———— ГЕОФИЗИКА ——

УДК 550.34+551.243

СОВРЕМЕННОЕ РАЗЛОМООБРАЗОВАНИЕ В ЗЕМНОЙ КОРЕ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ ПО ДАННЫМ О МЕХАНИЗМАХ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2015 г. В.А. Саньков, А.А. Добрынина

Представлено академиком РАН Г.С. Голицыным 14.11.2014 г. Поступило 29.10.2014 г.

С применением метода катакластического анализа трещин (MKAT) [1] определены пространственные характеристики сейсмотектонических деформаций и наиболее вероятные плоскости разрывов в очагах землетрясений Байкальской рифтовой системы (БРС). Условия растяжения с простиранием современных разрывов параллельно рифтоконтролирующим разломам преобладают в пределах центрального звена и на большей части северо-восточного фланга БРС. Пологие средние углы падения разрывов в очагах землетрясений в зонах главных разломов для отдельных рифтовых впадин позволяют предположить выполаживание разломов в средней части земной коры. Антитетические разломы имеют более крутое падение. На флангах БРС преобладают условия деформации сдвига, а разрывы в очагах землетрясений более разнообразны по морфологогенетическим типам — наряду со сбросами наблюдаются сдвиги и взбросы. Вместе с тем на флангах рифтовой системы меньше проявлена унаследованность неотектонической структуры современными разрывами.

DOI: 10.7868/S0869565215330233

Отражением процесса современного разломообразования в земной коре является сейсмичность, которая дает информацию о структуре и динамике формирования зон крупных разломов в реальном времени. Для его изучения активно используется как эпицентральное поле землетрясений, так и данные о положении их гипоцентров. С целью определения ориентации современных разрывов различных порядков можно также использовать данные о механизмах очагов землетрясений, предварительно выделив истинные плоскости разрывов в очаге. В сейсмологии очаг землетрясения интерпретируется чаще всего с помощью модели двойного диполя (две пары сил сжатия и растяжения в источнике), при этом графически механизм очага представляет собой две перпендикулярные нодальные плоскости, разделяющие области волн сжатия и растяжения. Одна из них является проекцией истинной плоскости разлома, по которой произошла подвижка, вторая плоскость является вспомогательной. Обе плоскости равнозначны, и без дополнительных данных выделить плоскость разрыва невозможно. В случае сильных землетрясений косвенными признаками, помогающими выбрать ту или иную

Институт земной коры Сибирского отделения Российской Академии наук, Иркутск E-mail: sankov@crust.irk.ru

Иркутский государственный университет

плоскость в качестве истинной плоскости разрыва, могут служить геологическая информация (выход разрыва на поверхность, наличие разломов с аналогичной геометрией и пр.), данные об ориентации поля афтершоков, форма первых изосейст и т.д. Эти подходы неприменимы при исследовании слабых землетрясений (магнитуда $M \le 4.0$), единственной доступной информацией о которых являются сейсмограммы. Естественно, что статистический анализ плоскостей разрывов без выделения плоскости "истинного" разрыва не имеет практического смысла.

В настоящей работе для определения наиболее вероятных плоскостей разрывов в очагах землетрясений использовался МКАТ [1]. Предложенный в МКАТ 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 [1]. В работе [2] приводится сопоставление решений реализованных плоскостей разрывов в очагах землетрясений Южно-Байкальской и Кичерской сейсмических последовательностей 1999 г., полученных методом азимутальных годографов [3] и МКАТ. Согласие определений, полученное в большинстве случаев (~80%), служит показателем надежности определений [2].

Основными задачами настоящей работы являются характеристика поля современных деформаций БРС и выделение активных разрывных

структур на основе сопоставления рабочих плоскостей разрывов в очагах землетрясений и разломной тектоники.

Байкальская рифтовая система является одним из классических примеров кайнозойских структур растяжения континентальной литосферы [4]. Согласно устоявшимся представлениям (см., например, [5]), это зарождающаяся межплитная граница, вкрест простирания которой происходит дивергенция Сибирского блока Евразии и Забайкальского блока Амурской плиты. Она заложена вдоль края Сибирской платформы, и важнейшим обстоятельством является S-образная в плане форма структуры в целом, что определяется, главным образом, простиранием древних структурных неоднородностей [4].

В качестве исходных данных использованы опубликованные решения механизмов очагов землетрясений за период с 1950 по 2008 г. Основная часть решений фокальных механизмов для землетрясений БРС получена по стандартной методике с использованием полярностей первых вступлений объемных Р-волн. Лучше всего определениями фокальных механизмов обеспечены vмеренные и сильные землетрясения – с 11-го энергетического класса. В настоящей работе использованы 718 решений механизмов очагов для отдельных землетрясений и 175 композитных (групповых) определений за 1950-2008 гг. [6-10], в том числе решения, полученные международными сейсмологическими агентствами (Межлународный сейсмологический центр, Гарвардский университет, Геологическая служба США) инверсионными методами. Для анализа были выбраны землетрясения с диапазоном магнитуд от 3.5 до 5.5, так как именно для такого разброса магнитуд имеется наибольшее число определений фокальных механизмов. При использовании композитных решений вся группа землетрясений принималась за одно событие с магнитудой 3.5. Тензоры напряжений и приращений сейсмотектонических деформаций рассчитывали для всей территории с шагом 0.15° × 0.15°, радиус области вокруг узла расчета брали равным 60 км. Результаты получены для 970 доменов. Из-за особенностей локализации эпицентрального поля на рассматриваемой территории (приуроченность землетрясений к рифтовым впадинам, междувпадинным перемычкам и, в меньшей степени, к горному обрамлению впадин) в распределении доменов имеются бреши. Также наблюдается и обратное явление – распространение результатов расчетов на территории, не обеспеченные исходными данными, что объясняется шагом сетки (0.15°) и достаточно большим радиусом осреднения – 60 км.

В результате первого этапа реконструкции получены данные о типе напряженного состояния и ориентации осей главных напряжений. Анализ типа напряженного состояния показывает, что на большей части территории рифтовой системы преобладает режим горизонтального растяжения: 91% (883 домена) (рис. 1). Режим горизонтального сдвига наблюдается в районе Бусийнгольской впадины. В области Восточного Саяна отмечается разнообразие типов напряженного состояния - от горизонтального растяжения до горизонтального сжатия (рис. 1), что объясняется изменением простирания рифтовых структур с меридионального (Бусийнгольская, Дархатская и Хубсугульская впадины) на широтное (система Тункинских впадин, Южно-Байкальская впадина) и, как следствие, большим разнообразием механизмов очагов в данной области. Режим горизонтального растяжения со слвигом наблюдается также на территории Кодарского и Удоканского поднятий (обрамление Чарской впадины), а также в пределах Олекмо-Чарского нагорья (рис. 1). Один домен с режимом вертикального сдвига отмечается для Кодарского поднятия (рис. 1). Интересно присутствие нескольких доменов с режимами горизонтального сдвига, локализованных в горном обрамлении Южно-Байкальской впадины. Они получены в результате формирования однородных выборок землетрясений со значительной сдвиговой компонентой в источнике, приуроченных в основном к окраинам Южно-Байкальской впадины. В центральной части впадины их влияние на результирующий геодинамический тип напряженного состояния незначительно вследствие большого количества типичных "рифтовых" событий.

Полученные результаты определений ориентации осей сжатия и растяжения (укорочения и удлинения) не противоречат результатам обобщения данных о фокальных механизмах [10, 11] и данным расчетов сейсмотектонических деформаций разными методами [12, 13] (рис. 2). Ось максимального сжатия залегает субвертикально практически на всей территории БРС (рис. 2а). Лишь на юго-западном фланге она имеет пологие углы наклона и простирается в направлении ЮЗ-СВ. Ось минимального сжатия (растяжения) практически повсеместно залегает субгоризонтально, в центральной части БРС и на части ее северо-восточного фланга располагается поперек рифтовых структур (рис. 2б). На территории юго-западного фланга и в восточной части северо-восточного фланга БРС она направлена косо по отношению к генеральному простиранию этих отрезков рифтовой зоны (рис. 2б). В свою очередь, промежуточная ось главных нормальных напряжений также имеет по большей части пологий угол наклона к горизонту, который увеличивается в районе Бусийнгольской впадины (юго-западный фланг БРС) и в районе р. Олекма, за пределами рифтовых структур северовосточного фланга БРС (рис. 2в). Направление оси растяжения ЮЗ-СВ достаточно стабильно на территории рифтовой зоны. Существенные вариации в



Рис. 1. Тип современного напряженного состояния земной коры БРС по результатам МКАТ. На врезке слева – эпицентры землетрясений, использованных при расчетах. На врезке справа – диаграмма типов напряженного состояния по [1] (*1* – горизонтальное растяжение, *2* – горизонтальное растяжение со сдвигом, *3* – горизонтальный сдвиг, *4* – горизонтальное сжатие со сдвигом, *5* – горизонтальное сжатие, *6* – вертикальный сдвиг) и гистограмма распределения доменов с различным напряженным состоянием. Здесь и на рис. 2, 3 буквами обозначены рифтовые впадины: Ч – Чарская, М – Муйская, Мк – Муяканская, ВМ – Верхнемуйская, ВА – Верхнеангарская, К – Кучерская, ЦБ – Ципа-Баунтовская, Б – Баргузинская, СБ – Северо-Байкальская, ЮБ – Южно-Байкальская, Т – Тункинская, X – Хубсугульская, Д – Дархатский, 3 – Хубсугульский, 4 – Байкало-Мондинский, 5 – Яматинский, 6 – Окино-Жомболокский, 7 – Тункинский, 8 – Главный Саянский, 9 – Обручевский, 10 – Приморский, 11 – Морской, 12 – Северо-Байкальский, 16 – Верхнеангарский, 17 – Муяканский, 18 – Верхнемий, 21 – Кодарский, 22 – Ханийский.

простирании промежуточной оси главных нормальных напряжений наблюдаются в пределах юго-западного фланга БРС.

Для 500 землетрясений (в том числе 131 группы событий с композитными решениями) определены наиболее вероятные плоскости разрывов в источнике (рис. 3). Ориентация современных разрывов в большинстве случаев, иногда до деталей, наследует существующие неотектонические структуры. Это следует из анализа диаграмм простираний разрывов для отдельных участков рифтовой системы и сопоставления их с направлениями закартированных геологических разломов (рис. 3). В южной части Байкальской впадины (до дельты р. Селенга на севере) превалируют два направления разрывов - субширотное и северо-восточное. Именно такие простирания активных разломов наблюдаются в бортах впадины и выявлены по данным сейсмопрофилирования. Минимальные вариации простирания разрывов характерны для центральной части Байкальской впадины, где современное растяжение строго перпендикулярно неотектонической структуре [14]. Характерный наклон поверхностей разрывов для южной и центральной частей Байкальской впадины составляет 45°-60°. При этом падающие к северу второстепенные разрывы имеют более крутое падение.

В Северо-Байкальской впадине отмечаются крутые плоскости в очагах землетрясений. Повидимому, в условиях преобладания вертикальных движений блоков по поверхностям крутопадающих разломов создаются предпосылки для реализации как сбросовых, так и взбросовых движений, что и наблюдается по данным о механизмах очагов землетрясений [15]. На северо-восточном фланге БРС наиболее сложное строение в поле сейсмогенных разрывов имеют области междувпадинных перемычек, а во впадинах разрывы в очагах параллельны известным разломам неотектонической активизации. Несколько другая ситуация наблюдается в юго-западной части БРС и на окончании ее северо-восточного фланга. В райо-



Рис. 2. Ориентация главных нормальных осей напряжений максимального сжатия (а), минимального сжатия (б) и промежуточных осей (в) для территории БРС по результатам МКАТ. Длина стрелки зависит от угла наклона оси к горизонту. Точками показаны вертикально расположенные оси напряжений.



Рис. 3. Диаграммы ориентации (верхняя часть) и углов наклона (нижняя часть, падение в северных румбах – слева, в южных – справа) реализованных разрывов в очагах землетрясений БРС. Выделены эллипсами и обозначены цифрами районы, для которых строились диаграммы.

не Бусийнгольской впадины проявлены нехарактерные для неотектонической структуры этой части рифтовой системы современные разрывы северо-западного простирания.

Самые разнообразные направления разрывов проявились в пределах Окинского плоскогорья, Тункинской впадины и северного Прихубсугулья. Вместе с тем в пределах субширотной Тункинской ветви юго-западной части БРС простирание разрывов и закономерности кинематики смещений по ним соответствуют известным закономерностям пространственного распределения разрывных структур и их морфогенетических типов в зоне левостороннего сдвига. На северо-восточном окончании БРС, в районе Чарской впадины и долины р. Олекма, преобладают северо-восточные и субмеридиональные неотектонические разломы, однако в современном поле напряжений на уровне очагового слоя активизируются, главным образом, субширотные разрывы. Отклонения простираний современных разрывов в очагах землетрясений от закартированной на поверхности неотектонической структуры на флангах БРС могут свидетельствовать об изменении во времени поля тектонических напряжений и наложенности современной структуры по отношению к позднекайнозойской.

Таким образом, применение МКАТ [1] позволило определить пространственные характеристики сейсмотектонических деформаций и наиболее вероятные плоскости разрывов в очагах землетрясений для БРС в целом и ее отдельных структур. В пределах центрального звена и на большей части северо-восточного фланга БРС преобладают условия растяжения с простиранием современных разрывов параллельно главным разломам. Средние углы падения разрывов в очагах землетрясений в зонах этих разломов для отдельных рифтовых впадин составляют 45°-60°, что позволяет предположить выполаживание разломов в средней части земной коры. Антитетические разломы имеют более крутое падение. На дистальных окончаниях флангов БРС преобладают деформации сдвига, а разрывы в очагах землетрясений более разнообразны по морфологогенетическим типам - наблюдаются сдвиги и взбросы наряду со сбросами. Вместе с тем на флангах рифтовой системы существенно меньше проявлена унаследованность современными разрывами неотектонической структуры. Полученные данные об отклонениях простираний современных разрывов в очагах землетрясений от закартированной на поверхности неотектонической структуры могут свидетельствовать об изменении во времени поля тектонических напряжений и частичной наложенности современной структуры по отношению к позднекайнозойской.

Работа выполняется при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 13–05–01097) и Программы ОНЗ РАН № 7.7, проекта № 3.1 интеграционной Программы ИНЦ и гранта Президента РФ (проект № МК-1171.2014.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ребецкий Ю.Л. Тектонические напряжения и прочность природных горных массивов. М.: Академкнига, 2007. 406 с.
- 2. Добрынина А.А., Саньков В.А. // Геофиз. исслед. 2010. Т. 11. № 2. С. 52-61.
- 3. Горбунова И.В., Кальметьева З.А. Экспериментальные характеристики излучения очагов слабых землетрясений. Фрунзе: Илим, 1988. 129 с.
- 4. Логачев Н.А. // ДАН. 2001. Т. 376. № 4. С. 510-513.
- 5. Шерман С.И., Леви К.Г. // ДАН. 1977. Т. 233. № 2. С. 454—464.
- Солоненко А.В., Солоненко Н.В., Мельникова В.И. и др. Напряжения и подвижки в очагах землетрясений Сибири и Монголии. Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 1993. В. 1. С. 113–122.

- 7. Мельникова В.И., Радзиминович Н.А. // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 11. С. 1598–1607.
- 8. Мельникова В.И., Радзиминович Н.А., Гилева Н.А. и др. // Физика Земли. 2007. № 11. С. 1–24.
- 9. Мельникова В.И., Гилева Н.А., Арефьев С.С. и др. // Физика Земли. 2013. № 4. С. 1–15.
- Petit C., Deverchere J., Houdry F., et al. // Tectonics. 1996. V. 15. P. 1171–1191.
- 11. Солоненко А.В. // ДАН. 1993. Т. 328. № 6. С. 674– 677.
- Солоненко А.В., Солоненко Н.В., Мельникова В.И. и др. Поля напряжений и сейсмотектонических деформаций Байкальской рифтовой зоны // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 1996. В. 2. С. 363– 371.
- 13. Мельникова В.И., Радзиминович Н.А. // ДАН. 2007. 416. С. 543–545.
- 14. Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И. и др. // ДАН. 2009. Т. 424. № 5. С. 664–668.
- Добрынина А.А. В сб.: Строение литосферы и геодинамика. Материалы XXI Всерос. молодежной конференции. Иркутск, 2005. С. 245–246.