактно и практически не пересекается с областью афтершоков 21.03, которая показана пунктиром на рис. 2, VI. В период 01.06–20.12 (стадия Е) продолжается распространение эпицентрального поля к юго-западу (см. рис. 2, VII). На следующей стадии (стадия Ж, 21.12–24.12) произошел четвертый сильнейший толчок последовательности (21.12, 11^h00^m, Mw=5.4), локализованный в эпицентральной области предыдущего сильного события 30.05 в 15^h56^m (см. рис. 2, VIII). С 25.12 (стадия З) начинается затухание сейсмической активности, эпицентральное поле вытягивается в юго-западном направлении. В области событий 21.03.1999 г. – затишье (см. рис. 2, IX).

←

II. График Беньоффа. Сплошная линия – период 15.01.1999 г.–31.12.1999 г.; А–З – выделенные стадии развития сейсмического процесса; штрих-пунктир – график для первой группы событий, пунктир – для второй (пояснения в тексте)

III–IX. Развитие сейсмического процесса во времени (эпицентры с K≥7 по [*Леонтьева, Гилева*, 2005]), звездочки – сильнейшие события последовательности (см. пояснения в тексте)

X. Проекции наиболее вероятных плоскостей разрывов (серая заливка) в очагах (в проекции верхней полусферы). Для сильнейших событий даны даты, время в очаге и моментные магнитуды. Размеры проекций соответствуют длине очагов землетрясений, установленной по корреляционной зависимости Ю.В. Ризниченко [1985]. Окружности – положение первой (северо-восточной) и второй (юго-западной) групп событий (см. пояснения в тексте)

XI. Розы-диаграммы направлений вспарывания разрывов в очагах первой (*а*) и второй (*б*) групп событий, полученные по методу Солоненко [*Солоненко, Солоненко*, 1987]

В результате проведенного анализа землетрясения Кичерской последовательности были разбиты на две группы. В первую группу вошли события, локализованные в северо-восточной части эпицентральной зоны и связанные с сильными землетрясениями 21.03.1999 г. (около 2500 толчков с $K \geq 7$), во вторую – события, эпицентры которых попадают в юго-западную часть общего эпицентрального поля (около 2000 событий с $K \geq 7$). Обе группы событий локализованы в зоне Верхнеангарского разлома: первая группа – в районе межвпадинной перемычки, разделяющей Кичерскую и Верхнеангарскую депрессии, вторая – на юго-западном отрезке сегмента Верхнеангарского разлома северо-восточной ориентации (рис. 2, X). Судя по их положению и последовательности проявления (рис. 2, II), первая группа характеризует процесс “взламывания” перемычки, в то время как вторая – процесс смещений по уже существующему разлому, спровоцированный активизацией в районе перемычки.

С.С. Арефьевым был предложен критерий разделения роев землетрясений и афтершоковых (форшоковых) последовательностей на основе разностей магнитуд главного толчка и его сильнейшего афтершока [*Арефьев*, 2003]. Для первой группы землетрясений разность магнитуд основных толчков (21.03.1999 г., 16^h16^m и 16^h17^m) и их сильнейшего афтершока (21.03.1999 г., 21^h14^m) составляет 0.8 (см. таблицу), в то время как предельное значение разности магнитуд по [*Арефьев*, 2003] равно 0.4. Для второй группы разность магнитуд для главного события (30.05.1999 г., 15^h56^m) и сильнейшего афтершока (21.12.1999 г., 11^h00^m) равна 0.3 (см. таблицу).

А.В. Солоненко предложил критерий разделения роев землетрясений и афтершоковых последовательностей на основе параметра k – отношения суммарной энергии всех последующих толчков ($\sum E_a$) к энергии главного толчка (E_1). Для роевых событий k варьирует в пределах от 5 до 50%, для афтершоковых последовательностей – от 0.1 до 10%. При этом k=10% отмечается для сейсмических последовательностей с двумя главными толчками [*Солоненко*, *Солоненко*, 1987]. В нашем случае для первой группы событий k равно 5.87%, для второй – 63.6%.

Таким образом, по характеру выделения сейсмической энергии во времени (график Беньоффа, рис. 2, II), соотношению энергии главного толчка и энергии всех афтершоков [*Солоненко*, *Солоненко*, 1987] и по критерию разности магнитуд [*Арефьев*, 2003] события первой группы могут быть отнесены к форшоково-афтершоковой последовательности, а события второй группы – к рою землетрясений.

Наиболее вероятные плоскости разрывов в очагах землетрясений рассматриваемой последовательности установлены для 16 событий с использованием метода азимутальных годографов и для 50 событий с применением метода катакластического анализа. Для четырех землетрясений решения, полученные этими методами, не совпадают, что может объясняться недостатком исходных данных при построении азимутальных годографов. В дальнейшем нами рассматриваются плоскости разрывов, полученные методом катакластического анализа.

Для событий первой группы в очагах 21 землетрясения получены наиболее вероятные плоскости разрывов. Большинство плоскостей (11 событий) ориентированы субширотно, для 6 событий простирание плоскостей северо-восточное, для 4 – субмеридиональное (см. рис. 2, X). Для основного события (21.03, 16^h16^m) в качестве рабочей определена субмеридиональная плоскость, падающая в запад–северо-западном направлении (см. рис. 2, X). Полученное решение согласуется с близмеридиональной ориентацией поля форшоков (см. рис. 2, III) и поля афтершоков в первые часы после сильных землетрясений (см. рис. 2, IX), что отражает активизацию движений по субмеридиональным разломам межвпадинной перемычки. Для землетрясений второй группы определены рабочие плоскости для 29 толчков, в основном, это плоскости северо-восточной (12 событий) и восточно–северо-восточной ориентации (13 событий) (см. рис. 2, X).

Для главного события группы (30.05, 15^h56^m) и его сильнейшего афтершока (21.12, 11^h00^m) в качестве рабочих рассматриваются падающие на юго-восток плоскости северо-восточного простирания (рис. 2, X).

С использованием метода Солоненко получены направления и скорости вспарывания разрывов в очагах 52 землетрясений, для большинства из которых (37 событий) разрывы распространяются в сторону межвпадинной перемычки (рис. 2, XI *а*,*б*). Скорости распространения разрывов, полученные разными методами [*Солоненко*, *Солоненко*, 1987; *Горбунова*, *Кальметьева*, 1988], достаточно хорошо согласуются между собой и в среднем составляют 0.9–1.0·V_S (V_S – скорость поперечных волн). При этом отмечается некоторое отличие скоростей вспарывания для землетрясений первой группы (форшоково–афтершоковая последовательность, 0.9·V_S) от скоростей для второй (рой землетрясений, 1.0·V_S).

Подобные результаты представлены в работе [*Солоненко*, *Солоненко*, 1987]. По мнению ее авторов, более низкие скорости вспарывания в очагах афтершоковых последовательностей могут быть объяснены либо бóльшими эффективными и сброшенными напряжениями в очагах, либо их бóльшими геометрическими размерами по сравнению с роями землетрясений, либо комбинацией этих факторов. Для рассматриваемых событий подобное различие в скоростях вспарывания может также объясняться преобладающим процессом в очаге: для первой группы (форшоково–афтершоковая последовательность) это “взламывание” перемычки, а для второй (рой землетрясений) – движение по готовому разлому.

В результате проведенного исследования для 76 землетрясений Байкальской рифтовой системы определены истинные плоскости разрывов в очагах, для 68 событий получены значения скоростей и направлений вспарывания. Анализ полученных данных, геологической структуры, эпицентрального поля и результатов предшествующих исследований позволяют предложить, как развивался сейсмический процесс в ходе рассматриваемых последовательностей.

Выводы

Исходя из представлений о приуроченности сильных землетрясений к зонам высокоградиентных напряжений [*Ребецкий*, 2007] и основываясь на результатах ретроспективного анализа данных о направлениях распространения разрывов в очагах землетрясений [*Добрынина*, *Саньков*, 2008], мы полагаем, что установленная однонаправленность вспарывания разрывов в очагах Южно-Байкальской последовательности землетрясений 1999 г. служит косвенным показателем изменения (роста) уровня напряжений в земной коре Южно-Байкальской впадины по направлению к ее юго-западному замыканию (к перемычке между Байкальской и Тункинской системами впадин). Комплекс имеющихся данных позволяет предположить наличие в этом районе зоны подготовки сильного землетрясения [*Саньков и др.*, 2004]. Аналогично, в районе Кичеро-Верхнеангарской межвпадинной перемычки зона градиентов напряжений располагается на юге Верхнеангарской впадины. Механизм взламывания перемычки представляется как последовательное образование разломов разного простирания – субмеридионального (правый сбросо-сдвиг) и северо-восточного (сброс). Этот процесс вызвал активизацию движений по юго-западному сегменту зоны Верхнеангарского разлома, имеющего северо-восточное простирание (сброс). Скорости вспарывания в очаге зависят от тектонического строения в районе рассматриваемых последовательностей, а также от преобладающего процесса в источнике.

Благодарности

В работе использовались каталоги и бюллетени землетрясений Байкальской рифтовой системы, составленные в Байкальском филиале Геофизической службы СО РАН.

Работа выполняется при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 08-05-00992), ИП СО РАН № 61 и проекта программы Президиума РАН № 16.8.

Литература

Арефьев С.С. Эпицентральные сейсмологические исследовании. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2003. 375 с.

Беньофф Г. Накопление и высвобождение деформаций по наблюдениям сильных землетрясений / Слабые землетрясения. М.: ИЛ, 1961. С.199–211.

Геология и сейсмичность зоны БАМ. Сейсмогеология и сейсмическое районирование / Солоненко В.П., Николаев В.В., Семенов Р.М. и др. Новосибирск: Наука, 1985. 190 с.

Горбунова И.В., Кальметьева З.А. Экспериментальные характеристики излучения очагов слабых землетрясений. Фрунзе: Илим, 1988. 129 с.

Добрынина А.А., Саньков В.А. Направления вспарывания в очагах землетрясений как показатель распространения деструктивного процесса (на примере Байкальской рифтовой системы) // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту): Материалы совещания. Вып. 6. / Под. ред. Е.В. Склярова. Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2008. Т. 1. С.110–112.

Леонтьева Л.Р., Гилева Н.А. Прибайкалье и Забайкалье. (VI. Каталоги землетрясений по регионам и территориям) // Землетрясения Евразии в 1999 г. / Под. ред. О.Е. Старовойта. Обнинск: ФОП, 2005. (на CD:\Appendix\T13_Baykal_99.xls)

Лухнев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Леви К.Г., Башкуев Ю.Б., Дембелов М.Г., Залуцкий В.Т., Кале Э., Девершер Ж., Верноль М., Бехтур Б., Амаржаргал Ш. Новые данные о современных тектонических деформациях южного горного обрамления Сибирской платформы // Докл. РАН. 2003. Т. 389, № 1. С.100–103.

Мельникова В.И., Радзиминович Н.А., Гилева Н.А., Чипизубов А.В., Добрынина А.А. Активизация рифтовых процессов в Северном Прибайкалье (на примере Кичерской последовательности землетрясений 1999 г.) // Физика Земли. 2007. № 11. С.3–20.

Радзиминович Н.А., Мельникова В.И., Саньков В.А., Леви К.Г. Сейсмичность и сейсмотектонические деформации земной коры Южно-Байкальской впадины // Физика Земли. 2006. № 11. С.44–62.

Раутиан Т.Г. Затухание сейсмических волн и энергия землетрясений // Тр. ТИСС АН ТаджССР. 1960. № 7. С.41–96.

Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: ИКЦ “Академкнига”, 2007. 406 с.

Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985. 408 с.

Саньков В.А., Чипизубов А.В., Лухнев А.В., Смекалин О.П., Мирошниченко А.И., Кале Э., Девершер Ж. Подход к оценке опасности сильного землетрясения в зоне Главного Саянского разлома по данным GPS-геодезии и палеосейсмологии // Геология и геофизика. 2004. № 11. С.1369–1376.

Сейсмологический бюллетень (ежедекадный) за 1999 год / Отв. ред. О.Е. Старовойт. Обнинск: ЦОМЭ ГС РАН, 1999–2000.

Солоненко Н.В., Солоненко А.В. Афтершоковые последовательности и рои землетрясений в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Наука, 1987. 95 с.

Чипизубов А.В. Оптимальная оценка сейсмической опасности Прибайкалья: Дис. … д-ра геол.-мин. наук. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2007. 417 с.

Шамина О.Г. Модельные исследования физики очага землетрясений. М.: Наука, 1981. 192 с.

Bulletin of the International Seismological Centre for 1999. Berkshire: ISC, 2001.

Radziminovitch N., *Deverchere J.*, *Melnikova V.*, *San`kov V.*, *Giljova N.* The 1999 *Mw* 6.0 earthquake sequence in the Southern Baikal rift, Asia, and its seismotectonic implications // Geophys. J. Int. 2005. V. 161. P.387–400, doi: 10.1111/j.1365-246X.2005.02604.x

Сведения об авторах

ДОБРЫНИНА Анна Александровна – младший научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН. 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128. Тел.: 8-(9501)-20-02-70. E-mail: dobrynina@crust.irk.ru

САНЬКОВ Владимир Анатольевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт земной коры СО РАН. 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128. Тел.: 8-(3952)-42-79-03. E-mail: sankov@crust.irk.ru

VELOCITY AND DIRECTION OF RUPTURE PROPAGATION IN SOURCES OF BAIKAL RIFT SYSTEM'S EARTHQUAKES

A.A. Dobrynina, V.A. Sankov

Institute of the Earth's crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. Rupture parameters in foci of Baikal rift system's earthquakes have been studied using group method, azimuthal hodograph method and cataclastic analysis method. The data on velocity and direction of rupture propagations, and orientation of fault slip planes for Southern Baikal and Kichera earthquake sequences of 1999 were defined. The scenarios of destruction process for areas of inter-basin spurs and intra-basin structures were obtained.

Keywords: Baikal rift system, aftershock sequences, swarm, rupture velocity and propagation.