

УДК 550.34

ФОКАЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НЕСБРОСОВОГО ТИПА В ЮЖНО-БАЙКАЛЬСКОЙ ВПАДИНЕ

Н.А. Радзиминович

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

Анализируются механизмы очагов землетрясений нетипичные для Южно-Байкальской впадины, находящейся под воздействием растяжения земной коры в СЗ-ЮВ направлении. Под нетипичными механизмами понимаются фокальные решения сдвигового и взбросового типа, а также решения со сбросовыми подвижками по плоскостям СЗ простирания, поперечного основным структурам впадины. При доминировании сбросов по плоскостям СВ простирания 29 % решений из выборки фокальных механизмов показывают на несбросовой тип смещений в очагах, из которых на сдвиги и их комбинации с другими типами смещений (сбросо- или взбрососдвиги) приходится 18 % и на взбросы (включая сдвиговзбросы) — 11 %. Их реализация происходит преимущественно по плоскостям СЗ простирания, а также по субмеридиональным и субширотным, при этом для сдвиговых подвижек характерно правостороннее смещение по СЗ и субмеридиональным плоскостям и, соответственно, левостороннее смещение по субширотным и малочисленным СВ плоскостям. Землетрясения с нетипичными механизмами распределены практически по всей впадине, но необходимо отметить увеличение их числа на юго-западном замыкании впадины (Култукский сегмент) и в восточном борту Центральной котловины. В действующем поле растяжения земной коры поперечные сдвиги играют роль трансферных разломов, аккомодируя различия в скоростях и векторах деформаций локальных блоков в пределах впадины, и в региональном масштабе между соседними рифтовыми впадинами.

Землетрясение, механизм очага, Байкальский рифт, Южно-Байкальская впадина

EARTHQUAKE FOCAL MECHANISMS OF NON-NORMAL TYPE IN THE SOUTH BAIKAL BASIN

N.A. Radziminovich

Earthquake focal mechanisms that are atypical for the South Baikal basin, which is under the extension of the Earth's crust in the NW-SE direction, are analyzed. Atypical mechanisms are understood as focal solutions of strike-slip and reverse fault types, as well as solutions with normal fault movements along NW-trending planes transverse to the main structures of the basin. Whereas normal faults along NE-trending planes dominate, 29% of solutions from the sample of focal mechanisms are of non-normal fault type, of which 18% account for strike-slip faults and their combinations with other types of displacements (with a normal or reverse component) and reverse faults (with a strike-slip component) – 11%. Such displacements occur predominantly along NW-trending planes, as well as along submeridional and sublatitudinal ones, and strike-slip movements are characterized by right-lateral displacement along NW and submeridional planes, and, accordingly, left-lateral displacement along sublatitudinal and some NE planes. Earthquakes with atypical mechanisms are distributed almost throughout the entire basin, but it is necessary to note an increase in their number on its southwestern termination (the Kultuk segment) and on the eastern side of the Central Basin. In the current field of crustal extension, transverse shears play the role of transfer faults, accommodating differences in the rates and vectors of deformation of local blocks within the basin, and on a regional scale between neighboring rift basins.

Earthquake, focal mechanism, Baikal rift, South Baikal basin

ВВЕДЕНИЕ

Южно-Байкальская впадина, являясь «историческим ядром» Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) [Логачев, 2001], характеризуется высоким уровнем сейсмической активности. С конца 50-х—начала 60-х годов прошлого столетия, с развитием региональной сети наблюдений, стало возможным определение параметров очагов землетрясений, в том числе их механизмов. Фокальный механизм — одна из основных характеристик землетрясения; он описывает геометрию предполагаемого разрыва и кинематику смещения по нему, а также ориентацию осей напряжений, действующих в очаговой области.

Механизмы очагов землетрясений для всей БРЗ, включая Южно-Байкальскую впадину, рассматривались в многочисленных работах [Введенская, 1961; Мишарина, 1963; Мишарина, Солоненко, 1972, 1977; Golenetsky, Misharina, 1978; Солоненко и др., 1996; Solonenko et al., 1997; Мельникова, Радзими-

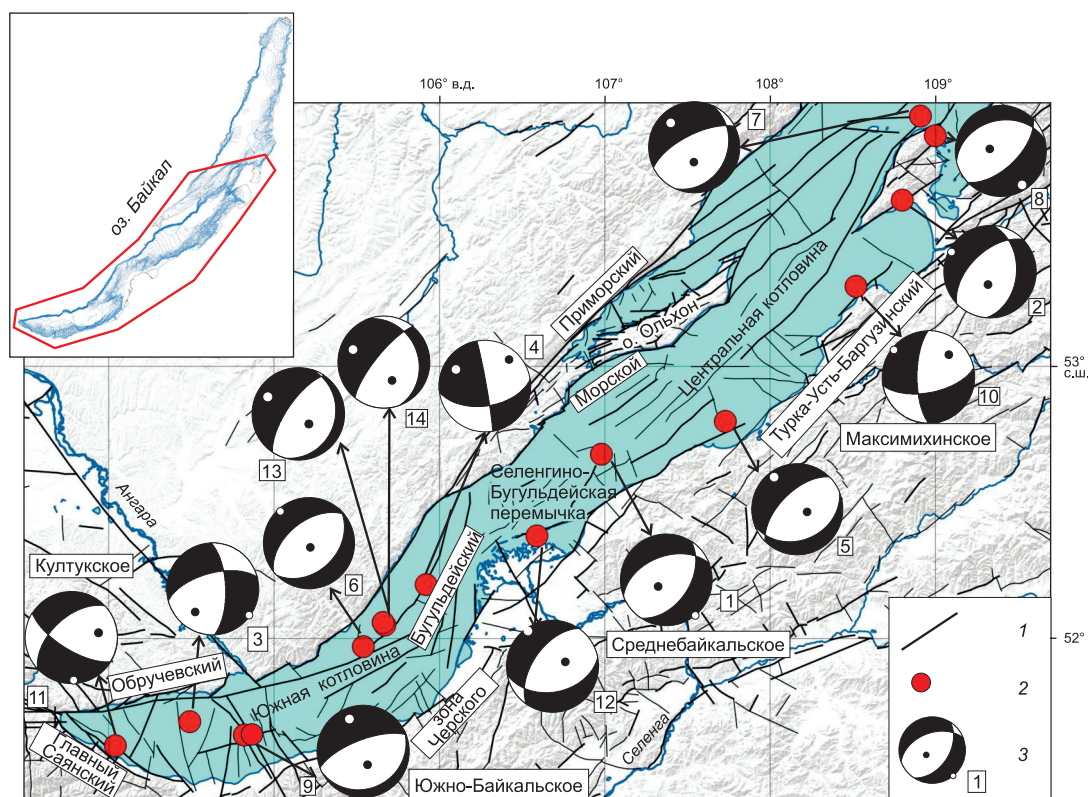


Рис. 1. Механизмы очагов землетрясений Южно-Байкальской впадины с $K \geq 13.5$.

1 — разломы по базе данных activetectonics.ru [Лунина, 2016]; 2 — эпицентры землетрясений с $K \geq 13.5$; 3 — стереограммы механизмов очагов в нижней полусфере. Номера механизмов соответствуют табл. 1. Подписаны землетрясения, упоминаемые в тексте. На врезке в левом верхнем углу — батиметрическая схема озера, по данным [De Batist et al., 2002].

нович, 1998; Мельникова, 2001; Радзиминович и др., 2006; Мельникова и др., 2013; Середкина, Мельникова, 2014]. На их основе было восстановлено поле тектонических напряжений и оценены параметры сеймотектонических деформаций [Кучай, 1990; Солоненко, 1993; Petit et al., 1996; Delvaux et al., 1997; Sankov et al., 1997; Мельникова, 2001; Парфеев и др., 2002; Мельникова, Радзиминович, 2007; Саньков, Добрынина, 2015; Karagianni et al., 2015; Radziminovich et al., 2016; Sankov, Dobrynina, 2018; Seredkina, Melnikova, 2018; Ребецкий и др., 2023; и др.]. Установлено, что Южно-Байкальская впадина находится в условиях растяжения земной коры, что подтверждается результатами долговременных GPS измерений [Саньков и др., 2014], согласно которым скорость дивергенции Сибирского и Забайкальского блоков составляет 3.4 ± 0.7 мм/год в ЮВ направлении (130°). С этим направлением совпадает ориентация оси минимального сжатия (134°), восстановленная по данным о фокальных механизмах в пределах центральной части впадины [Радзиминович, 2019].

По данным о фокальных механизмах, большинство землетрясений вызваны сбросообразованием по плоскостям ЮЗ-СВ простирания с углами падения $30\text{--}60^\circ$ в соответствии с простиранием основных геологических структур. Такой тип фокальных решений часто называют «байкальским». Примером «байкальского» типа фокального механизма является решение для сильнейшего за инструментальный период наблюдений Среднебайкальского землетрясения (рис. 1). Тем не менее во впадине отмечаются землетрясения с другими механизмами очагов. В данной работе предпринята попытка оценить соотношение механизмов очагов разного типа в пределах впадины, эпицентральное распределение и приуроченность «небайкальских» фокальных решений к геологическим структурам или разломам, их энергетическую представимость и роль в перераспределении деформаций в условиях регионального растяжения. Под «небайкальским» типом фокального механизма в данной работе понимаются решения несбросового кинематического типа, также внимание уделяется сбросовым подвижкам по плоскостям СЗ простирания, поперечным основным байкальским структурам.

Южно-Байкальская впадина является полуграбеном, северо-западный борт которого ограничен крутопадающими разломами. В морфоструктурном отношении впадина состоит из Южной и Центральной котловин, разделенных Селенгино-Бугульдейской тектоноаккумулятивной перемычкой. В пределах

этих крупных структурных элементов выделяется ряд более мелких [Levi et al., 1997; Леви и др., 2005], ограниченных разломами. Северо-западный борт Южной котловины ограничен Обручевским сбросом, центральная часть впадины с запада ограничена Приморским разломом, идущим вдоль сухопутного Приольхонского блока, тогда как берег и восточный склон о. Ольхон контролируются Морским разломом. Вдоль восточного борта Южно-Байкальской впадины трассируется зона Черского, непротяженные разломы которой не образуют единой линейной системы, а расположены кулисообразно. К западному борту впадины примыкает Главный Саянский разлом СЗ простирания. Внутривпадинные разломы были выделены по данным сейсмического профилирования и батиметрических данных [Леви и др., 2005; Лунина и др., 2010; Семинский и др., 2022; и др.]. Активные разломы трассируются эпицентрными зонами, при этом для южной части впадины характерны протяженные линейные зоны, а в пределах центральной части конфигурация эпицентрального поля усложняется. Протяженным зонам свойственна сегментация или дискретность. Поперечные зоны выделяются менее однозначно, по протяженности они гораздо короче основных [Радзиминович, 2019]. Наряду с относительно четко локализованными зонами с концентрированной сейсмичностью выделяются области с рассеянным характером распределения эпицентров, также наблюдаются несколько сейсмических брешей, представляющих собой, по-видимому, блоки, ограниченные сейсмоактивными разломами. Зонно-блоковая структура, подразумевающая контакт слабонарушенных блоков по широким зонам с высокой плотностью разрывов, была выделена и для осадочной толщи Центральной котловины в результате тектонофизического анализа геофизических и гидроакустических данных [Семинский и др., 2022]. Мощность кайнозойских осадочных отложений здесь достигает 7—9 км [Hutchinson et al., 1992; Scholz et al., 1993]. Сейсмичность концентрируется главным образом в фундаменте впадины: наибольшая концентрация очагов приходится на диапазон глубин 10—22 км [Суворов, Тубанов, 2008].

Анализ нетипичных фокальных решений может выявить, как происходит деформирование внутренней гетерогенной структуры рифта в общей обстановке растяжения. Сопоставление геологических и сейсмологических данных способствует решению ряда проблем, затрагивающих геометрию и кинематику разломов, что особенно актуально для Южно-Байкальской впадины, где внутривпадинные разломы скрыты под водами оз. Байкал и мощным осадочным слоем.

ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для анализа выбраны фокальные решения землетрясений с эпицентрами в пределах Южно-Байкальской впадины за 1959—2017 гг. и механизмы очагов землетрясений с $K_p \geq 13$ за 2018—2022 гг. Решения взяты из работ [Солоненко и др., 1993; Мельникова, Радзиминович, 1998], каталогов механизмов очагов землетрясений Прибайкалья и Забайкалья, опубликованных в ежегодниках «Землетрясения Северной Евразии» (<http://www.ceme.gsras.ru/zse/>) и «Землетрясения в России» (<http://www.ceme.gsras.ru/zr/>) (авторы-составители: В.И. Мельникова, Н.А. Гилева, Н.А. Радзиминович, А.В. Ландер, А.И. Середкина (Филиппова), А.А. Добрынина, Н.В. Татомир). История определения механизмов очагов землетрясений в БРЗ и, в частности, для Южно-Байкальской впадины восходит к работам [Введенская, Балакина, 1960; Балакина и др., 1968], соответственно, большая часть решений получена методом полярности первых вступлений. С 2007 г. определение механизмов на основе знаков вступлений P -волн осуществляется по программе FA [Ландер, 2006]. Для некоторых событий с $M \geq 4.5$ получены решения тензора сейсмического момента по поверхностным волнам с привлечением знаков вступлений P -волн на региональных станциях [Середкина, Мельникова, 2014]. Землетрясения с $M \geq 5$ обеспечены решениями мировых агентств: NEIC USGS, GCMT, GFZ и т. д. Полученная выборка состоит из фокальных решений для 345 событий.

Как видно из рис. 2, регулярное определение механизмов началось с 90-х годов прошлого столетия, а с 2000-х годов число определений значительно выросло. Росту числа решений способствовал переход на цифровую регистрацию и, соответственно, более уверенное взятие знаков вступлений волн P_n и P_g . Фокальные механизмы для афтершоков сильнейших толчков были определены благодаря функционированию временных станций. Нижний энергетический порог землетрясений в выборке составляет энергетический класс по номограмме Раутиан $K = 8$. Для всех относительно сильных землетрясений, с $K \geq 13.5$, имеются определения механизмов очагов, за исключением афтершока с $K = 13.7$ Южно-Байкальского землетрясения 1999 г. с $M_w = 6.0$, который произошел через 13 мин после главного толчка, что затруднило взятие знаков первых вступлений. Представительность землетрясений с имеющимися фокальными решениями показана на рис. 3.

Подразделение по кинематическому типу осуществлялось на основе угла скольжения (обозначаемого как SLIP или RAKE). Под «чистыми» сдвигами подразумеваются смещения по простиранию без вертикальной компоненты, с углами смещения 0—30° для левостороннего сдвига и 150—180° для правостороннего. И наоборот, смещения по падению без горизонтальной компоненты, т. е. с углами 60—



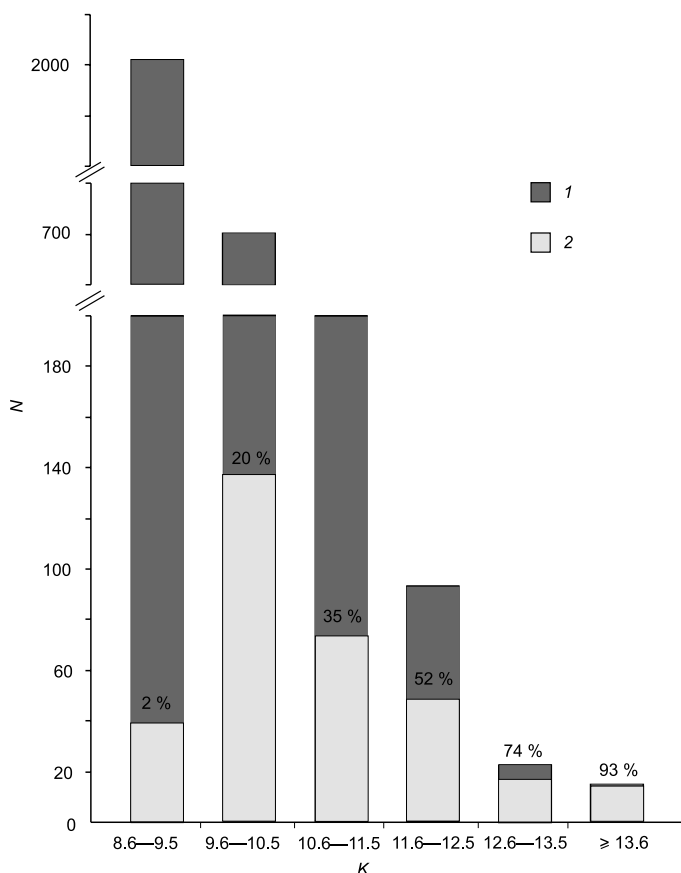
Рис. 2. Количество определений фокальных механизмов по годам.

Стрелками указаны года, когда произошли сильные землетрясения с многочисленными афтершоками.

120°, определяются как «чистые» сбросы или взбросы. Остальные решения классифицируются как комбинированные, например, сбрососдвиги или сдвигосбросы. Такое подразделение достаточно условное, но позволяет проводить формализованную оценку кинематического типа подвижек. При этом следует учесть, что точность определения для большинства механизмов байкальских землетрясений, полученных с использованием знаков первых вступлений P -волн, оценивается как максимальное отклонение от значений параметров осей напряжений (T , N , P). При классе точности a это отклонение не превышает 10°, при b — 15°, c — 25°.

Следует отметить, что для фокальных механизмов Южно-Байкальской впадины не проводится процедура дискриминации нодальных плоскостей на рабочую и вспомогательную. Только для нескольких сильнейших событий удалось определить «истинную» плоскость смещения, основываясь на распределении афтершоков и информации о сеймотектонической позиции очага. Для подавляющего же большинства решений (при «байкальском» типе) обе нодальные плоскости имеют близкое простирание,

угол падения, тип смещения, различаясь лишь азимутом падения плоскости, поэтому выбрать рабочую плоскость затруднительно. Трудности возникают и в случаях, когда одна плоскость типичная сбросовая, а вторая — нетипичная. В связи с этим при анализе соотношения разных кинематических типов использовались не сами механизмы, а нодальные плоскости.



РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассмотрим механизмы очагов сильных землетрясений с $K \geq 13.5$ (табл. 1). Сильнейшее событие в Южно-Байкальской впадине за инструментальный период, Среднебайкальское землетрясение с $M_{LN} = 6.8$, характеризовалось сбросовой подвижкой по одной из плоскостей СВ простирания с углом падения 48°. Большая часть остальных механизмов имеет

Рис. 3. Энергетическая представительность землетрясений с имеющимися механизмами очагов.

1 — количество землетрясений данного энергетического класса; 2 — количество и процентное соотношение землетрясений, для которых определены фокальные механизмы.

Таблица 1. Параметры землетрясений Южно-Байкальской впадины с $K \geq 13.5$ по региональным данным и по данным тензора момента центра Global Centroid Moment Tensor (GCMT, при наличии)

№ п/п	Год, месяц, число	с.ш.	в.д.	H, км	K	M _w	STK	DIP	SLIP	Источник
		град.								
1	1959.08.29	52.68	106.98	—	16.0	6.8*	33	48	−116	[Солоненко и др., 1993]
2	1961.10.28	53.60	108.80	—	14.0	—	226	56	−63	»
3	1966.08.30	51.69	104.49	—	14.0	—	255	62	−26	»
4	1970.03.28	52.20	105.92	—	14.0	—	82	54	4	»
5	1972.08.09	52.80	107.73	—	14.0	—	225	60	−102	»
6	1981.05.22	51.97	105.54	—	14.0	—	231	52	−86	»
				29.0	—	5.4	227	74	−81	GCMT (http://www.globalcmt.org/)
7	1981.05.27	53.90	108.91	—	14.0	—	243	68	−73	[Солоненко и др., 1993]
8	1992.02.14	53.83	109.00	—	13.9	—	256	34	−64	[Мельникова, Радзиминович, 1998]
				20.0	—	5.3	249	33	−65	GCMT
9	1999.02.25	51.64	104.82	—	14.6	—	249	70	−88	[Radziminovitch et al., 2005]
				21.0	—	5.9	241	54	−93	GCMT
10	2008.05.20	53.29	108.52	12.7	14.3	5.2	79	62	−23	[Мельникова и др., 2014]**
				19.0	—	5.3	74	74	−21	GCMT
11	2008.08.27	51.59	104.04	14.1	15.9	—	227	56	−154	[Radziminovitch et al., 2016]**
				23.5	—	6.3	215	55	−146	GCMT
12	2020.12.09	52.38	106.59	22.0	13.9	—	71	71	−74	[Габсатарова и др., 2022]
				20.3	—	5.5	215	56	−118	GCMT **
13	2022.06.08	52.06	105.67	22.2	14.3	5.2	225	67	−74	GCMT
14	2022.10.14	52.06	105.68	27.4	14.0	5.4	218	76	−68	»

Примечание. Координаты и класс даны по региональному каталогу Байкальского филиала ФИЦ ЕГС РАН (<https://seis-bykl.ru/index.php>). Методология определения GCMT дана в [Dziewonski et al., 1981]. STK — азимут простирации плоскости, DIP — угол падения плоскости, SLIP — угол скольжения по плоскости.

* M_{LH} .

** Механизм очага, показанный на рис. 1, при наличии регионального решения и решения GCMT.

схожее решение, но четыре землетрясения отличаются преобладанием или наличием сдвиговой компоненты (см. рис. 1). Это землетрясение 1966 г. с $K = 14$, произошедшее в Култукской депрессии Южно-Байкальской впадины, в фокальном механизме которого по плоскости СВ простирации определено левостороннее смещение. В очаге 1970 г. также с $K = 14$ реализовались чисто сдвиговые подвижки: по субширотной плоскости левосдвиговые и по меридиональной плоскости правосдвиговые. Выбор плоскости в данном случае неочевиден, поскольку пространственно эпицентр локализован между Бугульдейским разломом и разломами, ограничивающими авандельту Селенги, имеющими преимущественно СВ простирацию. Однако в данном месте Бугульдейский разлом меняет простирацию с СВ на ССВ, так что в качестве «рабочей» плоскости можно предположить меридиональную плоскость. Максимихинское землетрясение 2008 г. с $M_w = 5.3$ произошло у восточного борта Центрального Байкала и сопровождалось многочисленными афтершоками. Борт впадины характеризуется блоковым строением и контролируется Турка-Усть-Баргузинским разломом СВ простирации, но, как и в предыдущем случае, нодальные плоскости в фокальном решении главного толчка и некоторых его афтершоков ориентированы меридионально и субширотно. Механизм очага главного толчка представлен сдвиговой подвижкой с небольшой сбросовой составляющей. Култукское землетрясение 2008 г. с $M_w = 6.3$ является вторым по силе толчком, зарегистрированным инструментально. Оно произошло на ЮЗ замыкании впадины и связывается с подвижкой по одной из ветвей Главного Саянского разлома СЗ простирации, ограничивающего здесь борт впадины. Эпицентральное поле афтершоков в первые сутки после главного толчка также вытягивалось вдоль данной структуры. В фокальном решении Култукского землетрясения для «рабочей» плоскости СЗ или субширотного простирации тип смещения в разных источниках определяется либо как сдвиго-сброс либо как сбросо-сдвиг. В данном анализе предпочтение отдается решению из работы [Radziminovich et al., 2016], где для лучшего азимутального покрытия станциями в дополнение к региональным данным использовались записи станций Монгольской национальной сети. Согласно

Таблица 2. **Распределение плоскостей с разным кинематическим типом смещений по простиранию в процентах**

Тип смещения	СВ-ЮЗ	СЗ-ЮВ	З-В	Ю-С
Сброс*	88	31	62	58
Сдвиг*	7	45	29	31
Взброс (надвиг)*	5	24	9	11

*Здесь каждому типу соответствуют, в том числе подвижки в комбинации смещений по падению и по простиранию, например, к сбросам относятся как сбросы, так и сдвиго-сбросы; к сдвигам — сдвиги, сбросо-сдвиги и взбросо-сдвиги; к взбросам — взбросы и сдвиго-взбросы.

этому решению, по плоскости с азимутом простирания 122° и углом падения 69° реализовался левосторонний сбросо-сдвиг. Вторая, «вспомогательная» нодальная плоскость, ориентированная на СВ-ЮЗ, характеризовалась также сбросо-сдвиговым смещением.

В целом для всей выборки 71 % нодальных плоскостей характеризуется смещениями сбросового и сдвиго-сбросового типа, остальные 29 %, соответственно, являются сдвигами, взбросами (или надвигами в зависимости от угла падения плоскости), взбросо- или сбросо-сдвигами, сдвиго-взбросами. При этом на «чистые» сбросы приходится 52 % плоскостей, на «чистые» взбросы — 5 %, на «чистые» сдвиги — 11 %. По выделившейся сейсмической энергии наибольший вклад вносят сбросы, что обусловлено подавляющим вкладом Среднебайкальского землетрясения 1959 г. с $M_{LH} = 6.8$. Однако сдвиговое смещение при Култукском землетрясении 2008 г. с $M_w = 6.3$ привело к увеличению энергетического вклада в сейсмический процесс землетрясений с нетипичными механизмами до 43 %. Максимальный класс землетрясения взбросового типа равняется 13.1; этот толчок произошел вблизи восточного борта Южной котловины, поблизости от населенного пункта Бабушкин.

Распределение эпицентров землетрясений с механизмами несбросового типа в общих чертах повторяет распределение эпицентров землетрясений Южно-Байкальской впадины. Такие события приурочены как к Южной, так и к Центральной котловинам (рис. 4). Отмечается их концентрация среди афтершоков Максимихинского и Култукского землетрясений, при этом Южно-Байкальская последовательность 1999 г. с $M_w = 5.9$ характеризуется малым количеством нетипичных решений. Также обращает на себя внимание область между Култукским и Южно-Байкальским эпицентрными полями, в которой практически все имеющиеся механизмы имеют в своем решении плоскость несбросового типа. Локализация очагов сдвигового типа показывает три области их концентрации (см. рис. 4, б): в пределах субширотного участка Южно-Байкальской впадины, в области Селенгино-Бугульдейской перемычки и вдоль восточного борта Центрального Байкала. Очаги со взбросовыми подвижками более равномерно распределены по всей впадине (см. рис. 4, а), но следует отметить их скопление среди афтершоков Култукского землетрясения.

Анализ распределения всех нодальных плоскостей по простиранию показывает, что по плоскостям всех румбов, кроме СЗ, доминируют сбросовые смещения при их абсолютном преобладании по плоскостям СВ простирания. По плоскостям СЗ ориентации превалируют сдвиги, взбросы также увеличивают свой вклад (табл. 2). Если же рассматривать ориентацию плоскостей в пределах каждой популяции типов очагов (сбросов, сдвигов, взбросов), то ситуация будет следующей: для сбросов (включая сдвиго-сбросы) выделяется доминирующее простирание СВ-ЮЗ, доля сбросов по плоскостям поперечного простирания не превышает 5 %. Среди сдвигов (включая комбинации с незначительной вертикальной составляющей) распределение азимутов простираний плоскостей более равномерно, при этом наиболее выражено субмеридиональное простирание; СВ направление четко не выделяется, оно ближе к субширотному, также присутствует СЗ простирание. Взбросы показывают значимое распределение в СЗ румбах и меньшее количество, но примерно равномерное распределение по субмеридиональным, субширотным и СВ плоскостям (рис. 5).

Для очагов несбросового типа ориентация оси растяжения мало отличается от типично сбросовых механизмов: ось T ориентирована в СЗ-ЮВ направлении, в то время как ориентация оси сжатия P менее стабильна и варьирует в северо-восточном, субмеридиональном и субширотном направлениях. Углы погружения для оси T меняются от горизонтальных до вертикальных, а ось P приобретает близгоризонтальное и наклонное положение (рис. 6).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поскольку в данной работе анализируются обе нодальные плоскости, то цифра в 29 % с несбросовыми подвижками во всей выборке фокальных механизмов может являться несколько завышенной, за счет того, что в одном решении наряду с плоскостью со сдвиговым или сбросо-сдвиговым смещением

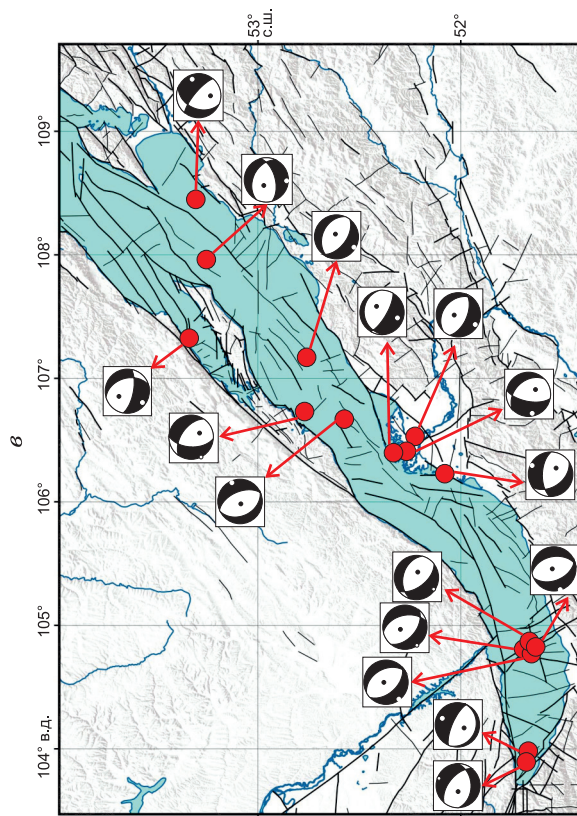
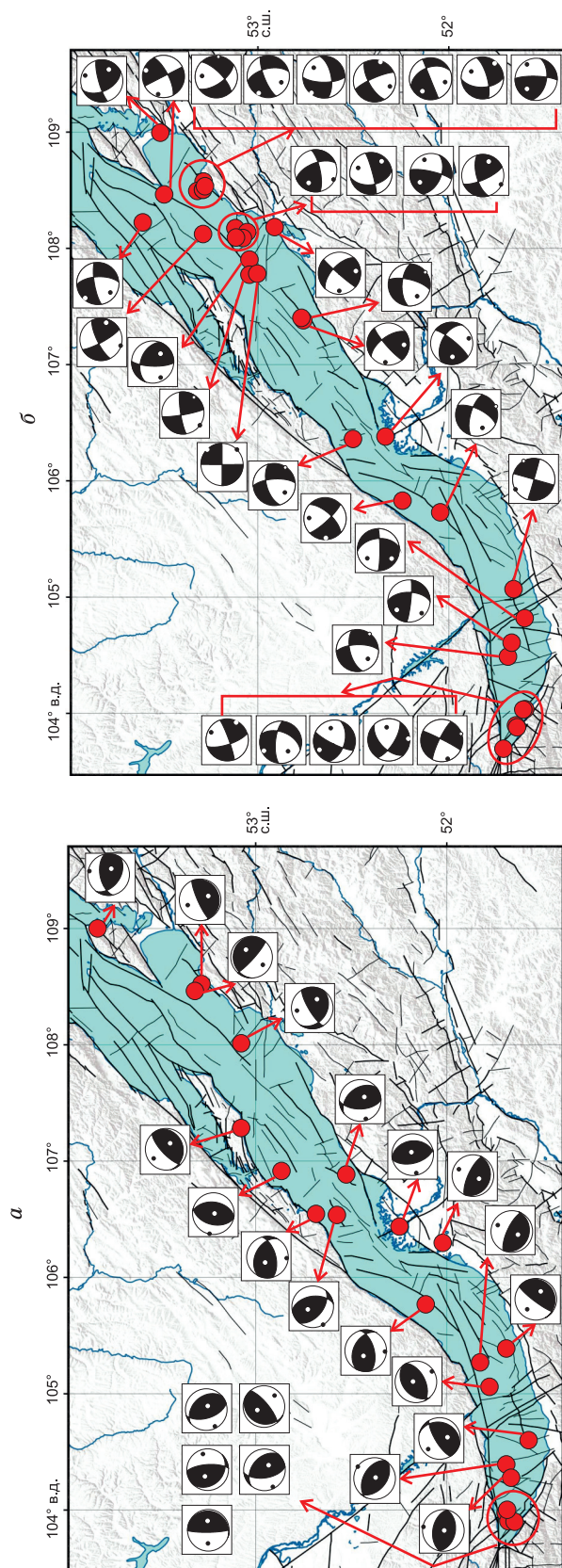


Рис. 4. Механизмы очагов взбросового (а); сдвигового (б) типов; сбросы по плоскостям СЗ простираения (в).

На (а) и (б) показаны решения, где хотя бы одна плоскость является «чистым» взбросом и сдвигом соответственно. Красные кружки — эпицентры землетрясений. Стереодиаграммы фокальных механизмов приведены в проекции нижней полушеры.

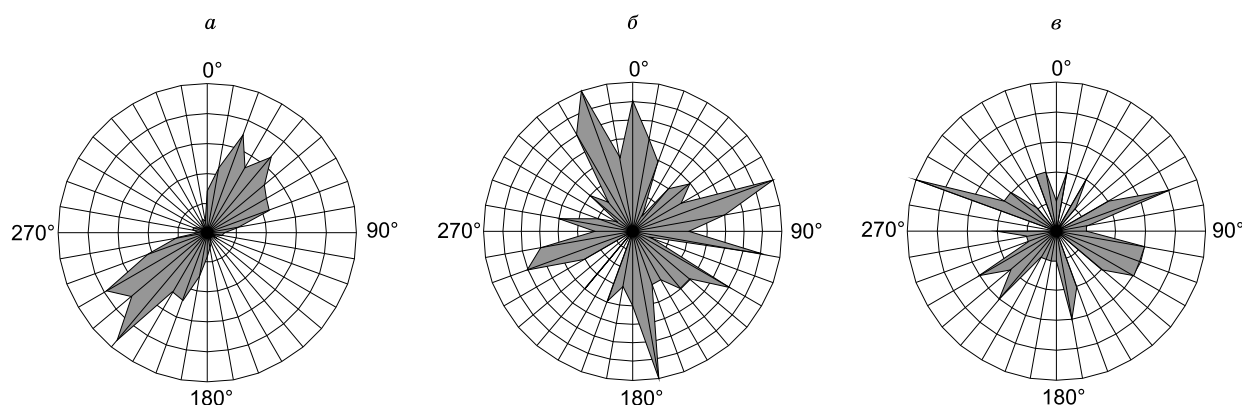


Рис. 5. Розы-диаграммы простираения плоскостей для сбросов и сдвиго-сбросов (а), сдвигов, сбросо-сдвигов и взбрососдвигов (б), взбросов и сдвиговзбросов (в).

вторая плоскость может оказаться сбросового или сдвиго-сбросового типа. Однако возможное завышение является незначительным, так как такая комбинация встречается только в 6 % случаев, и не всегда реализуется сбросовый вариант.

Среди несбросовых решений, куда мы относим все остальные типы, помимо сбросов и сдвигосбросов, преобладают решения сдвигового типа и сдвига со сбросовой компонентой — 11 и 7 % соответственно. Решения со взбросовой компонентой — взбросы (5 %), сдвиговзбросы (3 %), взбрососдвиги (3 %) — встречаются относительно редко. Следует учесть, что часть решений несбросового типа, особенно сдвиг, принадлежит афтершокам. В большей мере они представлены в афтершоках Култукского и Максимихинского землетрясений, механизмы очагов которых не соответствуют «байкальскому» типу. В районе юго-западного замыкания Южно-Байкальской впадины, где произошло Култукское землетрясение, имеет место сочленение двух крупнейших региональных разломов, обрамляющих впадину и определяющих ее развитие — Главного Саянского и Обручевского, поэтому наличие сдвиговых подвижек здесь ожидаемо вследствие левосдвиговой компоненты смещений по Главному Саянскому разлому и западному отрезку Обручевского разлома [Саньков и др., 2014]. Ранее, в работе [Радзиминович и др., 2006], было установлено, что земная кора этого субширотного участка впадины находится в условиях растяжения со сдвигом, и произошедшее Култукское землетрясение «вписалось» в этот режим. Нетипичные механизмы очагов в области Максимихинского землетрясения находятся в согласии с кинематикой Турка-Усть-Баргузинского разлома и Усть-Баргузинского разломного узла [Черемных, 2006], контролирующей сейсмичность района. В этих областях также реконструировано локальное трансензионное поле напряжений [Радзиминович, Мирошниченко, 2020; Ребецкий и др., 2023].

Остальные, фоновые, землетрясения с нетипичными механизмами распределены практически по всей впадине. Их реализация происходит преимущественно по плоскостям СЗ простираения, а также по

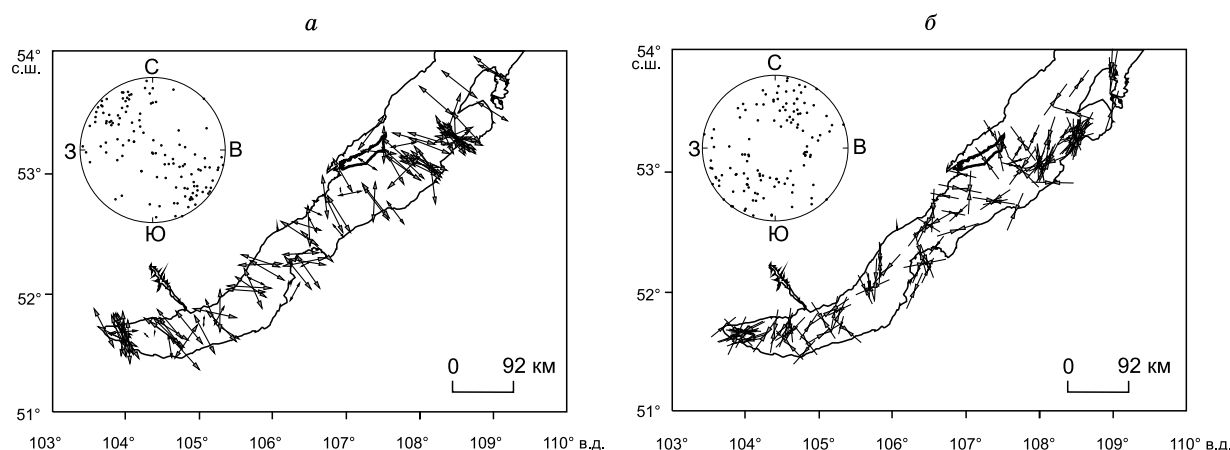


Рис. 6. Ориентация осей T (а) и P (б) в очагах землетрясений, где хотя бы одна нодальная плоскость является отличной от сбросов и сдвиго-сбросов.

субмеридиональным и субширотным. При этом для сдвиговых подвижек характерно правостороннее смещение по СЗ и субмеридиональным плоскостям, и, соответственно, левостороннее смещение по субширотным и малочисленным СВ плоскостям.

Разрывы поперечного СЗ простираения играют большую роль в формировании зонно-блоковой структуры впадины по-меньшей мере ее осадочного наполнения [Семинский и др., 2022], разделяя ее на сегменты. Однако, если крупные разломы основного СВ простираения характеризуются сформированностью магистральных сместителей, то СЗ разрывы в осадочном слое представлены сгущением относительно мелких разрывов, отражая ранние стадии формирования разломов в фундаменте [Семинский и др., 2022]. Результаты тектонофизического анализа показывают, что кинематика смещений по поперечным разрывам в зависимости от структурной ситуации может быть как сбросовой, так и сдвиговой. Возникновение сбросов по СЗ разрывам в региональном поле с ориентацией оси наименьшего сжатия СЗ-ЮВ объясняется локальным продольным, т. е. северо-восточным, растяжением [Golenetsky, Misharina, 1978; Семинский, 2003; Семинский, Черемных, 2011], вызванным переиндексацией осей напряжений. Между тем механизмы очагов показывают, что доля сбросовых смещений по плоскостям, ориентированным на СЗ-ЮВ, невелика — менее 5 % от всех сбросов. Учитывая тот факт, что для земной коры Южно-Байкальской впадины характерна форма эллипсоида напряжений с коэффициентом Ладе—Надаи, близким к нулю [Ребецкий и др., 2023], промежуточное главное напряжение, действующее в направлении СВ-ЮЗ, существенно меньше вертикального, что дает возможность активизации поверхностей пониженной прочности с СЗ-ЮВ простираением. Рассмотрим распределение таких активизированных поперечных плоскостей (см. рис. 4, в). В Южной котловине такие плоскости выявлены в афтершоках Култукского и Южно-Байкальского землетрясений. Выше уже отмечалось, что СЗ простираение при Култукском землетрясении являлось основным при активизации и в большинстве случаев характеризовалось наличием также горизонтальных смещений. В случае же Южно-Байкальской последовательности, главный толчок которой был сбросом по крутопадающей плоскости, ориентированной на СВ-ЮЗ, произошла активизация разломного узла, где сочленяются или пересекаются разрывы основных направлений [Radziminovitch et al., 2005]. Главный толчок предварялся форшоковым процессом, представленным в виде роя, затем двухдневного затишья и непосредственных форшоков. Эпицентры землетрясений роя вытягивались в СЗ направлении, хотя имеющиеся механизмы показывали на сбросообразование по плоскостям СВ простираения. Эпицентральное поле афтершоков имело изометричную форму, что также говорит об активизации разрывов разных направлений, в том числе и северо-западных, судя по фокальным механизмам. Нодальные плоскости СЗ ориентации согласуются с закартированными разломами этого же направления. Реализация по этим плоскостям сбросовых движений, а не сдвиговых, объясняется перераспределением напряжений в окрестностях главного толчка. Режим сейсмотектонической деформации для Южно-Байкальской последовательности в работах [Radziminovitch et al., 2005; Радзиминович и др., 2006] был определен как двустороннее растяжение, сформированное как бы двумя разрывами сбросового типа [Юнга, 1997]. В терминах анализа полей тектонических напряжений такой тип напряженно-деформированного состояния классифицируется как режим радиального растяжения [Delvaux et al., 1997]. Плоскости СЗ простираения в очагах землетрясений в дельте Селенги, вероятнее всего, соотносятся с поперечным Фофановским разломом, вдоль которого заложено основное русло Селенги, и говорят об его активности. А вот для остальных землетрясений, в фокальных решениях которых определены сбросы по плоскостям СЗ простираения, очаги не удается связать с согласованными по ориентации закартированными разломами.

Несмотря на то, что по плоскостям СЗ простираения сбросы по соотношению количества плоскостей уступают другим типам механизмов, сдвиги, как следует из рис. 5, «предпочитают» не выраженное поперечное СЗ направление, а субмеридиональное и субширотное, т. е. они происходят преимущественно по плоскостям, ориентированным косо по отношению к основным структурам впадины. Поскольку основные движения во всей впадине реализуются все же как сбросы по СВ структурам, можно предположить аккомодирующую роль сдвиговых смещений по косым разрывам, что приводит к согласованности скоростей и/или направления перемещения разноориентированных локальных блоков или структур в региональном поле растяжения. Такие зоны аккомодации или трансферные зоны уверенно выделяются в строении Южно-Байкальской впадины по данным морфометрии, геолого-структурным и сейсмическим данным [Тевелев, Федоровский, 2017].

Наличие сдвиговых смещений в очагах землетрясений при растяжении фиксируется не только в пределах впадины, но и при передаче деформаций между сегментами рифтовой зоны. При изменении простираения соседних рифтовых бассейнов в Байкальской рифтовой зоне сильные землетрясения характеризуются сдвиговыми или со значительной сдвиговой составляющей подвижками (рис. 7). Так, при переходе от Хубсугульской впадины к Тункинским произошло Мондинское землетрясение с $M_w = 6.9$ в результате левостороннего сдвигового смещения, от Тункинских впадин к Южно-Байкальской — Култукское, при сочленении Баргузинской впадины — Максимихинское; Кичерское землетрясение с

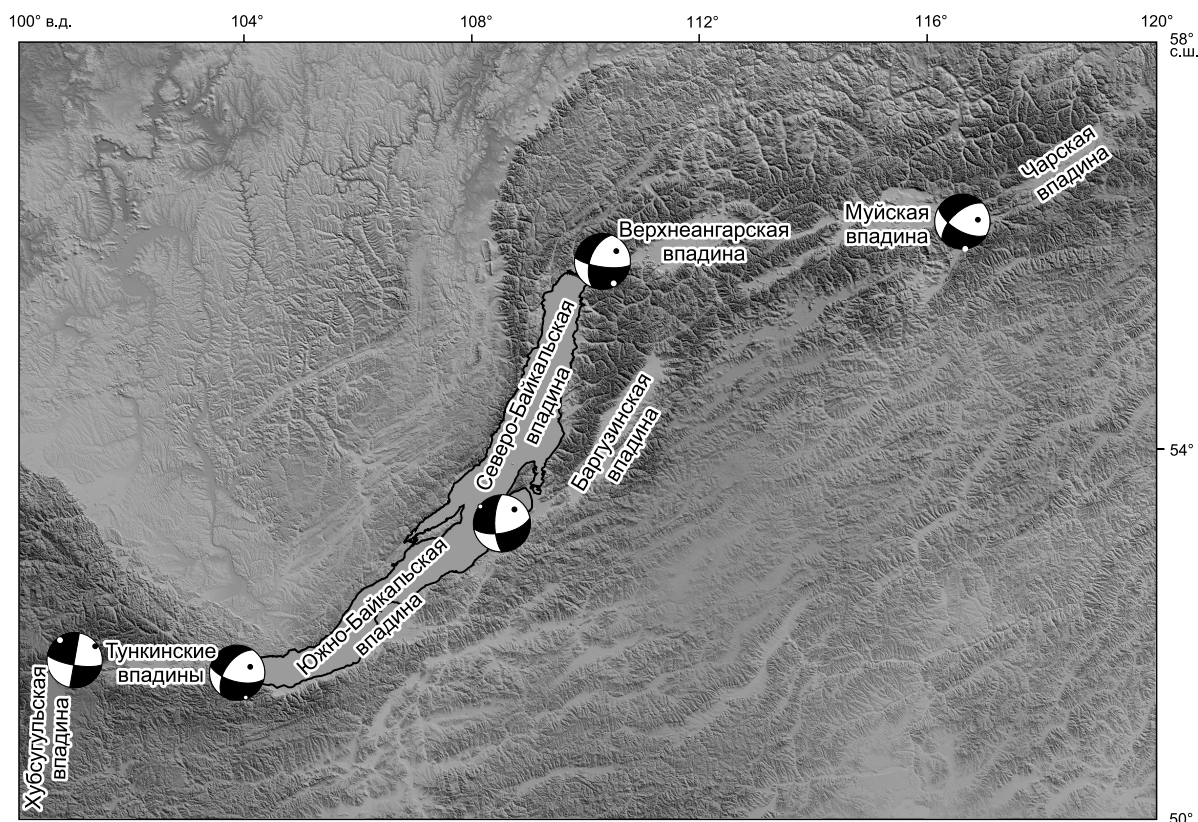


Рис. 7. Механизмы очагов сильных землетрясений на границе между соседними рифтовыми впадинами при изменении их простираения.

Стереogramмы приведены в проекции нижней полусферы.

$M_w = 6.0$, локализованное на границе между Северо-Байкальской и Кичерской впадинами, было дуплетом с первым толчком сдвигового типа, далее на восток на замыкании Муйской впадины, произошло сильнейшее за инструментальный период землетрясение в Байкальской рифтовой зоне — Муйское $M = 7.6$, которое характеризовалось левым сдвигом по субширотной плоскости. Все эти события произошли в широтных зонах, выделяемых в работе [Шерман, Леви, 1978], в качестве трансформ (больших трансферов), соединяющих Северо-Байкальский полуграбен с впадинами СВ фланга БРЗ и Южно-Байкальский полуграбен с Тункинским и Хубсугульским, с одной стороны, и с Баргузинской впадиной, с другой.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Земная кора Южно-Байкальской впадины находится в условиях растяжения земной коры в СЗ-ЮВ направлении. Соответственно, доминирующим типом смещения по разломам СВ простираения, наиболее распространенным во впадине, являются сбросы. Тем не менее 29 % нодальных плоскостей из выборки фокальных механизмов показывают на несбросовой тип смещений в очагах, из которых на сдвиги и их комбинации с другими типами смещений (сбросо- или взбрососдвиги) приходится 18 % и на взбросы (включая сдвиговзбросы) — 11 %. Сдвиговые смещения присущи и достаточно сильным землетрясениям, как в случае Култукского толчка с $M_w = 6.3$.

Землетрясения с нетипичными механизмами распределены практически по всей впадине, но необходимо отметить увеличение их числа на юго-западном замыкании впадины (Култукский сегмент) и в восточном борту Центральной котловины, где ранее были установлены режимы трансенсии. Реализация несбросовых подвижек происходит преимущественно по плоскостям СЗ простираения, а также по субмеридиональным и субширотным. Количество сбросов, произошедших по плоскостям поперечного, СЗ-ЮВ простираения, в анализируемой выборке фокальных механизмов невелико (5 %).

Ось растяжения в таких очагах ориентирована в большинстве случаев согласно региональному полю напряжений, т. е. в СЗ-ЮВ направлении, а ориентация оси сжатия варьирует от СЗ до СВ румбов и угол погружения оси близок к горизонтальному.

В действующем поле растяжения земной коры поперечные сдвиги играют роль трансферных разломов, аккомодируя различия в скоростях и векторах деформаций локальных блоков в пределах впадины, и в региональном масштабе между соседними рифтовыми впадинами.

Автор благодарит к.г.-м.н. В.А. Санькова, д.г.-м.н. К.Ж. Семинского и рецензентов за обсуждение результатов работы.

Работы выполнены с использованием оборудования и инфраструктуры уникальной научной установки «Южно-Байкальский инструментальный комплекс для мониторинга опасных геодинамических процессов» Центра коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН по гранту 075-15-2021-682.

ЛИТЕРАТУРА

Балакина Л.М., Введенская А.В., Мишарина Л.А., Широкова Е.И. Исследование напряжений в очагах землетрясений // Вестник АН СССР, 1968, № 1, с. 64—70.

Введенская А.В. Особенности напряженного состояния в очагах прибайкальских землетрясений // Изв. АН СССР. Сер. геофиз., 1961, № 5, с. 666—669.

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

Габсатарова И.П., Гилёва Н.А., Малянова Л.С., Раевская А.А., Сафонов Д.А., Филиппова А.И. Параметры механизмов очагов отдельных землетрясений России в 2020 г. // Землетрясения России в 2020 г. Обнинск, ФИЦ ЕГС РАН, 2022, с. 184—192.

Кучай О.А. Особенности сейсмотектонической деформации озера Байкал и его горного обрамления // Исследования по созданию научных основ прогноза землетрясений в Сибири. Иркутск, 1990, с. 17—22.

Ландер А.В. Описание и инструкция для пользователя комплекса программ ФА (расчет и графическое представление механизмов очагов землетрясений по знакам первых вступлений P -волн). М., 2006, 27 с.

Леви К.Г., Бабушкин С.М., Бадардинов А.А., Буддо В.Ю., Ларкин Г.В., Мирошниченко А.И., Саньков В.А., Ружич В.В., Вонг Х.К., Дельво Д., Колман С. Активная тектоника Байкала // Геология и геофизика, 1995, т. 36 (10), с. 154—163.

Логачев Н.А. Об историческом ядре Байкальской рифтовой зоны // ДАН, 2001, т. 376, № 4, с. 510—513.

Лунина О.В. Цифровая карта разломов для плиоцен-четвертичного этапа развития земной коры юга Восточной Сибири и сопредельной территории Северной Монголии // Геодинамика и тектонофизика, 2016, т. 7, № 3, с. 407—434.

Лунина О.В., Гладков А.С., Шерстянкин П.П. Новая электронная карта разломов юга Восточной Сибири // ДАН, 2010, т. 433, № 5, с. 1—6.

Мельникова В.И. Напряженно-деформированное состояние Байкальской рифтовой зоны по данным о механизмах очагов землетрясений: Автореф.... к.г.-м.н., Иркутск, ИЗК СО РАН, 2001, 16 с.

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

Мельникова В.И., Радзиминович Н.А. Параметры сейсмотектонических деформаций земной коры Байкальской рифтовой зоны по сейсмологическим данным // ДАН, 2007, т. 416, № 4, с. 543—545.

Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Арефьев С.С., Быкова В.В., Середкина А.И. Култукское землетрясение 2008 г. с $M_w = 6.3$ на юге Байкала: напряженно-деформированное состояние очаговой области по данным об афтершоках // Физика Земли, 2013, № 4, с. 120—134, doi:10.7868/S0002333713040078.

Мельникова В.И., Гилёва Н.А., Ландер А.В., Середкина А.И., Татомир Н.В. Каталог механизмов очагов землетрясений Прибайкалья и Забайкалья за 2008 год ($N = 64$). Землетрясения Северной Евразии, 2008 г. Обнинск, ГС РАН, 2014. Приложение к сборнику на CD.

Мишарина Л.А. Исследование механизма очагов повторных толчков Среднебайкальского землетрясения 29 августа 1959 г. // Бюл. Совета по сейсмологии, М., Изд-во АН СССР, 1963, № 15, с. 81—94.

Мишарина Л.А., Солоненко Н.В. О напряжениях в очагах слабых землетрясений Прибайкалья // Изв. АН СССР. Физика Земли, 1972, № 4, с. 24—36.

Мишарина Л.А., Солоненко Н.В. Механизм очагов землетрясений и напряженное состояние земной коры в Байкальской рифтовой зоне // Роль рифтогенеза в геологической истории Земли. Новосибирск, Наука, 1977, с. 120—125.

Парфеев А.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И., Лухнев А.В. Эволюция напряженного состояния земной коры Монголо-Байкальского подвижного пояса // Тихоокеанская геология, 2002, т. 21, № 1, с. 14—28.

Радзиминович Н.А. Сейсмоактивные структуры Южно-Байкальской впадины // Современная тектонофизика. Методы и результаты. Материалы VI молодежной тектонофизической школы-семинара, 7—12 октября 2019. М., ИФЗ РАН, 2019, с. 199—204.

Радзиминович Н.А., Мирошниченко А.И. Усть-Баргузинская трансферная зона (Центральный Байкал): сейсмологические данные о транстенсионном поле напряжений земной коры // ДАН, 2020, т. 493, № 2, с. 78—82.

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.

Ребецкий Ю.Л., Добрынина А.А., Саньков В.А. Современное напряженное состояние и геодинамика Байкальской рифтовой системы // Геология и геофизика, 2023, т. 64 (1), с. 87—111, doi: 10.15372/GiG2021110.

Саньков В.А., Добрынина А.А. Современное разломообразование в земной коре Байкальской рифтовой системы по данным о механизмах очагов землетрясений // ДАН, 2015, т. 465, № 3, с. 347—352.

Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И., Добрынина А.А., Ашурков С.В., Бызов Л.М., Дембелов М.Г., Кале Э., Девершер Ж. Современные горизонтальные движения и сейсмичность южной части Байкальской впадины (Байкальская рифтовая система) // Физика Земли, 2014, № 6, с. 70—79.

Семинский К.Ж. Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск, Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003, 244 с.

Семинский К.Ж., Черемных А.В. Трещинные сети и напряженное состояние кайнозойских осадков Байкальского рифта: новые возможности структурно-парагенетического анализа // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (3), с. 450—469.

Семинский К.Ж., Черемных А.С., Хлыстов О.М., Ахманов Г.Г. Разломные зоны и поля напряжений в осадках озера Байкал: тектонофизическая интерпретация гидроакустических и геофизических данных // Геология и геофизика, 2022, т. 63 (7), с. 1016—1034, doi: 10.15372/GiG2021127.

Середкина А.И., Мельникова В.И. Тензор сейсмического момента землетрясений Прибайкалья по амплитудным спектрам поверхностных волн // Физика Земли, 2014, № 3, с. 103—114, <https://doi.org/10.7868/S0002333714030090>.

Солоненко А.В. О симметрии поля напряжений в земной коре Байкальского рифта // ДАН, 1993, т. 328, № 6, с. 674—677.

Солоненко А.В., Солоненко Н.В., Мельникова В.И., Козьмин Б.М., Кучай О.А., Суханова С.С. Напряжения и подвижки в очагах землетрясений Сибири и Монголии // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии, 1993, вып. 1, с. 113—122.

Солоненко А.В., Солоненко Н.В., Мельникова В.И., Юнга С.Л. Поля напряжений и сейсмотектонических деформаций Байкальской рифтовой зоны // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии, 1996, вып. 2—3, с. 363—371.

Суворов Д.В., Тубанов Ц.А. Распределение очагов близких землетрясений в земной коре под Центральным Байкалом // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (8), с. 805—818.

Тевелев А.В., Федоровский В.С. Кинематика аккомодационных структур Байкальской рифтовой зоны // Вестник Моск. ун-та. Сер. 4. Геология, 2017, № 2, с. 25—34.

Черемных А.В. Разломно-блоковое строение земной коры и напряженное состояние в зонах региональных разломов восточного побережья озера Байкал // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (2), с. 250—258.

Шерман С.И., Леви К.Г. Трансформные разломы Байкальской рифтовой зоны и сейсмичность ее флангов // Тектоника и сейсмичность континентальных рифтовых зон. М., Наука, 1978, с. 7—18.

Юнга С.Л. О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу // ДАН, 1997, т. 352, № 2, с. 253—255.

De Batist M., Canals M., Sherstyankin P., Alekseev S., the INTAS Project 99-1669 Team. A new bathymetric map of Lake Baikal, 2002, <http://www.lin.irk.ru/intas/index.htm>.

Delvaux D., Moeys R., Stapel G., Petit C., Levi K., Miroshnichenko A., Ruzhich V., San'kov V. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia. Part 2: Cenozoic rifting // Tectonophysics, 1997, v. 282, p. 1—38.

Dziewonski A.M., Chou T.-A., Woodhouse J.H. Determination of earthquake source parameters from waveform data for studies of global and regional seismicity // J. Geophys. Res., 1981, v. 86, p. 2825—2852, doi: 10.1029/JB086iB04p02825.

Golenetsky S.I., Misharina L.A. Seismicity and earthquake focal mechanisms in the Baikal rift zone // *Tectonophysics*, 1978, v. 45 (1), p. 71—86.

Hutchinson D.R., Golmshtok A.J., Zonenshain L.P., Moore T.C., Scholz C.A., Klitgord K.D. Depositional and tectonic framework of the rift basins of Lake Baikal from multichannel seismic data // *Geology*, 1992, v. 20, p. 589—592.

Karagianni I., Papazachos C.B., Scordilis E.M., Karakaisis G.F. Reviewing the active stress field in Central Asia by using a modified stress tensor approach // *J. Seismol.*, 2015, v. 19, p. 541—565, doi: 10.1007/s10950-015-9481-4.

Levi K.G., Miroshnichenko A.I., San'kov V.A., Babushkin S.M., Larkin G.V., Badardinov A.A., Wong H.K., Colman S., Delvaux D. Active faults of the Baikal depression // *Bull. Centres Rech. Elf Explor. Prod.*, 1997, v. 21 (2), p. 399—434.

Petit C., Déverchère J., Houdry F., Sankov V.A., Melnikova V.I., Delvaux D. Present-day stress field changes along the Baikal rift and tectonic implications // *Tectonics*, 1996, v. 15, p. 1171—1191.

Radziminovitch N., Déverchère J., Melnikova V., San'kov V., Giljova N. The 1999 M_w 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.

Radziminovich N., Bayar G., Miroshnichenko A., Demberel S., Ulziibat M., Ganzorig D., Likhnev A. Focal mechanisms of earthquakes and stress field of the crust in Mongolia and its surroundings // *Geodyn. Tectonophysics*, 2016, v. 7 (1), p. 23—38, doi: 10.5800/GT-2016-7-1-0195.

Sankov V.A., Dobrynina A.A. Active faulting in the Earth's crust of the Baikal Rift System based on the earthquake focal mechanisms // *Moment tensor solutions* / Ed. S. D'Amico. Springer Natural Hazards, 2018, p. 599—618, doi: 10.1007/978-3-319-77359-9_27.

San'kov V.A., Miroshnichenko A.I., Levi K.G., Likhnev A.V., Melnikov A.I., Delvaux D. Cenozoic stress field evolution in the Baikal rift zone // *Bull. Centres Rech. Elf Explor. Prod.*, 1997, v. 21 (2), p. 435—455.

Scholz C.A., Klitgord K.D., Hutchinson D.R., ten Brink U.S., Zonenshain L.P., Golmshtok A.Y., Moore T.C. Results of 1992 seismic reflection experiment in Lake Baikal // *Eos*, 1993, v. 74, p. 465—470.

Seredkina A.I., Melnikova V.I. Seismotectonic crustal strains of the Mongol-Baikal seismic belt from seismological data // *Moment tensor solutions* / Ed. S. D'Amico. Springer Natural Hazards, 2018, p. 497—517, doi: 10.1007/978-3-319-77359-9_22.

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. 21, p. 207—231.