

ИЕРАРХИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ БАЙКАЛЬСКОЙ РИФТОВОЙ СИСТЕМЫ

А.В. Ключевский, В.М. Демьянович, В.И. Джурик

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

Исследование пространственно-временной структуры напряженного состояния литосферы Байкальской рифтовой системы на уровне иерархии сильных землетрясений проведено по данным о фокальных механизмах 265 землетрясений с $K_p \geq 10$ зарегистрированных в регионе с 1950 по 1998 г., и по данным о сейсмических моментах 802 толчков с $K_p \geq 11$, происшедших с 1968 по 1994 г. Подтверждено, что в литосфере региона доминирует режим рифтогенеза с формированием толчков-сбросов, на фоне которого локальные области повышенной частоты реализации сдвигов и взбросов отражают неоднородность напряженного состояния среды. Анализ динамики напряжений в литосфере региона подтверждает доминирующую роль рифтогенеза в сеймотектонических процессах, однако, эта доминанта неустойчива и в конце 1980-х—начале 1990-х годов наблюдается ситуация примерного равенства и даже преобладания сдвигов и взбросов. Результаты анализа напряженного состояния литосферы по данным о сейсмических моментах землетрясений верифицированы по показателям классического метода фокальных механизмов. Регионализация по типу подвижки в очаге дает возможность более надежно и обоснованно подойти к решению проблемы обеспечения сейсмической безопасности в регионе.

Сильные землетрясения, динамические параметры очагов землетрясений, фокальные механизмы, напряженное состояние литосферы, Байкальская рифтовая система.

HIERARCHY OF EARTHQUAKES IN THE BAIKAL RIFT SYSTEM: IMPLICATIONS FOR LITHOSPHERIC STRESS

A.V. Klyuchevskii, V.M. Dem'yanovich, and V.I. Dzhurik

We investigated space-time lithospheric stress patterns of the Baikal rift system according to the hierarchy of earthquakes using mechanisms of 265 $K_p \geq 10$ events recorded from 1950 to 1998 and seismic moments of 802 $K_p \geq 10$ events from 1968 to 1994. The lithosphere of the region was confirmed to undergo rifting with mostly normal-slip events, while local areas of frequent strike-slip and reverse motions may record stress heterogeneity. The dominance of rifting, although being evident in the stress dynamics, is unstable, which is indicated by increase in strike-slip and reverse motions to as many as normal slip events in the latest 1980s—earliest 1990s. The lithospheric stress patterns inferred from seismic-moment data are generally consistent with those derived from the classical focal mechanism method. The suggested approach of seismic zoning according to earthquake slip geometry may provide a more reliable background for successful mitigation of seismic hazard in the region.

Medium-size and large earthquakes, source parameters, slip geometry, earthquake mechanism, lithospheric stress, Baikal rift system

ВВЕДЕНИЕ

Проведенные сейсмические, сейсмологические и региональные комплексные исследования показали, что структурные геологические формы и геодинамические процессы, в том числе и современные движения литосферы, вызваны эндогенными преобразованиями в глубинных сферах Земли [Современная динамика..., 1995; International..., 2002]. Изучение особенностей строения и свойств литосферы геофизическими методами позволяет выявить общие черты пространственного расположения геологических структур и закономерности динамического взаимодействия литосферных плит и блоков, в результате которого происходят землетрясения. Поскольку пространственное расположение сейсмоопасных зон и время их активизации обусловлено, прежде всего, напряженно-деформированным состоянием (НДС) литосферы и региональной геодинамикой, то при выяснении закономерностей и эволюции сейсмичности в каком-либо сейсмоактивном регионе понимание его глубинной геолого-геофизической структуры и современной геодинамической ситуации имеет важнейшее значение. Понимание структуры и динамики НДС литосферы на уровне иерархии сильных землетрясений особенно актуально в свете современных тенденций прогноза мощных землетрясений, основанного на знании свойств и особенностей изучаемой геодинамической системы и начинающегося со сбора информации о состоянии системы, ее связях и логике функционирования.

В настоящее время при исследовании НДС литосферы Байкальской рифтовой системы (БРС) по сейсмологическим данным используются фокальные параметры достаточно сильных землетрясений с энергетическим классом $K_p \geq 10$ [Мишарина, 1972; Голенецкий, Дреннова, 1988—1991, 1997, 1999—2003; Солоненко, Мельникова, 1994; Solonenko et al., 1997; Мельникова, Радзиминович, 1998; Голенецкий, 1998] и динамические параметры очагов землетрясений с $K_p \geq 7$ [Ключевский, 2003, 2007; Ключевский, Демьянович, 2003, 2006]. Целью данной работы является исследование пространственно-временной структуры напряженного состояния литосферы БРС на уровне иерархии толчков с $K_p \geq 11$ и выделение территорий с повышенной частотой реализации различных типов подвижек в очагах сильных землетрясений. Поскольку в эпицентральной зоне при равных магнитудах уровень ускорений при толчках-взбросах в 2.5 раза выше, чем при сбросах [Аптикаев, 2005], то регионализация по типам подвижек в очагах сильных землетрясений позволит более надежно и обоснованно подойти к решению проблемы обеспечения сейсмической безопасности в Байкальском регионе.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Первичные фактические материалы для определения динамических параметров очагов землетрясений взяты из отчетов «Бюллетень землетрясений Прибайкалья», в которых представлены основные сведения о землетрясениях Байкальского региона ($\varphi = 48\text{—}60^\circ$ с.ш., $\lambda = 96\text{—}122^\circ$ в.д.). Отчеты подготовлены сотрудниками группы сводной обработки сейсмических наблюдений Байкальского филиала ГС СО РАН. По формуле модели очага Д. Бруна [Brune, 1970]

$$M_0 = 4\pi r V^3 \Phi_0 / \Psi_{\theta\varphi}$$

определены сейсмические моменты почти у 100 % землетрясений ($n = 2590$) с $10 \leq K_p \leq 14$, зарегистрированных в регионе с 1968 по 1994 г. Здесь M_0 — сейсмический момент (дин·см), $\rho = 2.7 \text{ г/см}^3$ — плотность среды, $V = 3.58 \text{ км/с}$ — скорость распространения объемных поперечных волн, r — гипоцентральное расстояние (км), $\Psi_{\theta\varphi} = 0.6$ — среднее значение функции направленности излучения из очага [Ризниченко, 1976], Φ_0 — уровень амплитудного спектра Фурье, определенный по методике, предложенной в [Ключевский, Демьянович, 2002; Klyuchevskii, 2004]. Использование M_0 для анализа напряженного состояния среды основано на том, что сейсмический момент тектонического землетрясения связан с подвижкой в очаге [Левшин, Грудева, 1974; Аптикаев, Копничев, 1979; Копничев, Шпилькер, 1980; Аптикаев, 2005], тип которой задается соотношением величин главных напряжений в литосфере [Zoback, 1992; Zoback, Zoback, 2002]. По данным о 143 землетрясениях с $K_p \geq 11$, происшедших в регионе с 1968 по 1994 г. и имеющих определение сейсмического момента и фокального механизма, выполнена «калибровка» уровня среднего по классу $\lg \bar{M}_0$ по типу подвижки в очаге (таблица). Затем исходная выборка из 802 землетрясений с $K_p \geq 11$ была разделена на толчки-сбросы, сдвиги и взбросы разных энергетических классов в соответствии с уровнями $\lg \bar{M}_0$ и дальнейшей формализацией в виде: отношение числа толчков-сбросов, сдвигов и взбросов к общему числу землетрясений в пространственно-временной выборке характеризует относительную частоту реализации P_N , P_S и P_R толчков соответствующего типа.

В основе используемой нами базы данных из 335 фокальных механизмов лежат очаговые параметры 197 сильных землетрясений с $K_p \geq 10$, опубликованные в монографии [Современная динамика..., 1995] и дополненные сведениями из работ [Солоненко, Мельникова, 1994; Мельникова, Радзиминович, 1998]. Для формирования представления о структуре базы данных фокальных механизмов проведена классификация толчков по типу подвижки в очаге. Все толчки разделены на три группы в соответствии с величиной угла и знаком подвижки по разлому: взброс ($45^\circ \leq \text{SLIP} \leq 135^\circ$, число толчков-взбросов по первой нодальной плоскости $n_1 = 64$, по второй — $n_2 = 61$); сдвиг ($-44^\circ \leq \text{SLIP} \leq 44^\circ$; $-180^\circ \leq \text{SLIP} \leq -136^\circ$; $136^\circ \leq \text{SLIP} \leq 180^\circ$, $n_1 = 73$, $n_2 = 85$) и сброс ($-135^\circ \leq \text{SLIP} \leq -45^\circ$, $n_1 = 198$, $n_2 = 189$). В этой классификации доминируют толчки-сбросы, что дает возможность охарактеризовать напряженное состояние среды как режим преобладающих горизонтальных «растяжений», генерирующих толчки-сбросы. Вместе с тем суммарное число сдвигов и взбросов, формирующихся в условиях горизонтального сжатия, составляет примерно 40 %, что свидетельствует о существенной роли горизонтальных сжимающих напряжений в

«Калиброванные» значения логарифма среднего сейсмического момента $\lg \bar{M}_0$ землетрясений с $K_p \geq 11$, соответствующие переходу от одного типа подвижки в очаге к другому

Класс	Сброс	Сдвиг	Взброс	Число «калиброванных» толчков			
	Логарифм среднего сейсмического момента $\lg \bar{M}_0$			Сброс	Сдвиг	Взброс	Всего
11	22.5	22.8	23.1	28	4	11	43
12	23.15	23.45	23.75	29	9	6	44
13	23.7	23.9	24.1	23	6	7	36
14	24.1	24.3	24.7	11	7	2	20

литосфере. При анализе напряженного состояния литосферы БРС по данным о фокальных механизмах использована выборка из 265 толчков (остальные землетрясения произошли за пределами региона) и формализация, аналогичная примененной при реконструкции напряжений в литосфере БРС по сейсмическим моментам толчков: отношение числа толчков-сбросов, сдвигов и взбросов к общему числу землетрясений в пространственно-временной выборке характеризует частоту реализации P_N , P_S и P_R .

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛИТОСФЕРЫ БРС

Пространственно-временную и энергетическую представительность исходных данных проанализируем по рис. 1, 2, на которых приведены карты эпицентров и изолиний плотности эпицентров землетрясений в площадках $1.0 \times 1.0^\circ$, а также гистограммы распределения во времени и по K_p 802 толчков с $11 \leq K_p \leq 14$, имеющих определение сейсмических моментов, и 265 толчков с $K_p \geq 10$, имеющих определение фокальных механизмов. Изолинии плотности эпицентров толчков $N \geq 2$ охватывают всю исследуемую территорию БРС (см. рис. 1). Среднее и минимальное число землетрясений в год составляет около 30 и 20 событий (см. рис. 1, врезка). Изолинии плотности эпицентров толчков $N \geq 2$ закрывают оз. Байкал и часть северо-востока БРС (см. рис. 2). На юго-западе региона и на северо-восточной оконечности БРС обеспеченность данными невысока, но менее всего обеспечены материалами о фокальных механизмах переходные области на флангах, граничащие с Алтае-Саянской областью, Монголией и Якутией. На гистограмме видно, что число определений фокальных механизмов возрастает в 1990-е годы за счет привлечения толчков с $K_p = 10$, однако и в эти годы оно не превышает 25 событий в год (см. рис. 2, врезка).

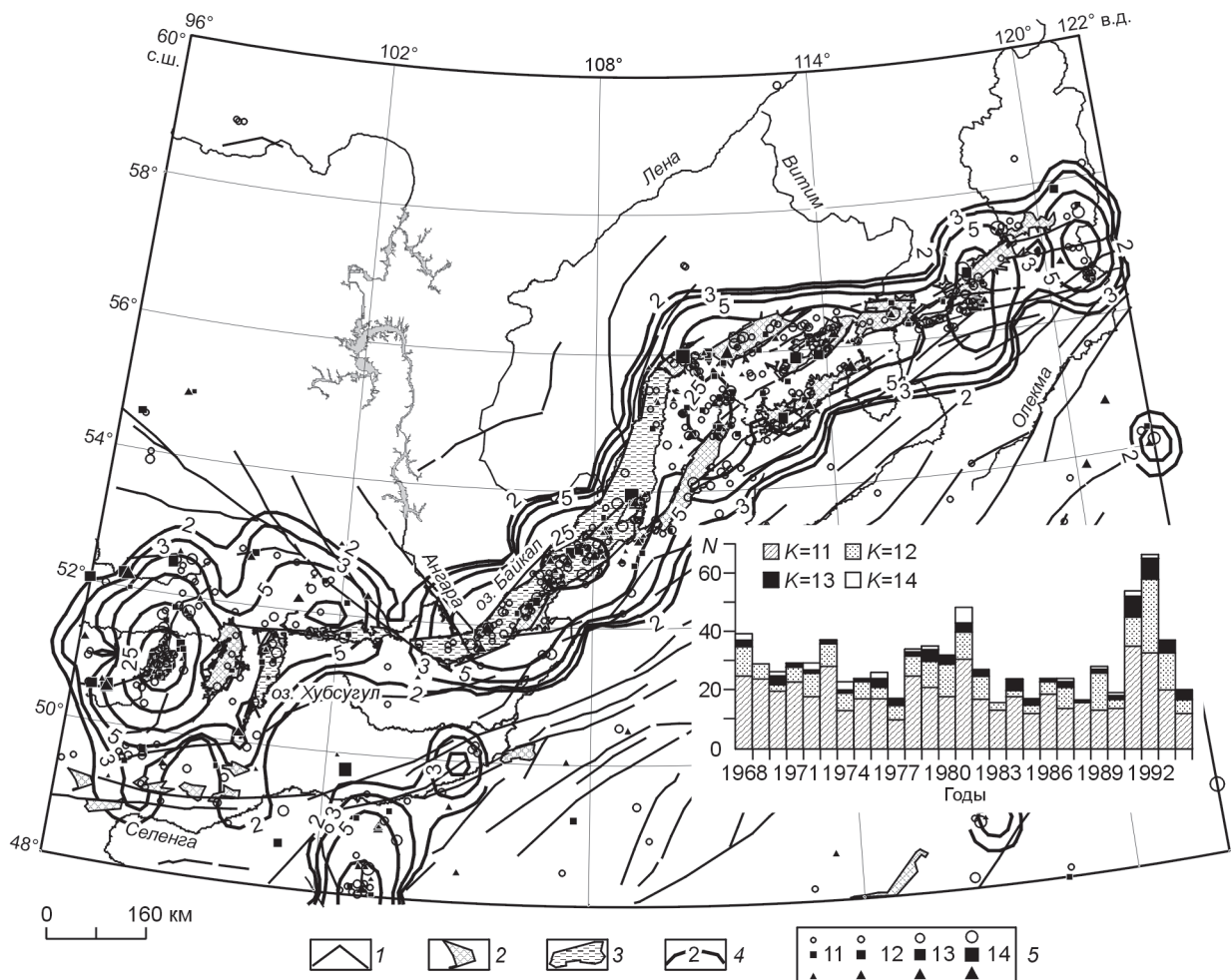


Рис. 1. Карта эпицентров и изолиний плотности эпицентров 802 землетрясений БРС с $11 \leq K_p \leq 14$, имеющих определение сейсмического момента. На врезке представлена гистограмма распределения толчков во времени и по энергетическому классу.

1 — разломы, 2 — впадины, 3 — озера, 4 — изолинии плотности эпицентров толчков, 5 — энергетический класс по шкале Т.Г. Ратиян и тип подвижки по разлому (кружки — сбросы, квадраты — сдвиги, треугольники — взбросы).

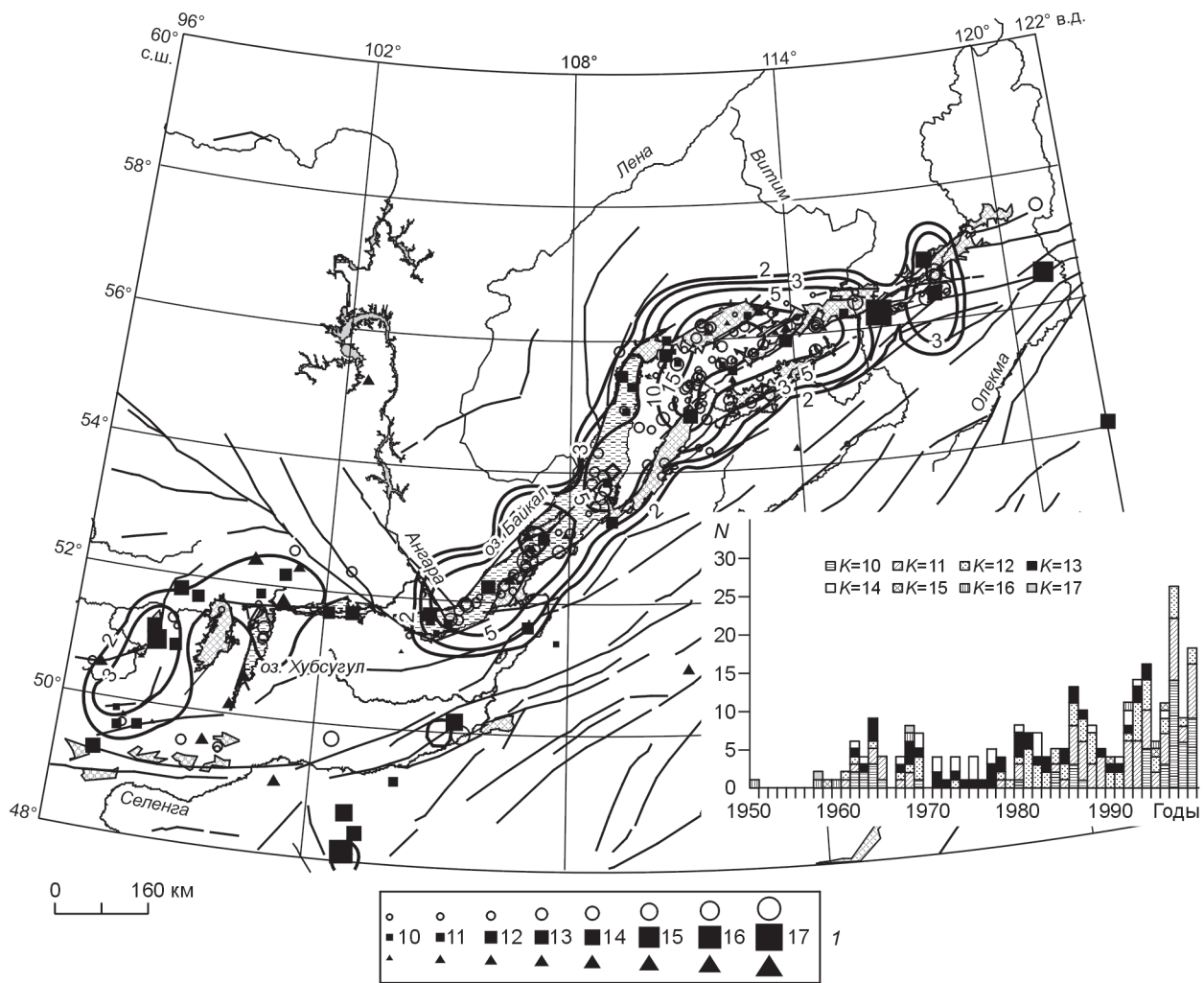


Рис. 2. Карта эпицентров и изолиний плотности эпицентров 265 землетрясений БРС с $K_p \geq 10$, имеющих определение фокального механизма. На врезке представлена гистограмма распределения толчков во времени и по энергетическому классу.

1 — энергетический класс по шкале Т.Г. Раутиан и тип подвижки по разлому. Ост. усл. обозн. см. рис. 1.

С начала выборки и до 1990-х годов число ежегодных определений фокальных механизмов изменяется от нуля до десяти со средним уровнем около пяти толчков в год.

Карты изолиний частоты реализации толчков-сбросов P_N , полученные по данным о фокальных механизмах (число толчков-сбросов $n_N = 173$, $P_N \approx 0.65$) и сейсмических моментах толчков ($n_N = 501$, $P_N \approx 0.63$) при числе толчков $N \geq 3$ в площадке осреднения $1.5 \times 1.5^\circ$, представлены на рис. 3. Области $P_N \geq 0.5$, выделенные по данным о фокальных механизмах, закрывают оз. Байкал и часть северо-востока БРС, а также район Дархатской впадины и оз. Хубсугул на юго-восточном фланге региона, и совпадают с зонами представительной обеспеченности толчков с $N \geq 2$ (см. рис. 2). Область $P_N \geq 0.5$, полученная по результатам о сейсмических моментах землетрясений, протягивается через БРС с юго-запада на северо-восток вдоль рифтовых структур с разделением в центральной части оз. Байкал. Изолиния частоты $P_N \geq 0.5$ характеризует области доминирования главного вертикального напряжения S_v , которое соотносится с главными горизонтальными напряжениями в виде $S_v > S_{H \max} > S_{H \min}$, где $S_{H \max}$ и $S_{H \min}$ — максимальное и минимальное главное горизонтальное напряжение [Zoback, 1992; Zoback, Zoback, 2002]. Изолинии P_N , полученные по данным о фокальных механизмах и сейсмических моментах, в целом неплохо совпадают в зонах представительной выборки толчков, и особенно хорошо соответствуют друг другу максимумы P_N в районе Баргузинской впадины. Однако имеются и отличия, довольно значительные на юго-западном фланге, где по результатам о сейсмических моментах выделена обширная область сбросов. И если на северо-восточном фланге распределение P_N простое с линейной доминантой вдоль рифтовых впадин, то на юго-западе региона область повышенной частоты реализации сбросов $P_N \geq 0.5$

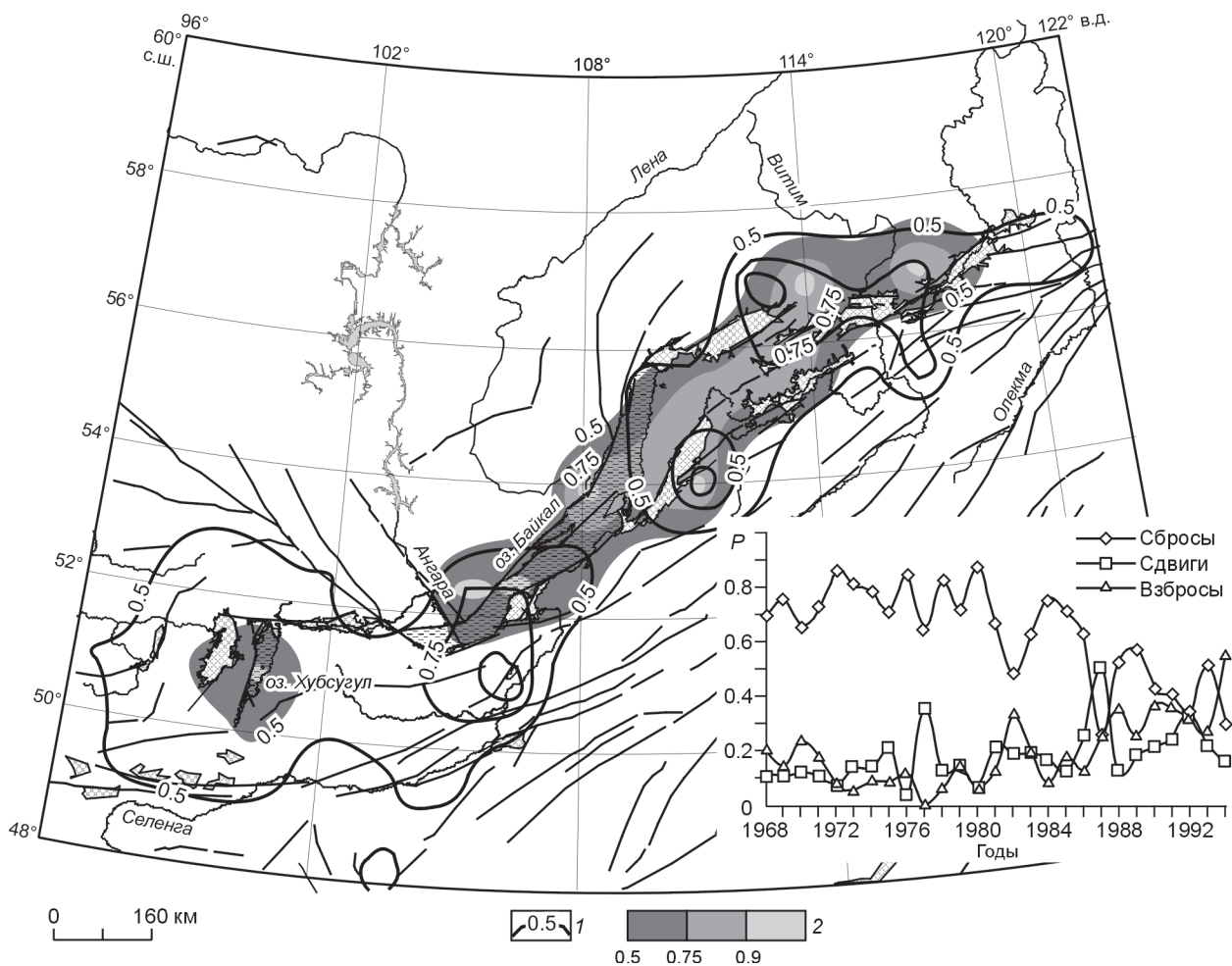


Рис. 3. Карты изолиний частоты реализации толчков-сбросов P_N , полученные по данным о фокальных механизмах и сейсмических моментах толчков. На врезке представлены графики среднегодовой частоты реализации P толчков-сбросов, сдвигов и взбросов по данным о сейсмических моментах землетрясений.

1 — изолинии частоты P_N по данным о сейсмических моментах толчков, 2 — шкала частоты P_N по данным о фокальных механизмах. Ост. усл. обозн. см. рис. 1.

расширена вплоть до Болнайского разлома и р. Селенга. По мнению Н.А. Логачева [2003], этот разлом является южным ограничением структур БРС. Графики среднегодовой частоты реализации P толчков всех типов подвижек по разломам, полученные по данным о сейсмических моментах землетрясений, представлены на рис. 3, врезка. На графиках до 1981-го года наблюдается доминирование толчков-сбросов при среднем уровне $P_N \approx 0.7-0.8$ и примерно равных частотах толчков-сдвигов и взбросов $P_S \approx P_R \approx 0.1-0.15$. В 1982 г. частота реализации сбросов понижается до $P_N \approx 0.48$, но повышается частота толчков-взбросов до $P_R \approx 0.33$ при частоте толчков-сдвигов $P_S \approx 0.19$. На следующий год частота сбросов начинает расти и в 1984 г. достигает $P_N \approx 0.75$ при $P_S \approx 0.17$ и $P_R \approx 0.08$. В 1987 г. происходит самое сильное падение частоты сбросов до $P_N \approx 0.25$ при $P_S \approx 0.50$ и $P_R \approx 0.25$. Период с 1990 по 1994 г. характеризуется одинаковой частотой реализации толчков разных типов подвижек по разлому. В 1994 г. повышается частота реализации взбросов до $P_R \approx 0.55$ при $P_N \approx 0.30$ и $P_S \approx 0.15$.

Карты изолиний частоты реализации толчков-сдвигов P_S , полученные по данным о фокальных механизмах ($n_S = 54$, $P_S \approx 0.20$) и сейсмических моментах толчков ($n_S = 145$, $P_S \approx 0.18$), представлены на рис. 4. По данным о фокальных механизмах две значительные области повышенной частоты сдвигов выделяются на юго-западном фланге региона. Одна из них ($P_S \geq 0.25$) протягивается из Центральной Монголии к южной оконечности оз. Байкал и на юге характеризует фокальные механизмы катастрофического Могодского землетрясения (05.01.1967; $\varphi = 48.1^\circ$ с.ш., $\lambda = 102.9^\circ$ в.д.; $M = 7.8$; $K_p = 17$) и его сильных афтершоков 1967 г. (см. рис. 2). Вторая область окружает рифтовые впадины Прихубсугуля и Дархатии. Два локальных участка ($P_S \geq 0.25$) выделяются на севере оз. Байкал и на северо-востоке Верх-

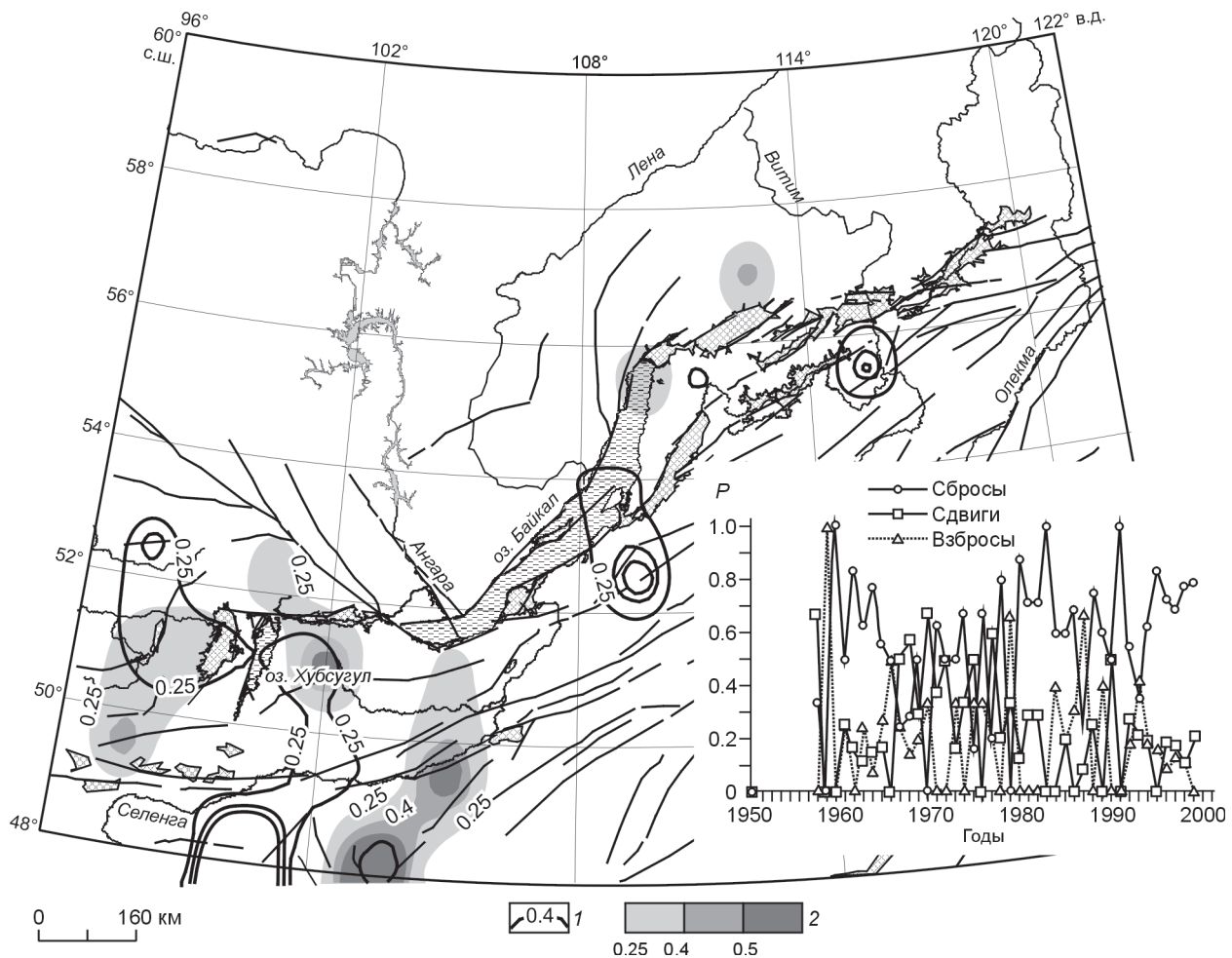


Рис. 4. Карты изолиний частоты реализации толчков-сдвигов P_S , полученные по данным о фокальных механизмах и сейсмических моментах толчков. На врезке представлены графики среднегодовой частоты реализации P толчков-сбросов, сдвигов и взбросов по данным о фокальных механизмах.

1 — изолинии частоты P_S по данным о сейсмических моментах толчков, 2 — шкала частоты P_S по данным о фокальных механизмах. Ост. усл. обозн. см. рис. 1.

неангарской впадины. По данным о сейсмических моментах землетрясений область $P_S \geq 0.25$ выделяется в центральной части оз. Байкал там, где наблюдается разделение изолиний $P_N \geq 0.5$ (см. рис. 3). На юго-западном фланге наблюдается сложной формы структура $P_S \geq 0.25$. При сопоставлении карт P_S видно, что пространственно близко расположены зоны около Дархатской впадины. Область доминирования сдвигов из Центральной Монголии к южной оконечности Байкала по данным о сейсмических моментах не выделяется, но западнее ее наблюдается зона повышенной частоты сдвигов $P_S \geq 0.5$. Изолиния частоты $P_S \geq 0.5$ характеризует область, в которой $S_{H\max} > S_v > S_{H\min}$ [Zoback, 1992; Zoback, Zoback, 2002]. Графики среднегодовой частоты реализации P толчков всех типов подвижек по разломам, полученные по данным о фокальных механизмах землетрясений, приведены на рис. 4, врезка, где наблюдаются резкие изменения P , обусловленные, вероятно, слабой представительностью данных о фокальных механизмах. При сопоставлении графиков, полученных по данным о фокальных механизмах и сейсмических моментах землетрясений (см. рис. 3, врезка), можно отметить общую тенденцию доминирования сбросов в 1980-х годах и достаточно хорошее совпадение в 1992 г., когда частоты толчков примерно равны $P \approx 0.33$.

На рис. 5 приведены карты изолиний частоты реализации толчков-взбросов P_R , полученные по данным о фокальных механизмах ($n_R = 38$, $P_R \approx 0.15$) и сейсмических моментах толчков ($n_R = 156$, $P_R \approx 0.19$). По данным о фокальных механизмах обозначены три локальные зоны взбросов ($P_R \geq 0.25$) вокруг рифтовых впадин Прихубсугуля и Дархатии. Южнее Муйской впадины на северо-востоке региона локализуется зона с $P_R \geq 0.4$. Повышенная частота характеризует область, в которой главные гори-

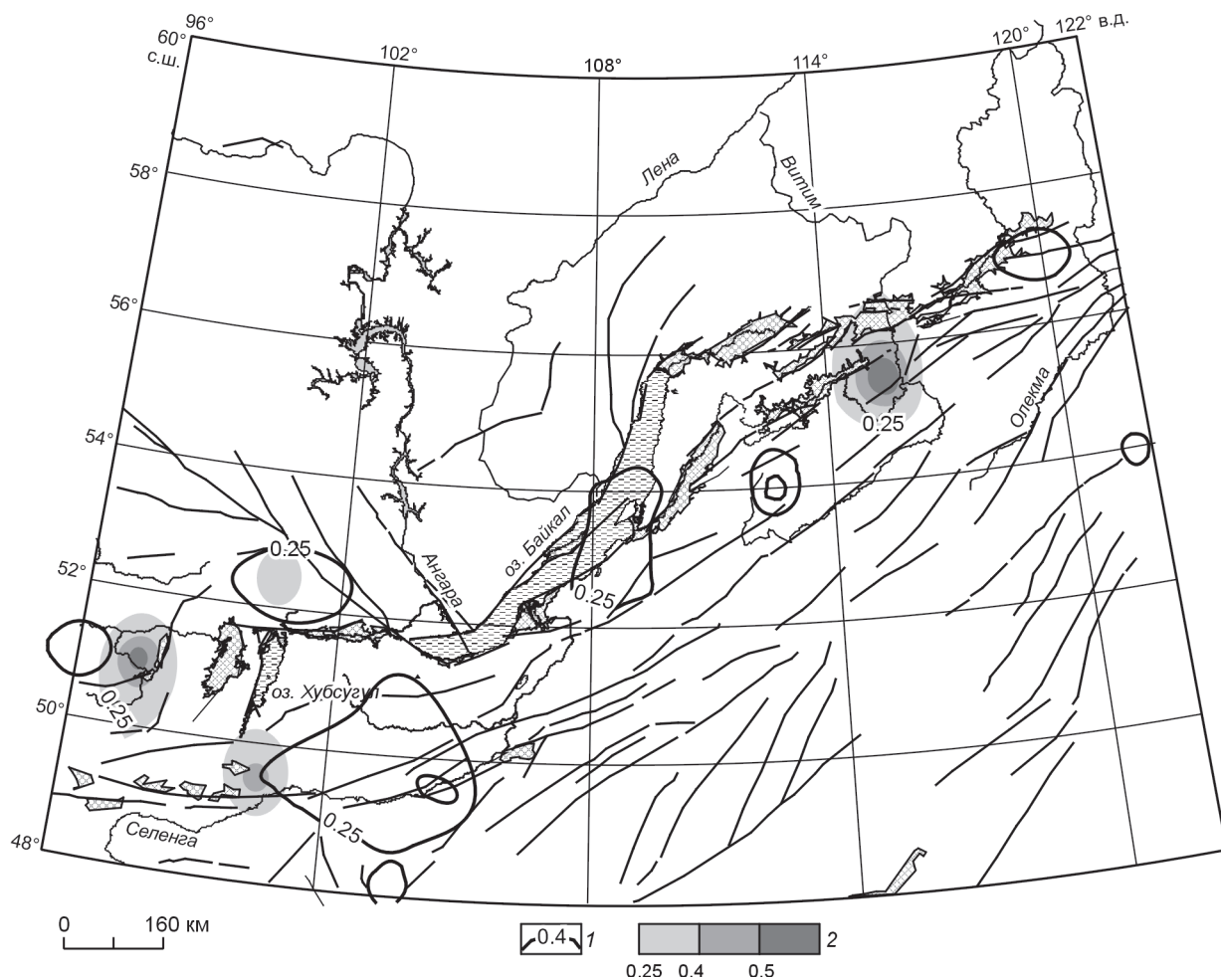


Рис. 5. Карты изолиний частоты реализации толчков-взбросов P_R , полученные по данным о фокальных механизмах и сейсмических моментах толчков.

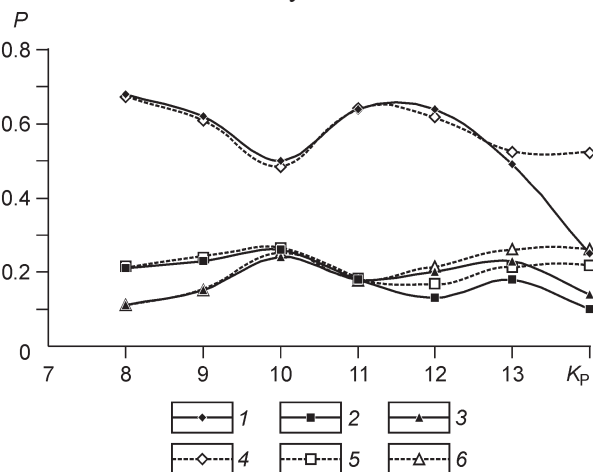
1 — изолинии частоты P_R по данным о сейсмических моментах толчков, 2 — шкала частоты P_R по данным о фокальных механизмах. Ост. усл. обозн. см. рис. 1.

зонтальные напряжения превышают вертикальное напряжение ($S_{H \max} > S_{H \min} > S_v$) [Zoback, 1992; Zoback, Zoback, 2002]. По данным о сейсмических моментах землетрясений рассматриваются несколько областей, в которых вероятность $P_R \geq 0.25$. На юго-западном фланге три области фактически совпадают с зонами взбросов, выделенными по фокальным механизмам. В центральной части оз. Байкал отмечена зона $P_R \geq 0.25$, коррелирующая с зоной сдвигов (см. рис. 4). При сопоставлении карт видно неплохое соответствие областей на юго-западном фланге региона и отличие зон максимумов частот на остальной части карты.

Для анализа зависимости P_N , P_S и P_R от энергетического класса землетрясений на рис. 6 представлены графики частоты P , полученные по данным о сейсмических моментах толчков с $K_p = 8, 9 \dots 14$. На графиках приведены «статическая» частота, вычисленная по полной выборке данных каждого K_p за 1968—1994 гг., и «динамическая» частота, которая

Рис. 6. Графики частоты P , полученные по данным о сейсмических моментах толчков Байкальского региона с $K_p \geq 8$.

1—3, 4—6 — динамическая и статическая частоты реализации сбросов P_N , сдвигов P_S и взбросов P_R соответственно.



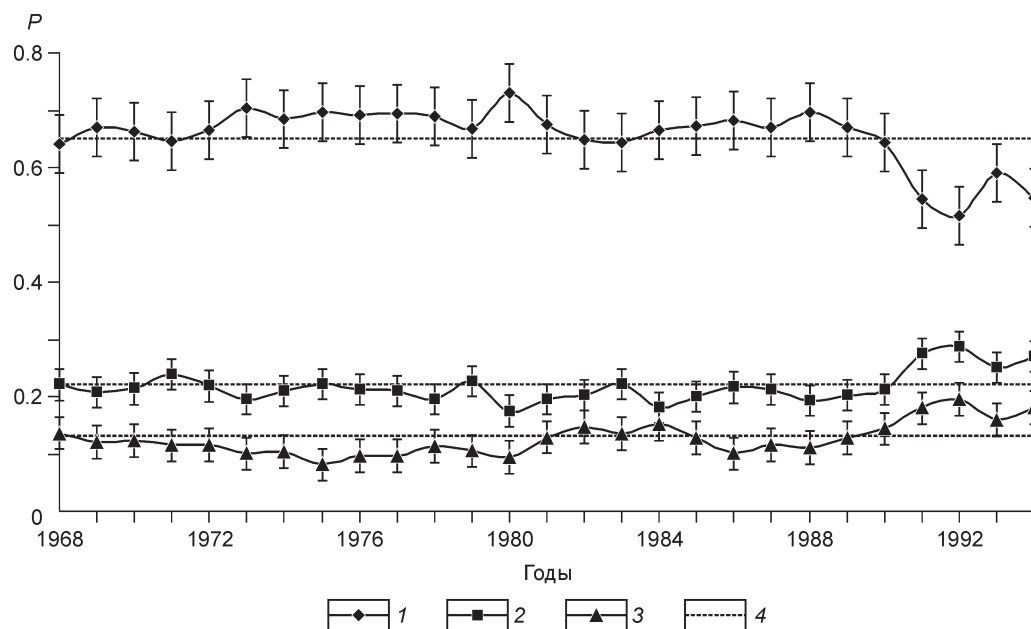


Рис. 7. Зависимости частот P_N , P_S и P_R от энергетического класса K_p землетрясений Байкальского региона.

1 — сбросы, 2 — сдвиги, 3 — взросы, 4 — среднее.

определена как среднее по времени от годовой частоты толчков каждого класса за интервал 1968—1994 гг. На рис.6 видна сложная форма графиков с уменьшением статической частоты толчков с $K_p = 10, 13, 14$ до уровня $P_N \approx 0.5$ при среднем уровне $P_N \approx 0.65$ у других классов. Менее значительны вариации P_S, P_R и в диапазоне слабых толчков $P_S > P_R$, при $K_p = 10-11$ $P_S \approx P_R$, а при $K_p \geq 12$ $P_S < P_R$. У землетрясений с $K_p \leq 11$ статическая и динамическая частоты почти совпадают, что свидетельствует об устойчивом доминировании рифтогенеза в этом диапазоне энергетических классов толчков. У более сильных землетрясений динамическая частота уменьшается, отражая, возможно, эффект большей неустойчивости напряжений в литосфере БРС на уровне иерархии наиболее сильных сейсмических событий. Видно, что при $K_p = 14$ динамические частоты толчков с разными типами подвижек сближаются, и в этом явлении отражено смысловое представление P не только как частотной, но и вероятностной оценки, характеризующей случайность сейсмического процесса мощных землетрясений. Наблюдаемая тенденция сближения графиков P_N, P_S и P_R с ростом энергетического класса толчков указывает на то, что частоты реализации различных типов подвижек в очагах сильных землетрясений БРС с $K_p > 14$ могут быть сопоставимы.

Чтобы сопоставить динамику P_N, P_S и P_R в очагах слабых и сильных землетрясений, на рис. 7 приведены графики частоты P , полученные по данным о сейсмических моментах толчков с $K_p \geq 8$. Видно, что в целом режим рифтогенеза доминирует в регионе при среднем уровне $P_N \approx 0.65$ с усилением в 1980-м и ослаблением в начале 1990-х годов. Сдвиги и сбросы составляют в сумме примерно треть толчков при средних частотах $P_S \approx 0.22$ и $P_R \approx 0.13$. Если сопоставить рис. 7 с графиками на рис. 3, врезка, то можно отметить близкое соответствие основных тенденций поведения P , но в деталях имеются отличия. Так, на рис. 7 наблюдаем, что временной тренд графиков P незначителен, однако, как показало исследование динамики частот реализации отдельно для толчков каждого энергетического класса, с ростом K_p землетрясений наклон трендов последовательно усиливается и у толчков с $K_p \geq 10$ в первой половине 1990-х годов происходит пересечение трендов частот P_N и P_S, P_R , как и на рис. 3, врезка. Наиболее динамично изменяется тренд графика P_N и, как правило, тренд P_R круче, чем P_S .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Современные представления о землетрясении как явлении мгновенного разрушения горных пород формируют понятия о неустойчивости НДС среды, стохастическом и фрактальном характерах распределений напряжений и деформаций в литосфере [Садовский и др., 1987; International..., 2002]. Следовательно, при реконструкции НДС литосферы активных регионов методами очаговой сейсмологии необходимо использовать результаты обработки параметров очагов землетрясений в полном диапазоне длин разрывов в литосфере. Настоящее исследование параметров очагов сильных землетрясений является необходимым дополнением комплекса работ по изучению и реконструкции НДС литосферы БРС.

Результаты, полученные по данным о фокальных механизмах и сейсмических моментах сильных землетрясений, свидетельствуют о хорошем совпадении поля напряжений растяжения в областях представительной обеспеченности данных. Менее совпадающими следует признать результаты реконструкции полей напряжений, генерирующих сдвиги и взбросы, хотя большинство выделенных зон также совпадают. Основные наблюдаемые отличия обусловлены, на наш взгляд, разными интервалами выборок данных фокальных механизмов (1950—1998 гг.) и сейсмических моментов землетрясений (1968—1994 гг.), а также слабой пространственно-временной представительностью фокальных механизмов. Результаты работы дают возможность классифицировать особенности напряженного состояния литосферы в Байкальском рифте на уровне иерархии сильных сейсмических событий: в пределах исследуемой территории доминирует режим рифтогенеза с формированием толчков-сбросов при частотах $P_N \geq 0.5$, а локальные области повышенной частоты реализации сдвигов и взбросов указывают на неоднородность напряженного состояния литосферы БРС. Анализ динамики напряжений в литосфере БРС подтверждает доминирующую роль рифтогенеза, однако эта доминанта неустойчива и в конце 1980-х—начале 1990-х годов возникла ситуация примерного равенства и даже частичного преобладания сдвигов и взбросов. Этот эпизод хорошо согласуется с результатами комплексного геофизического мониторинга напряженно-деформированного состояния литосферы Байкальского региона [Дядьков и др., 1999]. Выделенные области высокой частоты реализации толчков сдвигов и взбросов детерминируют зоны повышенной сейсмической опасности и являются основным практическим результатом настоящей работы, позволяющим более надежно и обоснованно подойти к решению проблемы обеспечения сейсмической безопасности в Байкальском регионе.

Исследование выполнено при поддержке РФФИ (гранты 05-05-97206 р_Байкал, 06-05-64120-а, 08-05-90201-Монг_а).

ЛИТЕРАТУРА

Аптикаев Ф.Ф. Точность прогноза сейсмических воздействий в задачах сейсмостойкого строительства // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2005, № 1, с. 40—43.

Аптикаев Ф.Ф., Копничев Ю.Ф. Учет механизма очага при прогнозе параметров сильных движений // Докл. АН СССР, 1979, т. 247, № 4, с. 822—825.

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.

Голенецкий С.И., Дреннова Г.Ф. Каталог механизмов очагов землетрясений Прибайкалья и Забайкалья // Землетрясения в СССР (за 1985—1991 гг.). М., Наука, 1988—1991, 1997.

Голенецкий С.И., Дреннова Г.Ф. Каталог механизмов очагов землетрясений Прибайкалья и Забайкалья // Землетрясения Северной Евразии (за 1992—1998 гг.). М., ГС РАН, 1999—2003.

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.

Ключевский А.В. Особенности напряженно-деформированного состояния земной коры Байкальского региона // Докл. РАН, 2003, т. 389, № 3, с. 398—403.

Ключевский А.В. Напряжения и сейсмичность на современном этапе эволюции литосферы Байкальской рифтовой зоны // Физика Земли, 2007, № 12, с. 14—26.

Ключевский А.В., Демьянович В.М. Динамические параметры очагов сильных землетрясений Байкальской сейсмической зоны // Физика Земли, 2002, № 2, с. 55—66.

Ключевский А.В., Демьянович В.М. Деструкция земной коры в Байкальском регионе по данным о форме дислокации землетрясений // Литосфера, 2003, № 3, с. 15—24.

Ключевский А.В., Демьянович В.М. Напряженно-деформированное состояние литосферы в Южном Прибайкалье и Северной Монголии по данным о сейсмических моментах землетрясений // Физика Земли, 2006, № 5, с. 65—77.

Копничев Ю.Ф., Шпилькер Г.Л. Пространственно-временные характеристики очагов сильных землетрясений с различными типами подвижек // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1980, № 9, с. 3—11.

Левшин А.Л., Грудева Н.П. Некоторые вопросы теории магнитуд // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. М., МССС, 1974, т. 1, с. 172—180.

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

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

Мишарина Л.А. Напряжения в очагах землетрясений Монголо-Байкальской зоны // Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М., Наука, 1972, с. 161—171.

Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М., Наука, 1976, с. 9—27.

Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М., Наука, 1987, 101 с.

Современная динамика литосферы континентов / Ред. Н.А. Логачев. М., Недра, 1995, 560 с.

Солоненко Н.В., Мельникова В.И. Механизмы очагов землетрясений Байкальской рифтовой зоны за 1981—1990 гг. // Геология и геофизика, 1994, т. 35 (11), с. 99—107.

Brune J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes // J. Geophys. Res., 1970, v. 75, p. 4997—5009.

International handbook of earthquake and engineering seismology / Eds. W.H.K. Lee, H. Kanamori, P. C. Jennings, C. Kisslinger. Amsterdam, Boston, New York, Tokyo, Academic Press, 2002, Part A, 934 p.

Klyuchevskii A.V. Seismic moments of earthquakes in the Baikal rift zone as indicators of recent geodynamic processes // J. Geodyn., 2004, v. 37, № 2, p. 155—168.

Solonenko A., Solonenko N., Melnikova V., Shteiman E. The seismicity and earthquake focal mechanisms of the Baikal Rift Zone // Bull. Centres Rech. Elf Explor. Prod, 1997, v. 25, p. 207—231.

Zoback M.L. First- and second-order patterns of stress in the lithosphere: The World Stress Map project // J. Geophys. Res., 1992, v. 97, № B8, p. 11703—11728.

Zoback M. D., Zoback M.L. State of stress in the Earth's lithosphere // International handbook of earthquake and engineering seismology. 2002, Part A, p. 559—568.

Рекомендована к печати 16 июня 2008 г.

В.С. Селезневым

Поступила в редакцию

12 марта 2008 г.