

УДК 550.34.042+551.243

ПАРАМЕТРЫ ОЧАГОВ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПРИБАЙКАЛЬЯ: ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТЬ, СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

© 2014 г. А. В. Ключевский

Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
E-mail: akluchev@crust.irk.ru

Поступила в редакцию 22.05.2013 г.

По выборке из 335 фокальных механизмов сильных землетрясений Прибайкалья с энергетическим классом $K_p \geq 10$ оценена пространственно-временная и энергетическая представительность данных. Показано, что слабо обеспечены материалами территории, граничащие с Монголией, Алтае-Саянской областью и Якутией, а число ежегодных определений механизмов в 1950–1998 гг. изменяется от 0 до 25 при среднем уровне около шести толчков в год. Решения фокальных механизмов отражают малую часть сильных землетрясений региона и не могут считаться представительными (более 50%) для толчков с энергетическим классом $K_p \leq 13$. Установлена структура фокальных механизмов и получены средние распределения параметров по выборке в целом и с учетом типа подвижки в очаге. Основные закономерности механизмов полной выборки формируются преобладающими в количественном отношении толчками-сбросами. Соответствие средних углов падения DP_{aver} , средних модулей $SLIP$ и азимутов простирания STK взбросов и сбросов указывает на возможность подвижек таких типов по плоскостям одних разломов. Средние углы падения для подвижек разных типов превышают 50° , что свидетельствует о достаточно крутом погружении зон разломов.

Ключевые слова: Прибайкалье, сильные землетрясения, фокальные механизмы, представительность данных, основные закономерности.

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании напряженно-деформированного состояния (НДС) литосферы Прибайкалья по сейсмологическим данным используются, как правило, решения фокальных механизмов сильных землетрясений с энергетическим классом $K_p \geq 10$ [2–4, 11–13, 17, 23] и динамические параметры очагов землетрясений с $K_p \geq 7$ [6–8, 10, 21]. НДС среды описывается обобщенными кинематическими и динамическими параметрами источников, характеризующими ориентацию осей главных напряжений и положение нодальных плоскостей в пространстве, тип подвижки по разлому, сброшенное напряжение, размеры дислокации, смещение по подвижке, сейсмический момент, коэффициент формы дислокации и т.д. Решения фокальных механизмов землетрясений в Прибайкалье на протяжении ряда лет традиционно выполняются по методике А.В. Введенской с использованием знаков смещений в первых вступлениях объемных волн [1]. Поскольку решения фокальных механизмов требуют привлечения большого числа сейсмических станций, то НДС земной коры региона характеризуется, как правило, параметрами очагов достаточно сильных сейсмических событий с $K_p \geq 10$. Исключение составляют параметры очагов групп компактно расположенных толчков с $K_p \leq 9$, определенные на основе предположения “о сходстве

характера напряжений и подвижек в близко расположенных очагах землетрясений” [15, с. 24]. Имеются сведения о механизмах очагов более чем 3 тыс. землетрясений, однако индивидуальные решения фокальных механизмов, обычно используемые для сопоставления с геолого-структурными данными, получены примерно для 300 толчков с $K_p \geq 10$, происшедших с 1950 года [11]. К остальным, менее сильным землетрясениям применен групповой способ определения среднего механизма очага [14, 15]. С помощью этого способа выделено более 160 групп толчков, в каждой из которых сейсмические события сконцентрированы в достаточно ограниченных объемах земной коры и имеют решения фокальных механизмов, сгруппированные около некоторого среднего. По данным о механизмах очагов землетрясений на значительной части Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) преобладают растягивающие субгоризонтальные напряжения, ориентированные вкрест простирания основных морфоструктур [11, 13]. Однако на флангах и за пределами рифтовой зоны доминирующее значение режима растяжения ослабевает [23] и в ряде случаев оси напряжений растяжения и сжатия меняются местами [12]. Динамика напряжений и сеймотектонических деформаций по данным о фокальных параметрах землетрясений детально не исследовалась, но в работе [5] отмечено явление быстрого изменения напряжений в начале 1990-х гг.

Современные теоретические представления по физике очага тектонического землетрясения дают возможность охарактеризовать НДС среды динамическими параметрами источников. Результаты анализа напряженного состояния литосферы БРЗ по сейсмическим моментам сильных землетрясений с $K_p \geq 11$ верифицированы на основании данных классического метода фокальных механизмов [10]. На базе собранной при этом выборки опубликованных в литературе решений фокальных механизмов сильных землетрясений появляется возможность оценки представительности материалов, установления структуры и основных закономерностей в распределениях параметров очагов, обсуждения особенностей распределений и погрешностей определения параметров. В настоящее время такая генерализованная информация отсутствует, но она необходима для понимания неопределенностей в характеристике НДС литосферы на флангах и вне БРЗ, возникающих при использовании для геодинамических реконструкций фокальных механизмов сильных единичных толчков. Вероятно, собранная нами и используемая в данной работе выборка фокальных механизмов не совсем полная, но на ее основе можно установить в первом приближении главные закономерности в параметрах очагов землетрясений и использовать их для обобщенной характеристики НДС разломных зон. В работе представлены результаты статистической обработки параметров очагов сильных землетрясений Прибайкалья, характеризующие средние распределения и доминантные тенденции имеющихся решений фокальных механизмов и свидетельствующие о слабой пространственно-временной и энергетической представительности материалов на флангах и за пределами рифтовой зоны.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Информация о фокальных параметрах сильных землетрясений Прибайкалья опубликована во множестве литературных источников, но, к сожалению, единой опубликованной базы данных пока нет. В основе используемой нами выборки материалов из 335 фокальных механизмов лежат очаговые параметры 197 сильных землетрясений с $K_p \geq 10$, приведенные в монографии [16] и дополненные сведениями из работ [11, 12, 17] и сборников “Землетрясения в СССР” (1985–1991 гг.) и “Землетрясения Северной Евразии” (1992–1998) [3, 4]. Для обеспечения однородности исходного материала в настоящей работе использованы решения первой группы авторов и при наличии нескольких определений фокальных механизмов предпочтение отдавалось решениям этой группы как более массовым.

Чтобы сформировать представление о структуре используемой выборки фокальных механизмов, выполнена классификация толчков по ти-

пу подвижки в очаге. Землетрясения разделены на три группы в соответствии с величиной угла и знаком подвижки по разлому: взброс ($45^\circ \leq SLIP \leq 135^\circ$, число толчков-взбросов по первой нодальной плоскости $NP_1 = 64$, по второй нодальной плоскости $NP_2 = 61$); сдвиг ($-44^\circ \leq SLIP \leq 44^\circ$; $-180^\circ \leq SLIP \leq -136^\circ$; $136^\circ \leq SLIP \leq 180^\circ$, $NP_1 = 73$, $NP_2 = 85$) и сброс ($-135^\circ \leq SLIP \leq -45^\circ$, $NP_1 = 198$, $NP_2 = 189$). В этой классификации доминируют толчки-сбросы, что дает возможность охарактеризовать напряженное состояние литосферы по полной выборке данных фокальных механизмов как режим преобладающих горизонтальных растяжений, генерирующий толчки-сбросы. Вместе с тем, суммарное число сдвигов и взбросов, формирующихся в условиях горизонтального сжатия, составляет примерно 40%, что свидетельствует о существовании роли горизонтальных сжимающих напряжений в литосфере. В целом, полученная статистика отражает, вероятно, пространственно-временную неоднородность НДС среды, для описания которой проведена следующая формализация: отношение числа толчков-сбросов, сдвигов и взбросов к общему количеству землетрясений в выборке характеризует относительную частоту – вероятность реализации P_N , P_S и P_R толчков соответствующего типа [9, 10]. В полной выборке данных о фокальных механизмах землетрясений вероятности равны $P_N \approx 0.59$, $P_S \approx 0.22$, $P_R \approx 0.19$ для плоскости NP_1 и $P_N \approx 0.57$, $P_S \approx 0.25$, $P_R \approx 0.18$ для плоскости NP_2 .

Для характеристики пространственной представительности используемых материалов на рис. 1 приведена карта-схема эпицентров и изолиний плотности эпицентров землетрясений, находящихся в площадках $1.0 \times 1.0^\circ$. Следует отметить, что на рис. 1 приведены эпицентры 265 толчков, так как остальные землетрясения выборки произошли за пределами Байкальского региона ($\varphi = 48\text{--}60^\circ$ с.ш., $\lambda = 96\text{--}122^\circ$ в.д.). На карте-схеме изолинии плотности эпицентров толчков $N \geq 3$ закрывают оз. Байкал и основные рифтовые впадины. На юго-западе и северо-востоке обеспеченность данными невысока, но менее всего обеспечены материалами территории, граничащие с Монголией, Алтае-Саянской областью и Якутией. В некоторых местах эпицентры толчков группируются, и анализ показал, что кластер толчков в районе катастрофического Могодского землетрясения (05.01.1967; $\varphi = 48.1^\circ$ с.ш., $\lambda = 102.9^\circ$ в.д.; $M = 7.8$) формируется его двумя афтершоками 1967 года. В кластере толчков Северо-Монгольского землетрясения (13.05.1989; $\varphi = 50.17^\circ$ с.ш., $\lambda = 105.34^\circ$ в.д.; $M_{LH} = 5.8$) также присутствует афтершок, а в очаговой зоне Южно-Муйского землетрясения (13.11.1995; $\varphi = 56.13^\circ$ с.ш., $\lambda = 114.55^\circ$ в.д.; $M_S = 6.1$) группа формируется из восьми афтершоков. Для характеристики временной и энергетической представительности исходных материалов на вставке А (рис. 1) дана

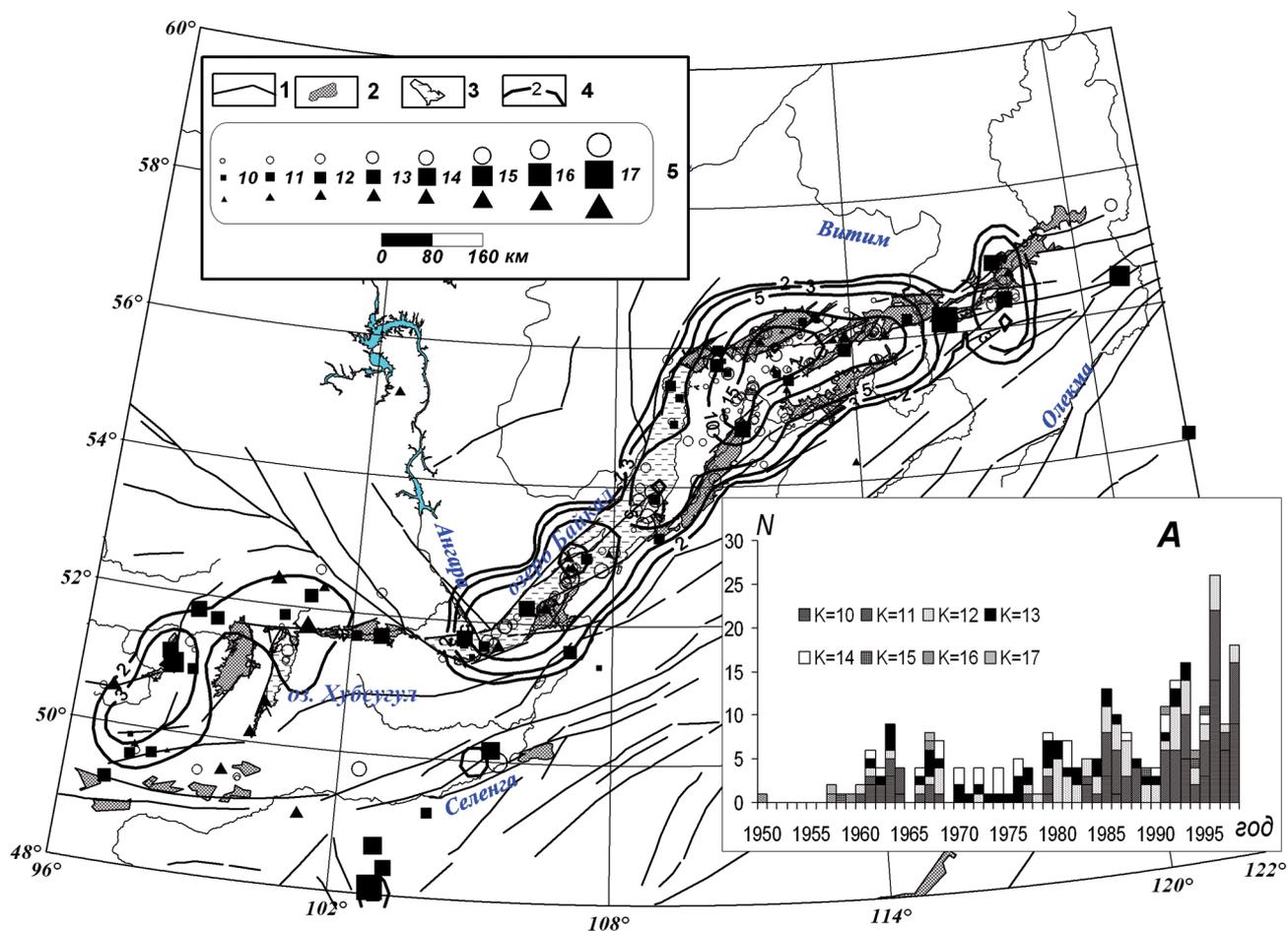


Рис. 1. Карта-схема эпицентров и изолиний плотности эпицентров 265 землетрясений Байкальского региона с $K_p \geq 10$, имеющих решение фокального механизма.

Вставка А – гистограмма распределения 265 толчков во времени и по энергетическому классу. 1 – разломы, 2 – впадины, 3 – озера, 4 – изолинии плотности эпицентров толчков, 5 – энергетический класс K_p по шкале Т.Г. Раутиан и тип подвижки по разлому (кружки – сбросы, квадраты – сдвиги и треугольники – взбросы).

гистограмма распределения во времени и по K_p 265 толчков Байкальского региона с $K_p \geq 10$, имеющих решение фокальных механизмов. На гистограмме видно, что число решений фокальных механизмов возрастает в 1990-е годы за счет привлечения менее сильных толчков с $K_p = 10$, однако и в эти годы оно не превышает 25 событий в год. С начала выборки и до 1990-х гг. число ежегодных решений фокальных механизмов изменяется от нуля до десяти со средним уровнем около пяти толчков в год. Оценки представительности данных по энергетическим классам приведены в таблице, из которой видно, что 50-процентную представительность решений имеют землетрясения с $K_p \geq 14$, а в целом решения фокальных механизмов отражают малую часть сильных земле-

трясений и не могут считаться представительными (более 50%) для толчков с $K_p \leq 13$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На рис. 2 приведена карта-схема изолиний плотности вероятности реализации толчков-сбросов P_N ($n = 173$), сдвигов P_S ($n = 54$) и взбросов P_R ($n = 38$), полученная при числе толчков $n \geq 3$ в площадке осреднения $1.5 \times 1.5^\circ$. На карте видно, что области $P_N \geq 0.5$ закрывают оз. Байкал и часть северо-востока БРЗ, а также район Дархатской впадины и оз. Хубсугул на юго-западном фланге региона. Следует подчеркнуть, что эти области корреспон-

Таблица 1. Представительность выборки фокальных механизмов сильных землетрясений Прибайкалья

К _p	10	11	12	13	14	15	16	17	Все толчки
n	2700	791	284	99	37	5	8	2	3926
n ₁	53	72	61	43	24	4	6	2	265
n ₁ /n × 100, %	2.0	9.1	21.5	43.4	64.9	80	75	100	6.7

Примечание: n – число толчков, зарегистрированных в “Каталоге землетрясений Прибайкалья” за 1950–1998 гг., n₁ – число землетрясений в выборке, имеющих решение фокальных механизмов за 1950–1998 гг., n₁/n × 100, % – представительность данных, в процентах.

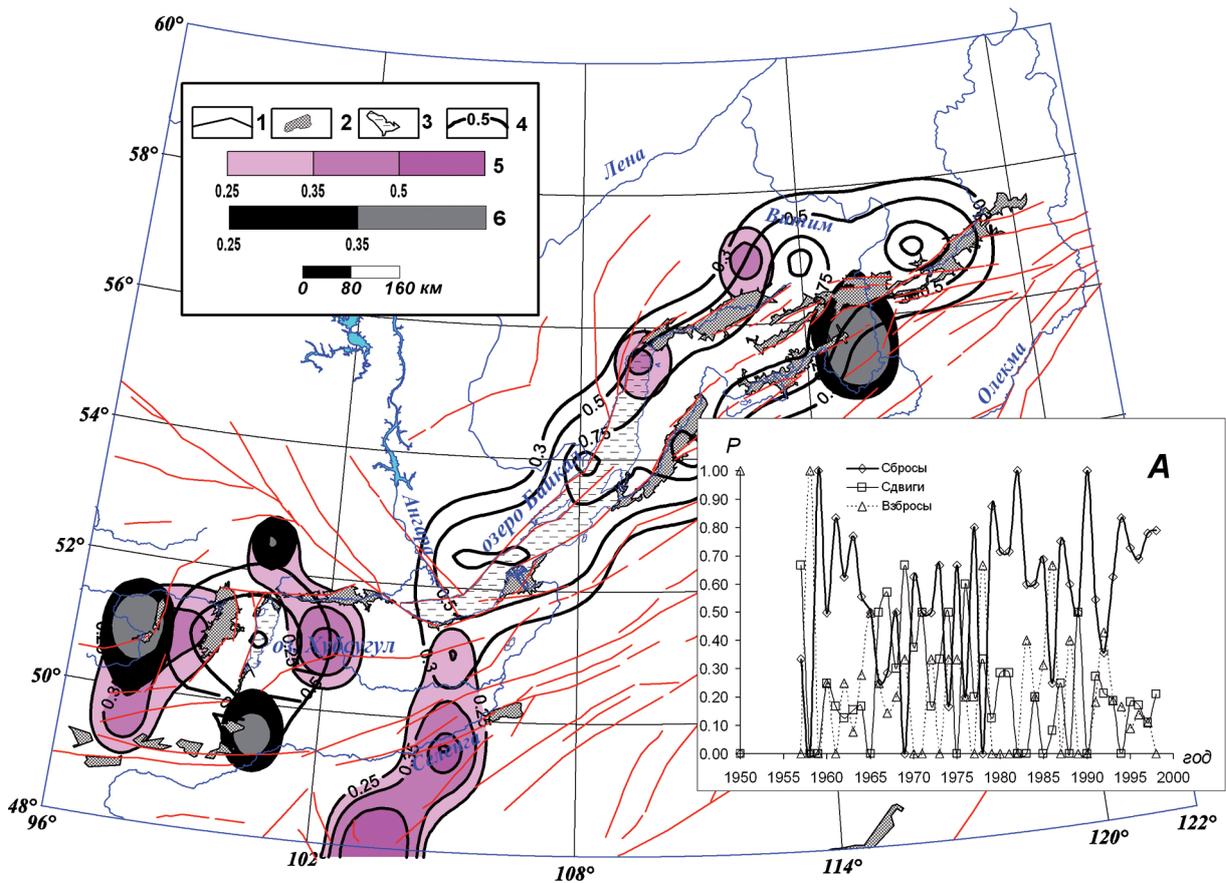


Рис. 2. Карта-схема изолиний плотности вероятности реализации толчков-сбросов, сдвигов и взбросов.

Вставка А – графики среднегодового потока вероятности реализации P толчков-сбросов, сдвигов и взбросов. 1 – разломы, 2 – впадины, 3 – озера, 4 – изолинии плотности вероятности толчков-сбросов, 5 – шкала плотности вероятности толчков-сдвигов, 6 – шкала плотности вероятности толчков-взбросов.

дируются с зонами представительной обеспеченности толчков $N \geq 3$ на рис. 1. Две области повышенной плотности вероятности сдвигов выделяются на юго-западном фланге региона. Одна из них ($P_s \geq 0.35$) протягивается из центральной Монголии к южной оконечности оз. Байкал и характеризует, очевидно, фокальные механизмы Могодского и Северо-Монгольского землетрясений и их афтер-

шоков (см. рис. 1). Эта область не выделяется как зона представительной обеспеченности толчков $N \geq 3$ – на рис. 1 наблюдаются два локальных участка $N \leq 2$, а причиной формирования этой протяженной структуры на карте (рис. 2) является увеличение площадки осреднения данных до $1.5 \times 1.5^\circ$. Вторая область повышенной плотности вероятности сдвигов окружает рифтовые впадины При-

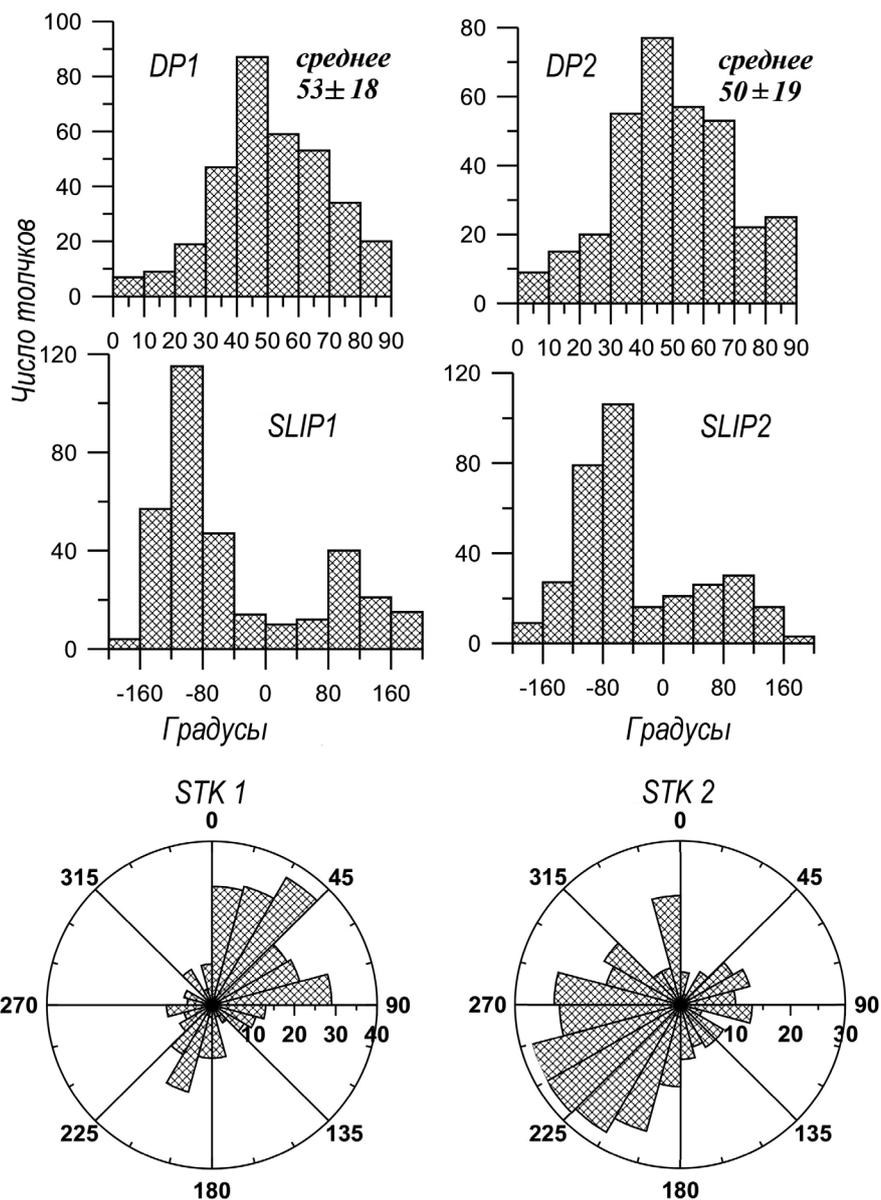


Рис. 3. Углы падения DP , углы скольжения $SLIP$ и азимуты простираения STK первой (1) и второй (2) нодальных плоскостей общей выборки данных.

хубсугуля и Дархатии. Два локальных участка ($P_s \geq 0.35$) выделяются на севере оз. Байкал и на северо-востоке Верхнеангарской впадины. Три локальные зоны взбросов ($P_R \geq 0.35$) наблюдаются на юго-западном фланге региона, окружая рифтовые впадины Прихубсугуля и Дархатии. Южнее Муйской впадины, на северо-востоке региона, локализуется зона с $P_R \geq 0.35$. На вставке А (рис. 2) представлены графики среднегодового потока вероятности реализации P толчков разных типов подвижек. Обращают на себя внимание резкие изменения P , обусловленные, очевидно, слабой представитель-

стью данных. В 1980-х гг. поток вероятности реализации сбросов несколько стабилизируется и в целом $P_N > 0.5$, за исключением 1986 г., когда поток вероятности сбросов понизился до $P_N \approx 0.25$ и резко возросла вероятность взбросов ($P_R \approx 0.67$). До 1980-х гг. подобные инверсии достаточно часты и обусловлены, скорее всего, слабой представительностью материалов в этот интервал времени (рис. 1А).

Анализ параметров нодальных плоскостей, выполненный по полной базе данных, показал, что гистограммы угла падения DP^1 и DP^2 по решениям для первой и второй плоскостей имеют по

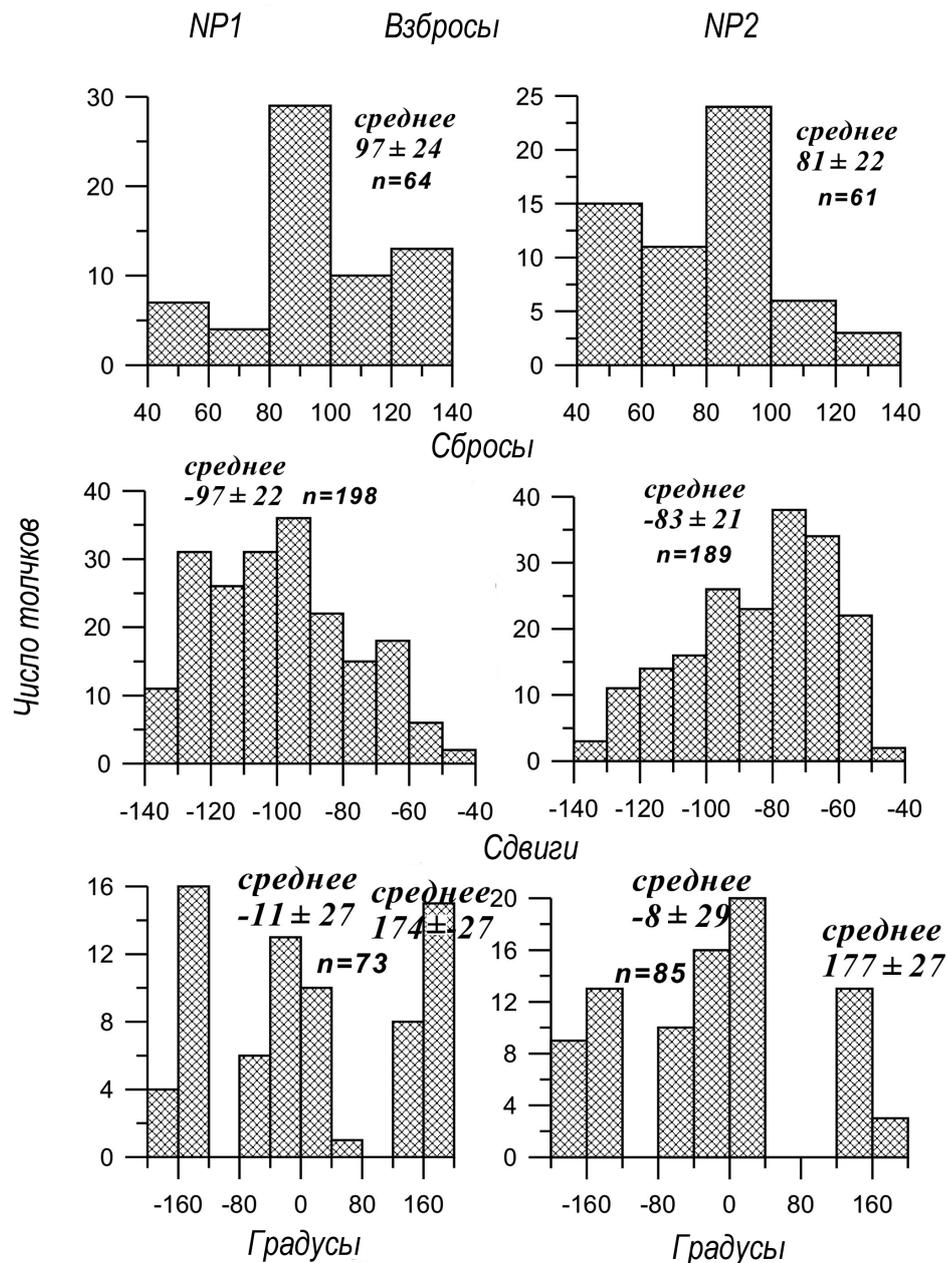


Рис. 4. Гистограммы углов скольжения по первой (NP1) и второй (NP2) нодальным плоскостям в зависимости от типа подвижки в очаге.

одному максимуму и немного отличаются друг от друга, а медианы распределений соответствуют $DP_{aver}^1 = 53 \pm 18^\circ$ и $DP_{aver}^2 = 50 \pm 19^\circ$ (рис. 3). Расчеты показали, что средние углы падения для сбросов, сдвигов и взбросов по первой нодальной плоскости составляют $DP_{aver}^{NP1} = 51 \pm 16^\circ$, $DP_{aver}^{SI} = 58 \pm 17$ и $DP_{aver}^{R1} = 53^\circ \pm 23^\circ$, а по второй плоскости – $DP_{aver}^{NP2} = 48 \pm 16^\circ$, $DP_{aver}^{S2} = 55 \pm 23^\circ$ и $DP_{aver}^{R2} = 52 \pm 21^\circ$. В целом, средние углы падения для подвижек разных типов соответствуют друг другу и превышают 50° , что указывает на достаточно крутое погружение зон разломов. Если предположить, что разрывы

при сильных землетрясениях начинаются в средней и нижней части земной коры [20], то полученные результаты не подтверждают возможности общего выполаживания зон разломов с глубиной. На гистограммах углов скольжения (SLIP) по обеим плоскостям наблюдаются два максимума, соответствующие толчкам-сбросам и взбросам (рис. 3). Азимуты простираения STK_1 плоскости NP_1 в основном северо-восточные, а азимуты простираения плоскости NP_2 преобладающе юго-западные.

Анализ углов скольжения с учетом типа подвижки показал, что по плоскостям NP_1 и NP_2 у взбро-

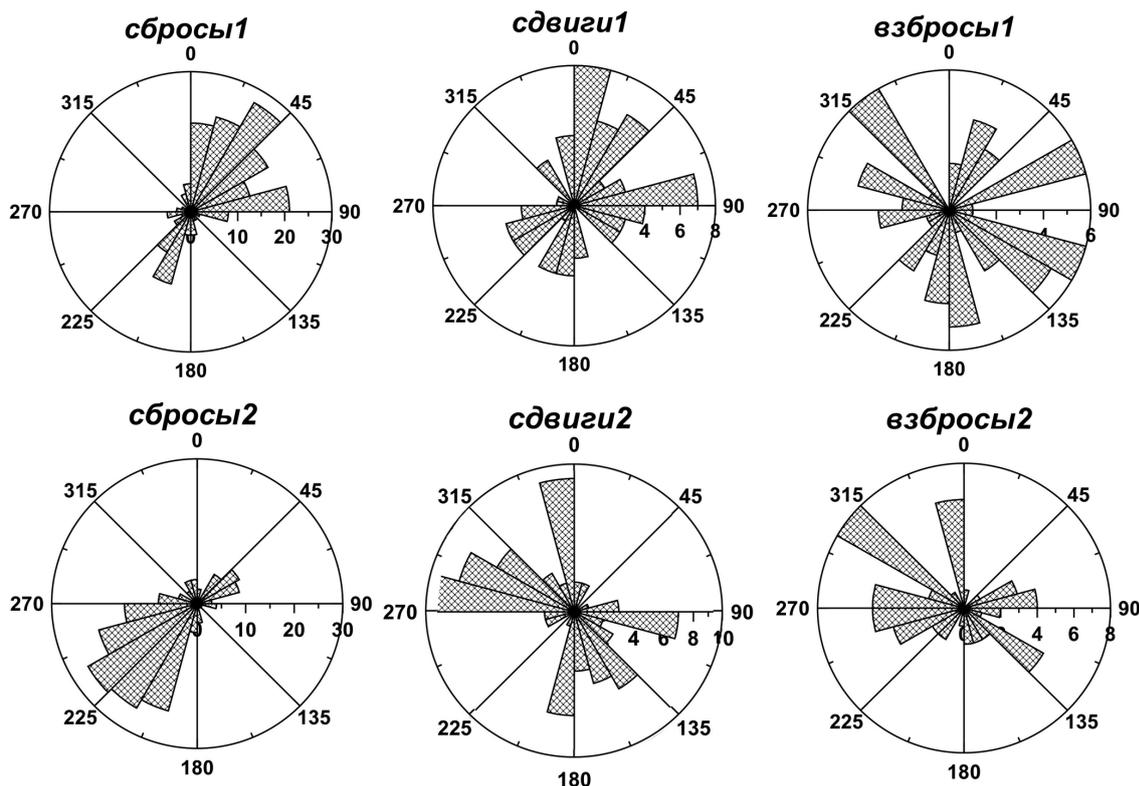


Рис. 5. Круговые диаграммы азимутов простираения первой (1) и второй (2) нодальных плоскостей по данным о толчках- сбросах, сдвигах и взбросах.

сов формируется по одному максимуму, а средние значения равны $97 \pm 24^\circ$ и $81 \pm 22^\circ$, соответственно (рис. 4). Гистограммы сбросовых толчков не имеют явно выраженных максимумов в *SLIP*, а средние значения равны $-97 \pm 22^\circ$ и $-83 \pm 21^\circ$ для первой и второй плоскостей. Поскольку средние углы падения DP_{aver} и средние модули *SLIP* взбросов и сбросов почти совпадают, не исключено, что противоположные по знаку вертикальные движения происходят по плоскостям одних разломов. У толчков-сдвигов в каждой плоскости наблюдаются два максимума со средними значениями по первой плоскости $-11 \pm 27^\circ$ и $174 \pm 27^\circ$, и средними значениями по второй плоскости $-8 \pm 29^\circ$ и $177 \pm 27^\circ$.

Круговые диаграммы азимутов простираения по данным о толчках сбросах, сдвигах и взбросах указывают (рис. 5), что по первой нодальной плоскости сбросы и сдвиги имеют преимущественно северо-восточное направление, а у взбросов нет преобладающих направлений. По второй плоскости сбросы ориентированы в юго-западном направлении, сдвиги – в субширотном и субмеридиональном, а у взбросов нет преобладающих направлений.

Анализ параметров осей главных напряжений по полной выборке показал, что углы погружения (*PL*) имеют максимумы в диапазонах: промежуточная ось (*N*) от 0 до 20° , ось растяжения (*T*) – $0-20^\circ$ и ось сжатия (*P*) $50-80^\circ$ (рис. 6). При расчетах

получено, что у сбросов, сдвигов и взбросов средние углы погружения равны, соответственно: промежуточной оси $PL_N^N = 14 \pm 10^\circ$, $PL_S^N = 48 \pm 17^\circ$ и $PL_R^N = 14 \pm 14^\circ$; оси растяжения $PL_N^T = 13 \pm 11^\circ$, $PL_S^T = 21 \pm 15^\circ$ и $PL_R^T = 62 \pm 14^\circ$; оси сжатия $PL_N^P = 69 \pm 11^\circ$, $PL_S^P = 29 \pm 19^\circ$ и $PL_R^P = 19 \pm 13^\circ$. Можно отметить, что общее представление об углах погружения осей главных напряжений формируется преобладающими в количественном отношении толчками сбросового типа, но при разделении выборки на толчки- сбросы, сдвиги и взбросы наблюдаются значимые отличия в *PL*. Максимумы азимутов (*AZM*) промежуточных осей имеют СВ–ЮЗ направление, осей растяжения – СЗ–ЮВ ориентировку, а оси сжатия не имеют преобладающих направлений (рис. 6).

У сбросов максимумы азимутов осей имеют ориентировку, аналогичную общей выборке (рис. 7). У сдвигов азимуты промежуточных осей имеют в основном субширотную направленность, оси растяжения ориентированы в направлении СЗ–ЮВ, а оси сжатия – СВ–ЮЗ. У взбросов азимуты промежуточных осей имеют в целом СЗ–ЮВ направленность, азимуты осей растяжения имеют максимум в диапазоне $150-180^\circ$, а оси сжатия не имеют преобладающих направлений.

Результаты анализа указывают на существование преобладающих значений в параметрах, но разброс данных значителен и обусловлен, вероятно, в

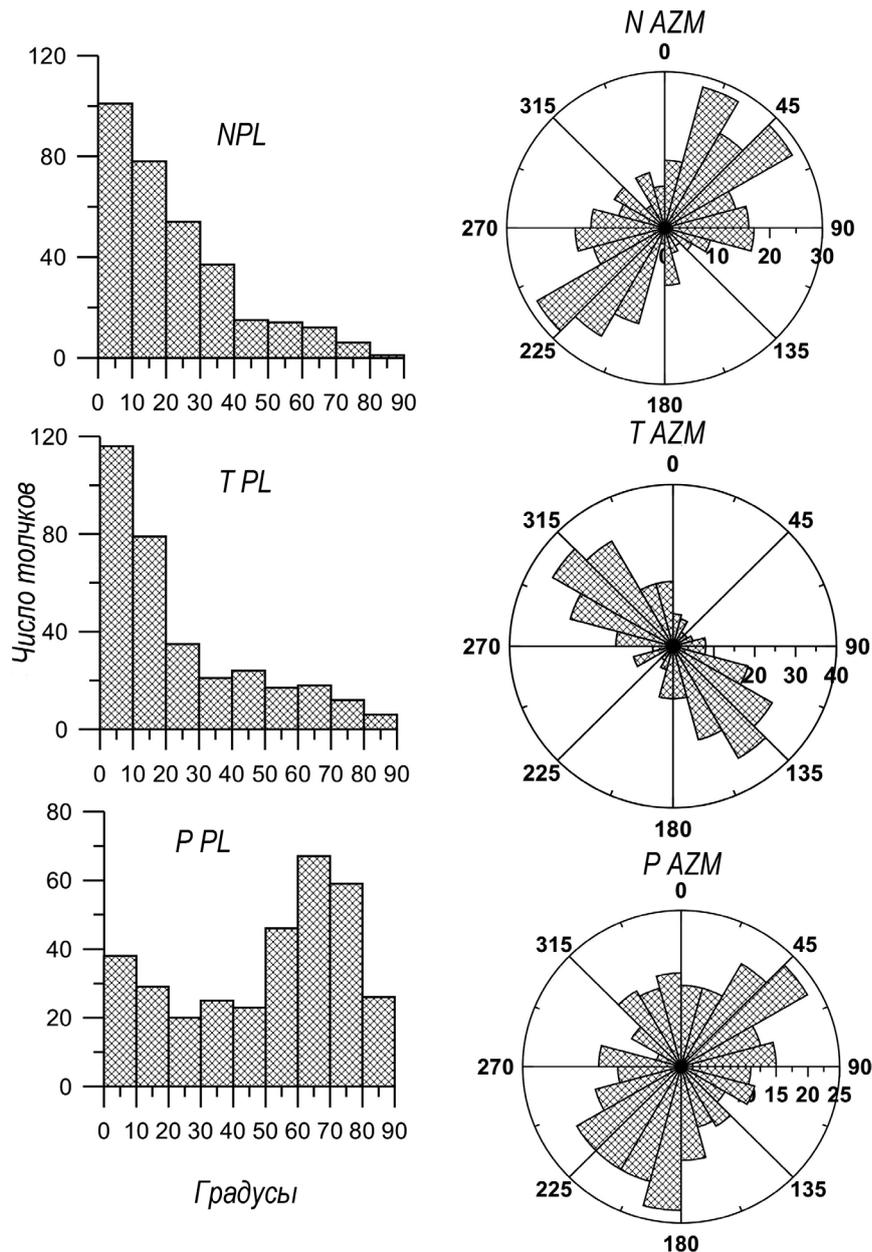


Рис. 6. Углы погружения (PL) и азимуты (AZM) осей главных напряжений общей выборки данных.

том числе и погрешностью их определения. Как известно, надежные решения фокального механизма можно получить при наличии широкого окружения сейсмическими станциями очага землетрясения в регионе с хорошо изученным скоростным разрезом и четкими импульсными вступлениями [19]. В Прибайкалье достаточно реальной является ситуация, когда плотность станций была сравнительно низка (особенно до середины 1960-х гг.), скоростная структура известна только приблизительно, а определение полярности первых вступлений не по всем станциям однозначно. В такой ситуации почти всегда появляется возможность получения ва-

риантов решений по фокальным механизмам, не противоречащих полученным наблюдениям. Важной характеристикой полученных решений фокальных механизмов является их устойчивость, зависящая от ряда факторов, основными из которых являются четкость вступлений знаков первых смещений *P*-волн на сейсмограммах, идентификация волновых фаз и представительность данных о знаках в каждом квадранте фокальной сферы [12]. “Точность” определения ориентации осей напряжений в сейсмических источниках БРЗ классифицируется в виде идентификаторов А, Б и В [12,17]. Если разброс параметров осей напряжений не превышает

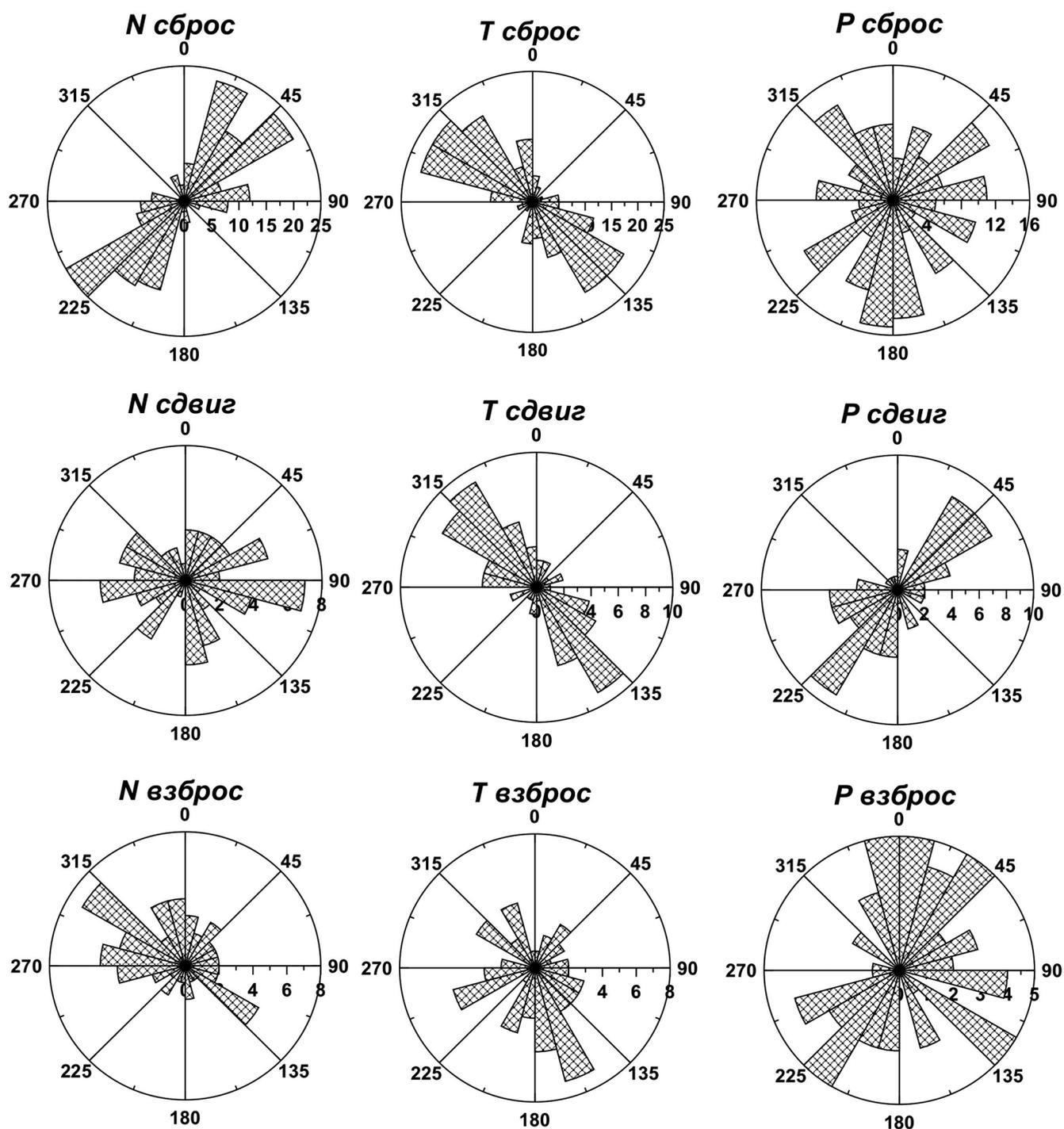


Рис. 7. Круговые диаграммы азимутов осей главных напряжений по данным о толчках- сбросах, сдвигах и взбросах.

$\pm 10^\circ$, но тип ориентации осей напряжений остается неизменным, то такие решения относятся к классу точности А. Класс Б идентифицирует решения, при которых изменения параметров происходят в пределах $\pm 15-25^\circ$, однако тип ориентации осей напряжений при этом остается неизменным. Изменение параметров, приводящее к смене ориентации

осей напряжений, но не влияющее на тип подвижки в очаге землетрясения, приводит к решению с классом точности В. Неоднозначным считается решение, при котором характер смещений в очаге может измениться. По мнению авторов [12] подобный подход к оценке точности полученных решений является достаточно строгим, так как выбраковыва-

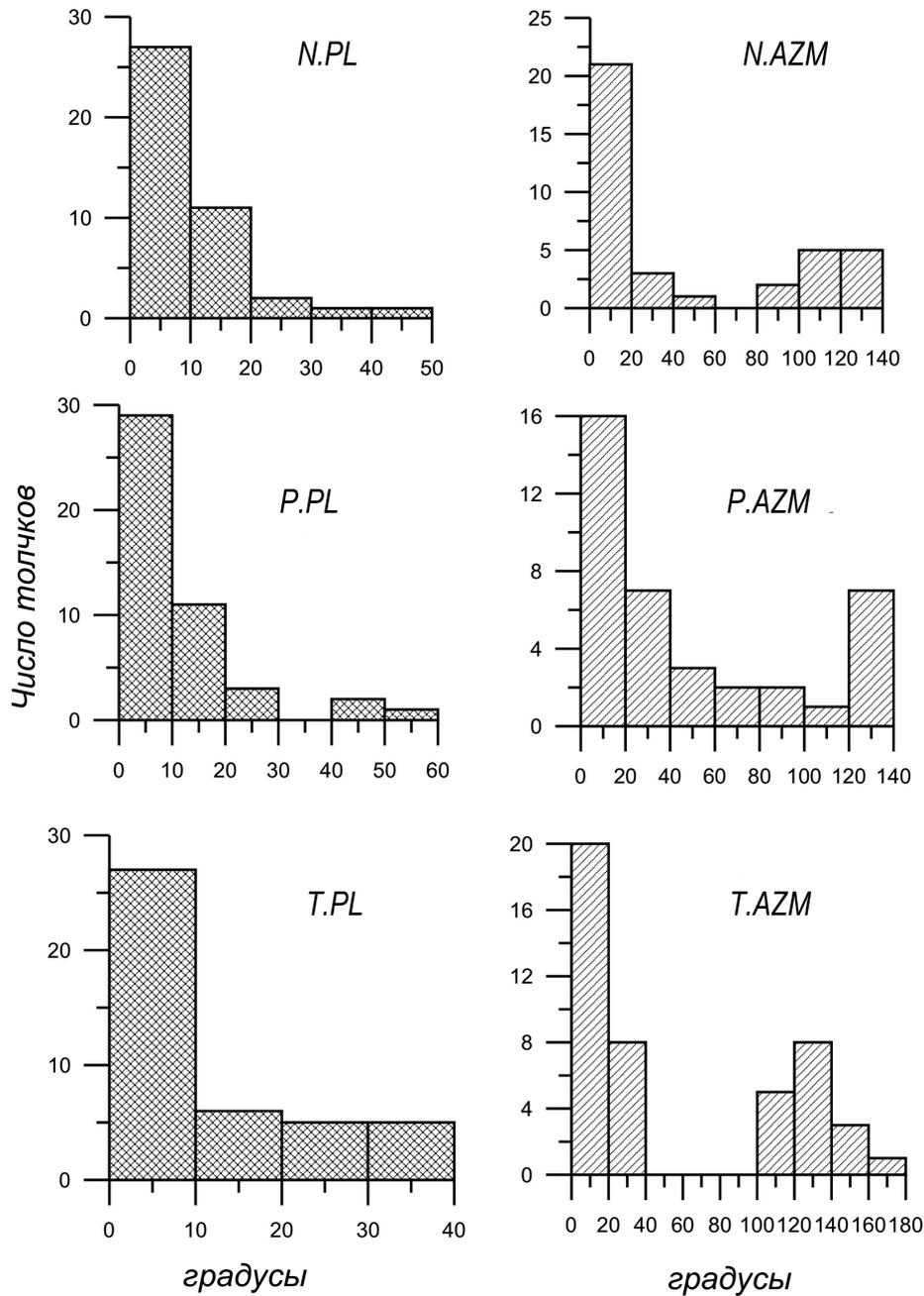


Рис. 8. Гистограммы относительных отличий в параметрах осей главных напряжений.

ются все ненадежные определения, которые составляют больше половины всех выполненных решений. Следует отметить, что в такой интерпретации идентификаторы А, Б, В не имеют прямого отношения к точности методики определения параметров очага. Эти идентификаторы характеризуют наблюдаемый разброс параметров относительно полученных интерпретаторами решений, обусловленный многими факторами, основные из которых перечислены выше. Так как опыт интерпретаторов оказывает влияние на выбор решений [12], то существенную информацию о рассеянии параметров может

дать анализ отличий, имеющих место при выполнении независимых решений фокальных механизмов разными экспериментаторами. В Прибайкалье имеется возможность оценить отличия в решениях фокальных механизмов, поскольку для 47 землетрясений параметры определены двумя группами интерпретаторов [2–4] и [12, 17]. На рис. 8 и 9 представлены гистограммы относительных отличий в параметрах осей главных напряжений и нодальных плоскостей, полученные при сопоставлении решений механизмов этих 47 землетрясений. У почти 60% толчков отклонения в *PL* и *DP* не превышают 10° , но мак-

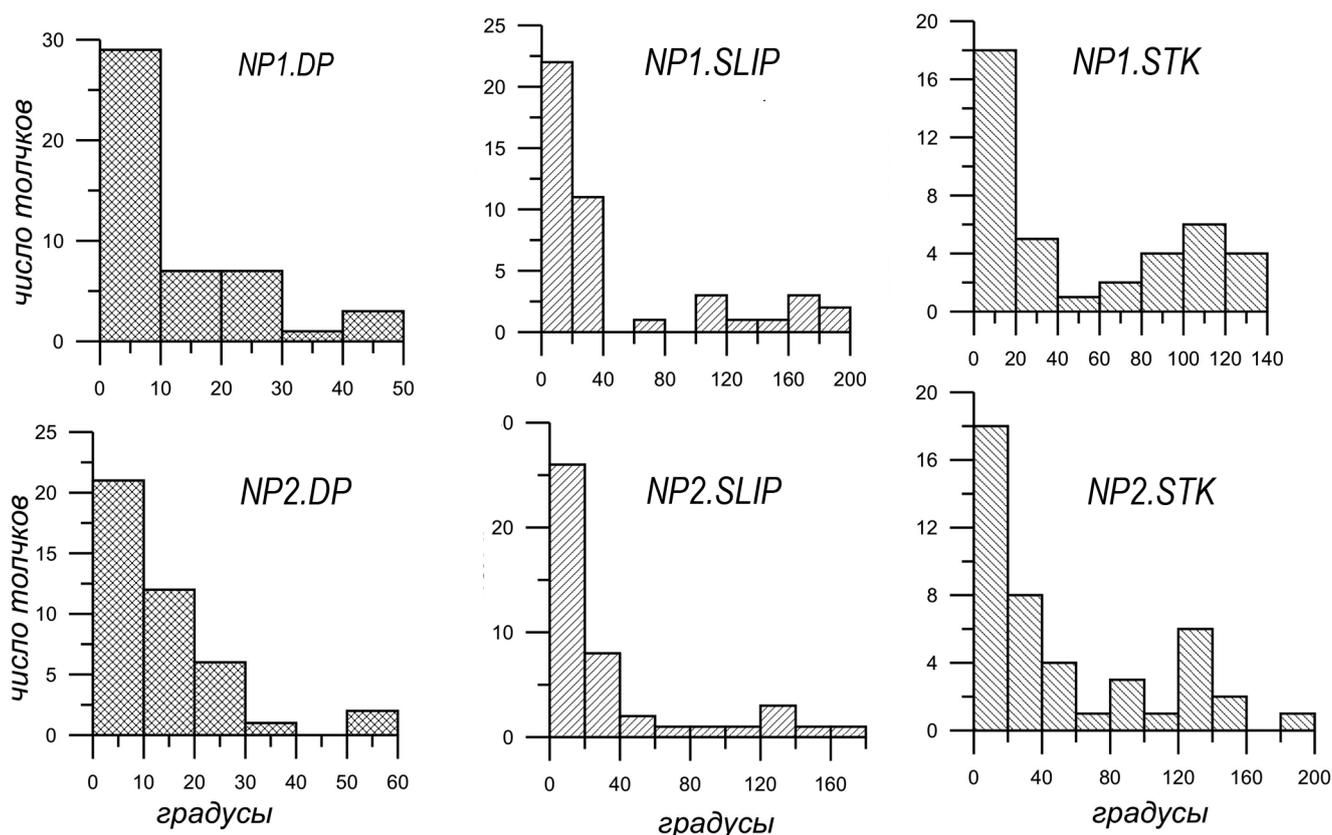


Рис. 9. Гистограммы относительных отличий в параметрах нодальных плоскостей.

симальные отличия достигают $50\text{--}60^\circ$. Около 50% толчков имеют отклонения в *AZM* и *STK* до 20° , однако в диапазоне $100\text{--}140^\circ$ наблюдается второй максимум. Около 70% толчков имеют отклонения до 40° в *SLIP*, но максимальные отличия достигают 180° .

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты реконструкции напряженного состояния литосферы БРЗ по имеющейся выборке фокальных механизмов землетрясений показали, что в пределах территорий, обеспеченных данными при числе толчков $n \geq 3$ в площадке осреднения $1.5 \times 1.5^\circ$, доминирует режим рифтогенеза с формированием толчков-сбросов при плотности вероятности $P_N \geq 0.5$. Локальные области повышенной плотности вероятности сдвигов и взбросов обычно не достигают уровня $P \approx 0.5$ и отражают неоднородность НДС среды. Исключение составляет зона повышенной плотности вероятности сдвигов $P_S \geq 0.5$ на юге региона, сформированная преимущественно Могодским землетрясением и его афтершоками. Как известно, под афтершоками понимается пространственно-временной кластер причинно связанных между собой сейсмических событий, не являющихся самостоятельными в сейсмическом процессе, а обусловленных последствием глав-

ного землетрясения. Принципиальное отличие афтершоков и землетрясений фоновой сейсмичности заключается в том, что афтершоковая серия толчков является совокупностью событий “обусловленных” [18]. Фокальные механизмы афтершоков обусловлены перераспределением напряжений и деформаций в очаговой области главного землетрясения (временно наведенное локальное состояние) и по этой причине не могут быть использованы для характеристики регионального поля напряжений. В таком случае зону повышенной плотности вероятности сдвигов $P_S \geq 0.5$ на юге региона (рис. 2) можно считать артефактом.

Результаты анализа указывают на существование структуры и основных закономерностей фокальных механизмов, которые для общей выборки материалов формируются преобладающими в количественном отношении толчками-сбросами. Разделение выборки на толчки-сбросы, сдвиги и взбросы позволило выявить как значимые отличия, так и близкие совпадения фокальных параметров толчков с разными типами подвижки в очаге. Совпадение средних углов падения DP_{aver} , средних модулей *SLIP* и азимутов простираания *STK* взбросов и сбросов не исключает возможности подвижек таких типов по плоскостям одних разломов. Средние углы падения для подвижек разных типов

превышают 50° , что свидетельствует о достаточно крутом погружении зон разломов и проблематичности гипотезы смещений по листрическим разломам. Это согласуется с тем, что в рифтовых зонах большинство разломов имеет углы падения сместителей $50\text{--}90^\circ$, то есть углы, достаточно близкие к вертикали [22]. **Вариации углов погружения осей главных напряжений** в совокупности со значительными стандартными отклонениями свидетельствуют о существенной пространственной неоднородности НДС литосферы Прибайкалья. Это находится в согласии с фактами группировки в одной и той же области или в перекрывающихся областях землетрясений с разными механизмами очагов [14] и пространственно-временной неустойчивостью НДС литосферы БРЗ [7].

ВЫВОДЫ

В результате статистической обработки фокальных параметров 335 сильных землетрясений с энергетическим классом $K_p \geq 10$, произошедших в Прибайкалье с 1950 по 1998 гг, оценена пространственно-временная и энергетическая представительность материалов, проанализирована структура параметров, установлены их средние распределения в целом по выборке и с учетом типа подвижки в очаге. Установлено, что недостаточно полно обеспечены материалами территории, граничащие с Монголией, Алтае-Саянской областью и Якутией, а число ежегодных определений фокальных механизмов изменяется от 0 до 25 со средним уровнем около шести толчков в год. Данные фокальных механизмов отражают малую часть сильных землетрясений региона и не могут считаться представительными (более 50%) для толчков с $K_p \leq 13$. В зоне представительной обеспеченности данных доминирует режим рифтогенеза с формированием толчков-сбросов; плотности вероятности сдвигов и взбросов не достигают уровня $P \approx 0.5$ и характеризуют области повышенной неоднородности НДС среды. Структура и основные закономерности полной выборки фокальных механизмов формируются преобладающими в количественном отношении толчками-сбросами. При разделении выборки на толчки-сбросы, сдвиги и взбросы выявлены как значимые отличия, так и близкие совпадения фокальных параметров толчков с разными типами подвижки в очаге. Соответствие средних углов падения DP_{avers} , средних модулей $SLIP$ и азимутов простирания STK взбросов и сбросов не исключает возможности подвижек таких типов по плоскостям одних разломов. Средние углы падения для подвижек разных типов превышают 50° , что свидетельствует о достаточно крутом погружении зон разломов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Введенская А.В.* Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 134 с.
2. *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.
3. *Голенецкий С.И., Дреннова Г.Ф.* Каталог механизмов очагов землетрясений Прибайкалья и Забайкалья // Землетрясения в СССР (за 1985–1990, 1991 гг.). М.: Наука. 1988–1991, 1997.
4. *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.
5. *Дядьков П.Г., Мельникова В.И., Назаров Л.А., Назарова Л.А., Саньков В.А.* Сеймотектоническая активизация Байкальского региона в 1989–1995 годах: результаты экспериментальных наблюдений и численное моделирование измененных напряженно-деформированного состояния // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 3. С. 373–386.
6. *Ключевский А.В.* Особенности напряженно-деформированного состояния земной коры Байкальского региона // Докл. АН. 2003. Т. 389, № 3. С. 398–403.
7. *Ключевский А.В.* Напряжения и сейсмичность на современном этапе эволюции литосферы Байкальской рифтовой зоны // Физика Земли. 2007. № 12. С. 14–26.
8. *Ключевский А.В., Демьянович В.М.* Напряженно-деформированное состояние литосферы в центральной части Байкальского региона по данным о сейсмических моментах землетрясений // Литосфера. 2004. № 4. С. 30–43.
9. *Ключевский А.В., Демьянович В.М.* Напряженное состояние среды в литосфере Байкальской рифтовой зоны по данным о сейсмических моментах сильных землетрясений // Докл. АН. 2007. Т. 417, № 2. С. 245–250.
10. *Ключевский А.В., Демьянович В.М., Джурик В.И.* Иерархия сильных землетрясений Байкальской рифтовой системы // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 3. С. 279–288.
11. *Мельникова В.И.* Напряженно-деформированное состояние Байкальской рифтовой зоны по данным о механизмах очагов землетрясений. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2001. 16 с.
12. *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.
13. *Мишарина Л.А.* Напряжения в очагах землетрясений Монголо-Байкальской зоны // Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука, 1972. С. 161–171.
14. *Мишарина Л.А.* Об особенностях ориентации возможных поверхностей разрывов в очагах слабых землетрясений Байкальского рифта // Геология и геофизика. 1979. № 3. С. 145–149.

15. Мишарина Л.А., Солоненко Н.В. О напряжениях в очагах слабых землетрясений Прибайкалья // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1972. № 4. С. 24–36.
16. Современная динамика литосферы континентов / Отв. ред. Н.А. Логачев. М.: Недра, 1995. 560 с.
17. 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.
18. Солоненко Н.В., Солоненко А.В. Афтершоковые последовательности и рои землетрясений в Байкальской рифтовой зоне. Новосибирск: Наука, 1987. 93 с.
19. Сычева Н.А., Аладьев А.В., Мухамадиева В.А., Юнга С.Л. Изучение фокальных механизмов очагов по данным сети КНЕТ // Геодинамика и геозологические проблемы высокогорных районов. Москва–Бишкек: ИФЗ, 2003. С. 241–253.
20. Brune J.N., Thatcher W. Strength and energetics of active fault zones // International handbook of earthquake and engineering seismology / Ed. W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, C. Kisslinger. Amsterdam: Academic Press. Part A, 2002. P. 560–569.
21. 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.
22. Sibson R.H. Geology of the crustal earthquake source // International handbook of earthquake and engineering seismology. Amsterdam: Academic Press. Part A. 2002. P. 455–473.
23. 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.

Рецензент В.Б. Писецкий

Focal parameters of large earthquakes in Baikal region: representativity, structure and basic trends

A. V. Klyuchevskii

Institute of the Earth Crust, Siberian Branch of RAS

The estimate has been made for spatiotemporal and energetic representativity of the sample comprising 335 focal mechanisms of large earthquakes that occurred in Baikal region from 1950 to 1998. It has been determined that a lack of data exists for the areas bordering Mongolia, Altai-Sayan area and Yakutia, and a number of annual mechanism determinations varies from 0 to 25 at an average about six shocks per year. The focal mechanism solutions account for only a small fraction of large earthquakes in the region and cannot be considered representative (more than 50%) for the shocks from energy class $K_p \leq 13$. Basic trends in mechanisms of complete sample are formed by quantitatively prevailing normal-fault shocks. The correlation between average dips DP_{aver} , average moduli $SLIP$ and strike azimuths STK of reverse faults and normal faults show the probability of such types of movements only along the fault planes. The average dips for movements of different types exceed 50° that is indicative of rather steep gradient of subsidence in the fault zones.

Key words: *Baikal region, large earthquakes, focal mechanisms, data representativity, basic trends.*