

УДК 551.35.06

СЕЙСМИЧНОСТЬ СРЕДИННО-ОКЕАНИЧЕСКИХ ХРЕБТОВ – ГЛОБАЛЬНЫЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

П.О. Соболев

*Международный институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики Российской академии наук*

Д.В. Рундквист

Государственный геологический музей им. В.И. Вернадского

Срединно-океанические хребты (СОХ) являются наиболее протяженными глобальными структурами и представляют собой дивергентные границы плит, где формируется новая земная кора и плиты расходятся в противоположных направлениях. Совместный анализ сейсмичности и геодинамики выполнен для всей глобальной системы СОХ. Рассматривались два первых уровня сегментации хребтов: структуры первого порядка – сегменты между тройными сочленениями и структуры второго порядка – трансформные и рифтовые участки. Для оценки суммарного сейсмического момента использовались каталоги NEIC и CMT, эта же величина была сосчитана на основании глобальной тектонической модели NUVEL-1. Сравнение этих двух величин показало, что коэффициент сейсмического сцепления α изменяется в среднем от 1 до 10%, при этом он всегда выше для трансформных участков СОХ, т.е. большая часть деформации связана с асейсмической составляющей. Решающая роль в сейсмичности СОХ принадлежит трансформным разломам. Их энергетический вклад на один-два порядка выше, чем вклад от рифтовых участков и увеличивается в случае быстроспрединговых хребтов. Намечаются закономерные связи между сейсмическим моментом и суммарной длиной трансформных разломов, что подтверждает термическую модель сейсмичности океанической литосферы, предложенную Бурром и Соломоном. Противоположные закономерности характерны для рифтовых участков – отчетливая обратная корреляция между сейсмическим моментом и скоростью спрединга. В обоих случаях эти результаты показывают решающую роль термической структуры литосферы в сейсмичности СОХ.

SEISMICITY OF THE MID-OCEANIC RIDGES: A GLOBAL GEODYNAMIC ANALYSIS

P.O. Sobolev

*International Institute of Earthquake Prediction Theory
and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences*

D.V. Rundquist

Vernadsky State Geological Musium

The estimation of the role of main components of the Mid-Oceanic Ridges (MOR) was made for the whole Earth. We considered two first levels of the MOR segmentation: first order structures are the segments of MOR between triple junctions and second order structures are transform faults and rift parts of MOR. The seismic catalogues NEIC and CMT were used

for the assessment of the seismic moment release, it was also calculated in a different manner using the global plate tectonic model NUVEL-1 and the Brune's formulae. Comparison of the two values shows that seismic coupling coefficient varies from 1 to 10% for most of MOR and is invariably higher for the transform faults. That means that most of the deformation comes from aseismic slip. The decisive role in MOR seismicity belongs to transform faults. Their energy contribution is one-two orders higher than from rifts and increases with the spreading rate. There is a quite good correlation between the seismic moment and the total length of the transform faults, it confirms the simple thermal model of transform oceanic seismicity that was given by Burr and Solomon. An opposite pattern occurred for relation of the seismic moment release on the spreading rate. For the rifts there is a clear reverse correlation between seismic moment of normal faults and velocity. Finally, these results show that for transform faults and rifts their seismicity depends first of all on the thermal structure of oceanic lithosphere.

Открытие глобальной системы срединно-океанических хребтов (СОХ) явилось одним из крупнейших достижений геологии в двадцатом столетии, которое во многом обусловило смену парадигм в тектонике. Изучение СОХ продолжается и дает все новые результаты, важные для тектоники, петрологии, металлогении. Почти на всем своем протяжении (а это составляет более 60000 км) СОХ также являются активными сейсмическими поясами, к которым приурочено подавляющее большинство землетрясений, происходящих в пределах океанов. Согласно тектонике плит, СОХ представляют собой дивергентные границы плит, где формируется новая земная кора и плиты расходятся в противоположных направлениях. В зависимости от скорости дивергенции выделяются медленно-спрединговые (Срединно-Атлантический) и быстро-спрединговые СОХ (например, Восточно-Тихоокеанское поднятие). Благодаря сравнительно простой геодинамической обстановке СОХ являются идеальным объектом для изучения связей геодинамики и сейсмичности. В первом приближении СОХ состоят из двух важнейших тектонических типов структур, которые чередуются на всем протяжении хребта: рифтовые участки с обстановкой растяжения и поперечные трансформные разломы. Здесь и далее под этим термином мы будем понимать только активные участки, находящиеся между соседними рифтовыми частями, где происходят сдвиговые движения (другое, более широкое, толкование этого термина включает и неактивные части разломов, находящиеся вне СОХ).

Впервые различный механизм землетрясений для каждого структурного типа был установлен Сайксом [1]. На различие характеристик сейсмического режима рифтов и трансформных разломов Атлантического океана было указано еще в работе Фрэнсиса [2], где отмечалась приуроченность сильных землетрясений к зонам разломов и бóльший наклон графика повторяемости для рифтов. Позднее эти закономерности были подтверждены в работах [3, 4], последние обобщения содержатся в геолого-геофизическом атласе Атлантического океана [5] и в статьях Болдырева [6, 7]. Тем не менее, по-прежнему остается неясным вклад каждого из этих двух типов землетрясений в общую сейсмичность СОХ для всей Земли. С другой стороны, на основании изучения отдельных трансформных разломов были намечены связи между сейсмическими и тектоническими параметрами [8, 9]. В настоящей работе обобщены данные по всей мировой системе СОХ и сделана попытка ответить на следующие вопросы:

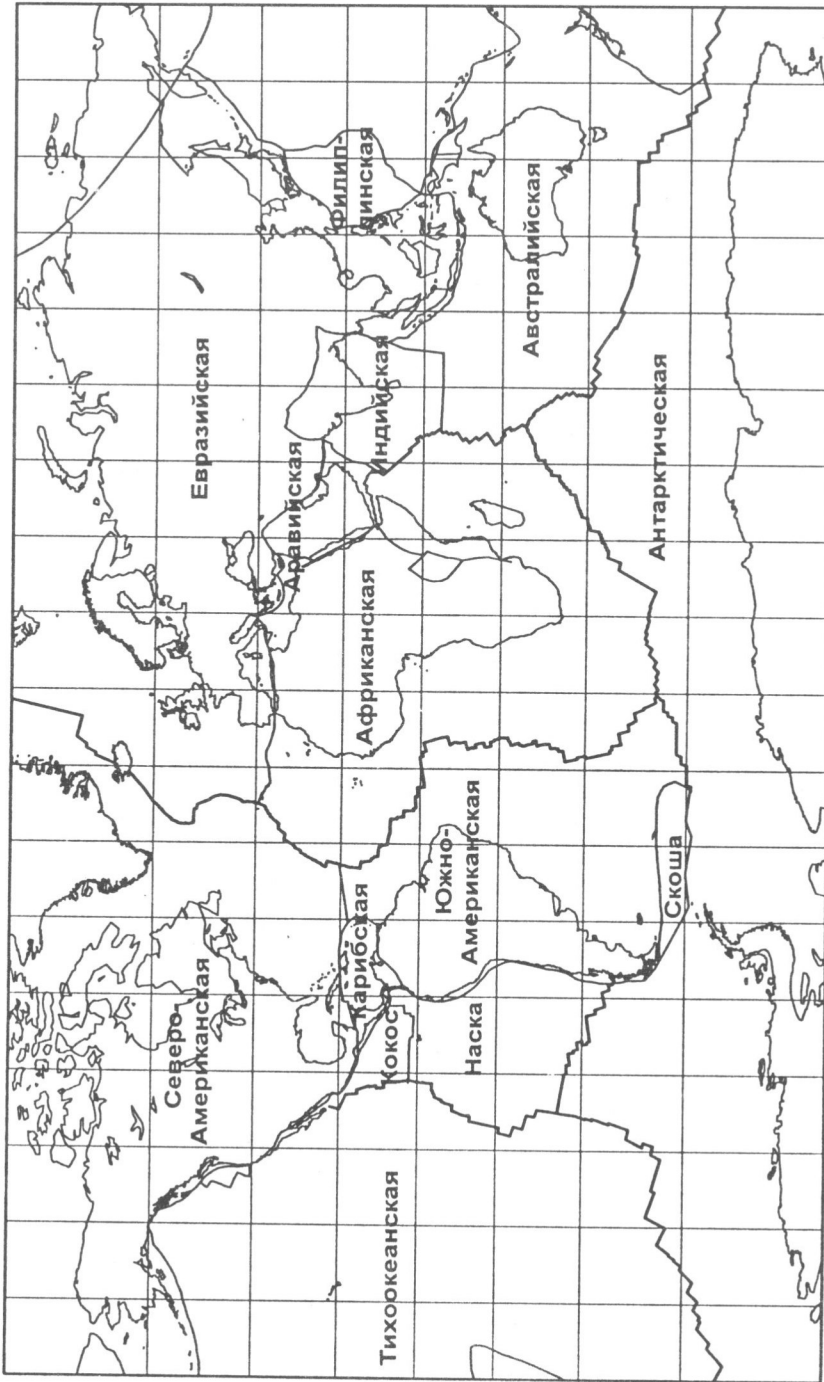


Рис. 1. Основные плиты (тонкие линии) и система срединно-океанических хребтов (толстые линии)

- 1) оценить соотношение сейсмической и асейсмической составляющей для рифтовых и трансформных участков СОХ;
- 2) определить роль обоих типов структур в сейсмичности СОХ;
- 3) определить связи между важнейшими сейсмическими и структурными параметрами разломов СОХ.

Для анализа данных по всей системе СОХ прежде всего необходимо было определить положение СОХ на поверхности Земли. Нами использовалась незначительно измененная цифровая модель, приведенная в работе Стоддарда [10], которая в свою очередь является обобщением большого числа работ. Несмотря на неточности в отдельных местах, эта схема все же может служить для целей глобального анализа. В соответствии с этими данными, выделяется 367 трансформных разломов и такое же число соединяющих их рифтовых зон, каждый из разломов принадлежит одной из 15 межплитных границ (рис. 1).

Для оценки сейсмического момента трансформных и рифтовых частей СОХ использовался главным образом каталог NEIC. Были выбраны все землетрясения с $m_b > 4$, которые попадают в 40-километровую зону вокруг СОХ (т.е. общая ширина этой зоны 80 км). В результате оказалось 4732 события для трансформных и 4385 события для рифтовых зон. На рис. 2 показаны графики повторяемости для двух структурных типов СОХ, причем исключены все землетрясения, принадлежащие трансформным и рифтовым участкам одновременно. Как видно, трансформным разломам свойственен меньший наклон графика (величина коэффициента b составляет 1.69) по сравнению с рифтами (1.88). Также, как правило, угол наклона графика повторяемости для определенной границы между двумя плитами больше для более высокой средней скорости спрединга на этой границе.

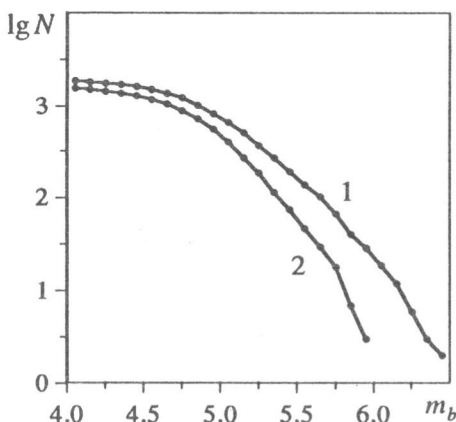


Рис. 2. Графики повторяемости для двух основных структур СОХ
1 – трансформные разломы, 2 – рифтовые участки

В каталоге СМТ, включающего события с 1977 по 1994 гг., для той же самой полосы вокруг СОХ было выбрано 1002 и 644 землетрясения для трансформных и рифтовых частей, соответственно. Используя данные из каталога СМТ, для $m_b > 5$ были вычислены параметры линейной регрессии для зависимости $\lg M_0$ от m_b и получены следующие эмпирические уравнения:

$$\lg M_0 = 10.18 + 1.39m_b \text{ (трансформные разломы),}$$

$$\lg M_0 = 11.16 + 1.17m_b \text{ (рифтовые части СОХ).}$$

Теоретическое значение коэффициента аналогичного уравнения для M_s равно 1.5, что приблизительно соответствует величине 2.4 для m_b [11]. Однако, как показано в работе [12], величина этого коэффициента зависит от тектонического положения и глубины гипоцентров. Меньшее значение коэффициента в случае океанических рифтов также свидетельствует о меньшем размере очага землетрясения по сравнению с трансформными участками.

После пересчета m_b в M_0 для каждой пары плит был сосчитан суммарный сейсмический момент $\sum M_0$. Эту же величину можно оценить другим способом, используя известную формулу Брюна [13]:

$$Av = \frac{1}{\mu\tau} \sum M_0, \quad (1)$$

где μ – модуль сдвига (в настоящей работе принята величина $\mu = 5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$), τ – промежуток времени, A – площадь разлома, v – относительная скорость между двумя плитами. Скорости для каждого участка СОХ были сосчитаны на основании глобальной модели движения плит NUVEL-1 [14]. В формулу входит площадь разлома, которая оценивалась разными способами для трансформных разломов и рифтов. В первом случае площадь сейсмогенного слоя, способного к упругой деформации, определяется изотермами, которые имеют форму парабол (рис. 3) [8].

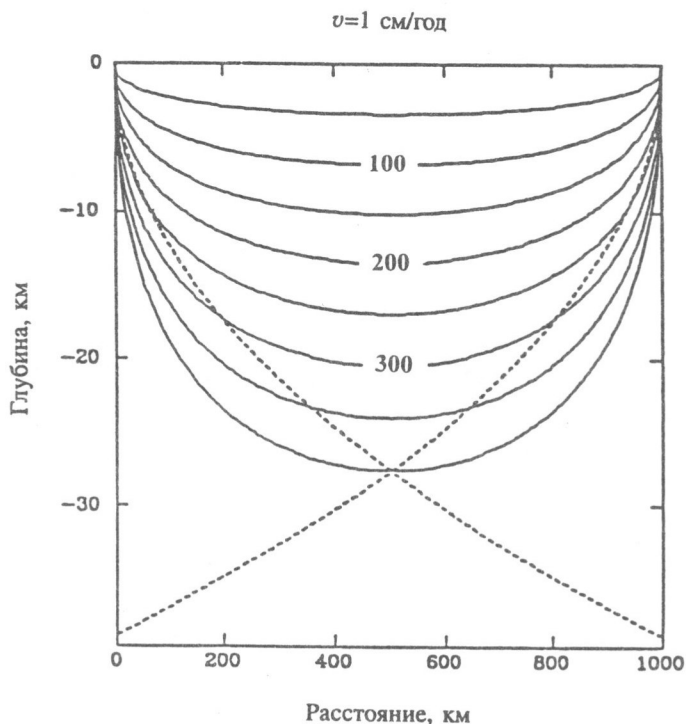


Рис. 3. Теоретические изотермы от 50 до 400°С для трансформного разлома длиной 1000 км и скоростью спрединга 1 см/год

Пунктир – изотерма 400°С при отсутствии горизонтального теплопереноса [10]

Согласно работе [10] средняя температура перехода от упругого к пластичному слою для океанов составляет 400°C , эта изотерма была принята как нижняя граница сейсмогенного слоя. Тогда площадь разлома может быть рассчитана по формуле

$$A = CL\sqrt{\frac{L}{v}},$$

где C – константа, зависящая от температуры, L – длина разлома [10]. Площадь рифтовых участков СОХ в первом приближении можно считать прямоугольной. Для оценки глубины разломов использовались данные из работы Соломона и др. [15]. Согласно их результатам, намечается линейная зависимость между глубиной сейсмогенного слоя рифтовой зоны и скоростью спрединга (рис. 4).

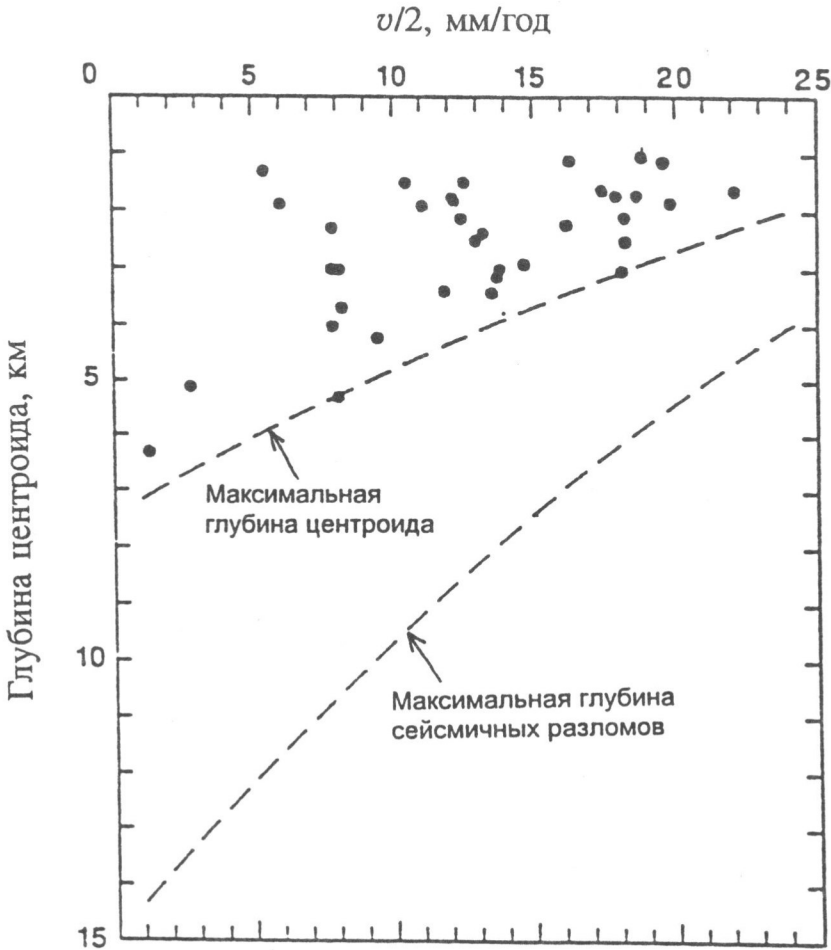


Рис. 4. Зависимость глубины центра землетрясения СОХ от половинной скорости спрединга [15]

Отношение величины сейсмического момента, полученного из каталога, к аналогичной теоретически ожидаемой величине называется коэффициентом сейсмического сцепления α (seismic coupling coefficient) [16]. В общем случае этот коэффициент показывает, какая часть энергии деформации выделяется при землетрясениях, а какая часть связана с асейсмичной деформацией. Результаты расчетов приведены в таблице (и изображены ниже на рисунках). Но прежде несколько слов о самых общих закономерностях, свойственных океаническим разломам. Распределение длин обоих типов разломов для всей Земли в первом приближении описывается показательной функцией (рис. 5).

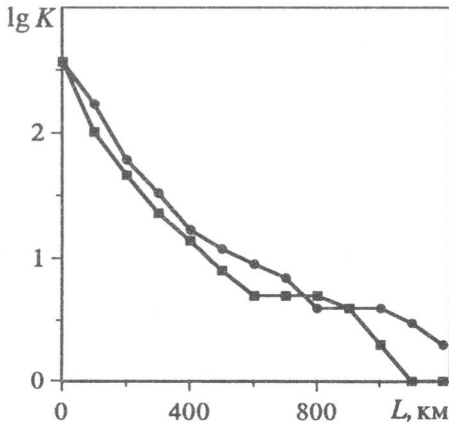


Рис. 5. Распределение длин разломов для рифтовых (кружки) и трансформных (квадратики) участков СОХ (K – частота)

Этот результат аналогичен данным о распределении длин континентальных разломов [17, 18], но отличается от экспоненциального закона распределения длин рифтовых участков СОХ, установленного для нескольких участков Восточно-Тихоокеанского поднятия [19]. Другая глобальная закономерность – тенденция к уменьшению вклада трансформных разломов в общую длину СОХ при увеличении скорости спрединга (рис. 6). Величина суммарного сейсмического момента, нормированная на длину, также резко уменьшается при переходе от медленно-спрединговых к быстроспрединговым хребтам, причем фигуративные точки для рифтов находятся гораздо ниже, чем таковые для трансформных разломов, что свидетельствует о ведущей роли вторых в сейсмичности СОХ (рис. 7). Это различие сохраняется и для распределения коэффициентов α (рис. 8), однако здесь для самых "быстрых" хребтов восточной части Тихого океана величины α почти одинаковы в обоих случаях. В целом, α изменяется от 1 до 10%. Таким образом, на рифтовых участках СОХ преобладает асейсмичная деформация (крип), соотношение между сейсмичной и асейсмичной составляющими в случае трансформных разломов зависит от скорости движения плит. В обоих случаях эти результаты свидетельствуют об определяющей роли термической структуры в сейсмичности СОХ.

Сравнение суммарного сейсмического момента $\sum M_0$ для рифтовых и трансформных участков СОХ, проведенное на основании каталога NEIC, показывает значительное преобладание $\sum M_0$ для трансформных зон. Однако эти данные основаны только на географическом распределении эпицентров землетрясений.

ТАБЛИЦА. Основные сейсмические и тектонические характеристики срединно-океанических хребтов

N участка	Участок СОХ	N	L_{tr} , км	L_{ri} , км	v , см/год	$\sum M_0^{tr}$, 10^{16} Н×м	$\sum M_0^{ri}$, 10^{16} Н×м	α_{tr} , %	α_{ri} , %	M_0^{ss} , 10^{16} Н×м	M_0^n , 10^{16} Н×м
1	afr-ant	742	4320	4360	1.42	15160	7300	17.7	8.5	7540	1046
2	afr-ara	18	670	1560	2.19		120		0.3	870	226
3	afr-aus	366	1390	1780	4.20	3810	2750	4.7	3.4	3210	103
4	afr-ind	471	1010	2290	3.32	4850	4040	5.7	4.7	1710	443
5	afr-nam	1199	1490	3200	2.42	9300	5910	9.2	5.8	3750	947
6	afr-sam	1702	5850	7520	3.38	26260	9610	8.7	3.2	26560	1055
7	ant-aus	765	3460	7140	6.77	12380	6030	3.0	1.5	10350	50
8	ant-pac	299	3590	5080	7.27	7790	2000	2.8	0.7	4860	21
9	ant-sam	164	1310	720	1.75	10490	1740	61.5	10.2	1250	127
10	soc-naz	15	830	2180	5.94	-	110	-	0.1	6150	77
11	soc-pac	335	390	1850	11.00	1140	1240	1.4	1.5	1425	-
12	nam-eur	1682	2020	5340	2.23	6630	4740	4.7	3.4	375	408
13	nam-pac	404	2870	730	4.84	2940	620	7.9	1.7	9680	-
14	paz-ant	481	2820	2210	5.93	7500	1350	6.2	1.1	6860	114
15	paz-naz	474	1110	4430	14.85	2130	2200	2.9	3.0	1960	312

Примечание. Плиты: afr – Африканская; ant – Антарктическая; ara – Аравийская; aus – Австралийская; ind – Индийская; nam – Северо-Американская; sam – Южно-Американская; pac – Тихоокеанская; soc – Кокос; naz – Наска; eur – Евразийская;

N – число землетрясений в каталоге NEIC;

L_{tr} , L_{ri} – общая длина трансформных разломов и рифтовых участков;

v – средняя скорость спрединга;

$\sum M_0^{tr}$, $\sum M_0^{ri}$ – суммарный сейсмический момент для трансформных и рифтовых участков СОХ (сосчитан на основании каталога NEIC);

α_{tr} , α_{ri} – коэффициент сейсмического сцепления для трансформных и рифтовых участков СОХ;

M_0^{ss} , M_0^n – суммарный сейсмический момент для землетрясений с механизмами сдвига и сброса

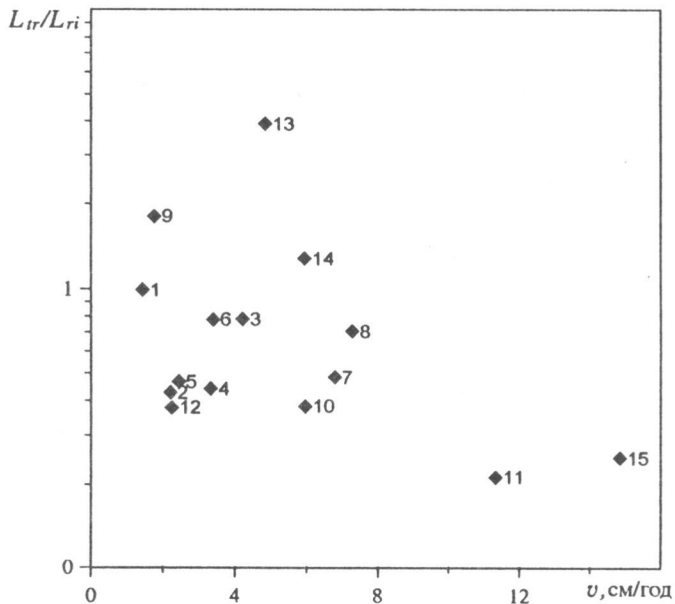


Рис. 6. Соотношение длин рифтовых и трансформных участков СОХ в зависимости от скорости спрединга

Здесь и далее цифры на рисунках соответствуют номерам участков в таблице

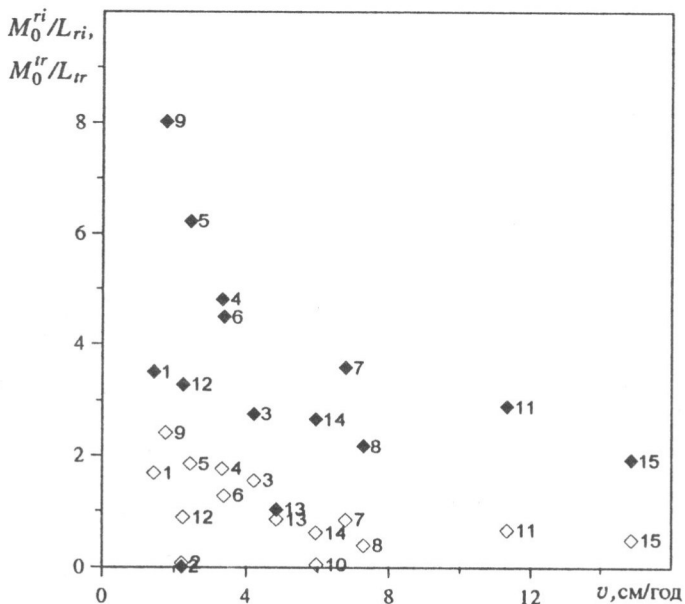


Рис. 7. Плотность суммарного сейсмического момента для рифтовых (пустые значки) и трансформных (залитые значки) участков СОХ в зависимости от скорости спрединга

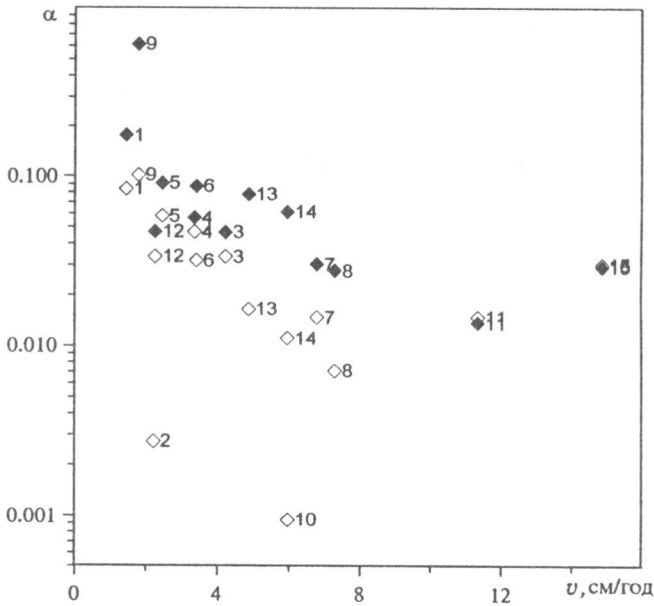


Рис. 8. Коэффициент α для рифтовых (пустые значки) и трансформных (залитые значки) участков СОХ в зависимости от скорости спрединга

Между тем, поскольку обе составные части хребта непрерывно переходят друг в друга, то значительная часть землетрясений вблизи мест соединения трансформных и рифтовых участков СОХ либо должна быть исключена, либо может быть отнесена к обоим частям.

Для более точной оценки роли каждого структурного типа в сейсмичности СОХ использовалась другая методика, основанная на анализе фокальных механизмов из каталога СМТ. Поскольку угол наклона первой нодальной плоскости почти всегда более 30° , тип землетрясения может быть определен на основании величины угла rake (угол между вектором подвижки и горизонтальной линией, измеренный в плоскости разлома). Выделяются четыре типа механизма: сбросы ($-120 \leq \text{rake} \leq -60$), взбросы ($60 \leq \text{rake} \leq 120$), сдвиги (углы, отличающиеся от 180 и -180° на 30°) и косые механизмы. Как впервые было установлено Сайксом [1] и позднее подтверждено во многих работах, землетрясения с механизмом сдвига приурочены в основном к трансформным участкам СОХ, между тем как подавляющая часть землетрясений типа сброса локализована вблизи рифтовых зон. Землетрясения с косыми механизмами (сбросо-сдвиги) встречаются гораздо реже и располагаются довольно нерегулярно по отношению к СОХ; взбросы вблизи хребта наблюдались в единичных случаях. Исходя из этого, для оценки суммарного сейсмического момента трансформных разломов использовались землетрясения с механизмом сдвига и, соответственно, момент рифтовых зон был сосчитан на основе данных для сбросов.

Результаты, приведенные в таблице, показывают, что величина суммарного сейсмического момента для сдвигов (трансформных разломов) всегда превышает таковую для сбросов (рифтовых зон). Замечательно, что отношение этих величин возрастает с увеличением скорости дивергенции (рис. 9), несмотря на то, что относительная длина трансформных зон уменьшается. Далее мы попытались найти зависимости, связывающие $\sum M_0$ с важнейшими структурными факторами – длиной разломов и скоростью спрединга. Зависимость суммарного сейсмического момента от длины трансформных разломов для каждой границы между плитами показана на рис. 10. Из теоретических соображений о пропорциональности сейсмического момента площади разлома и оценки площади разлома на основании формулы (1) можно ожидать корреляционную связь типа показательной функции с величиной показателя степени 1.5, однако реальная кривая идет гораздо ниже и приближается к экспоненциальной функции. В случае рифтовых зон ясная зависимость $\sum M_0$ от длины разлома отсутствует, однако в этом случае, по-видимому, ведущим фактором является скорость спрединга, что иллюстрирует рис. 11. Существует достаточно надежная логарифмическая зависимость между этими двумя характеристиками, если исключить одну фигуративную точку для границы плит Тихоокеанской и Наска с аномально высокой скоростью спрединга.

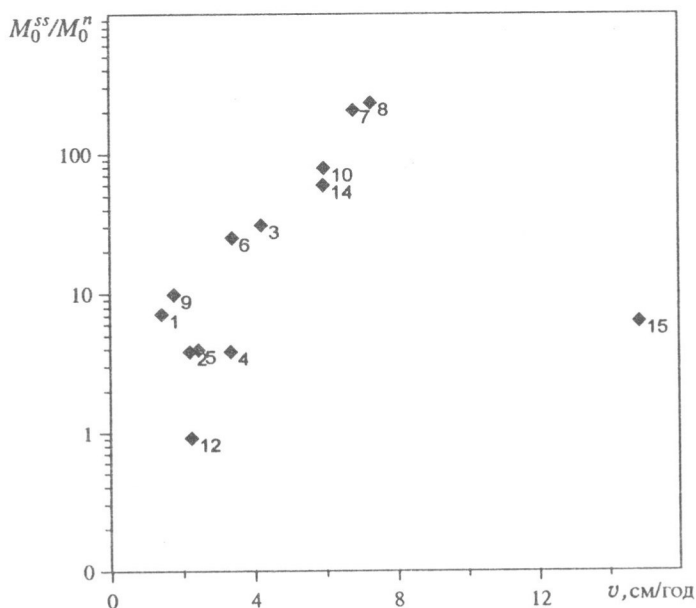


Рис. 9. Отношение суммарных сейсмических моментов для землетрясений с механизмами сдвига и сброса в зависимости от скорости спрединга

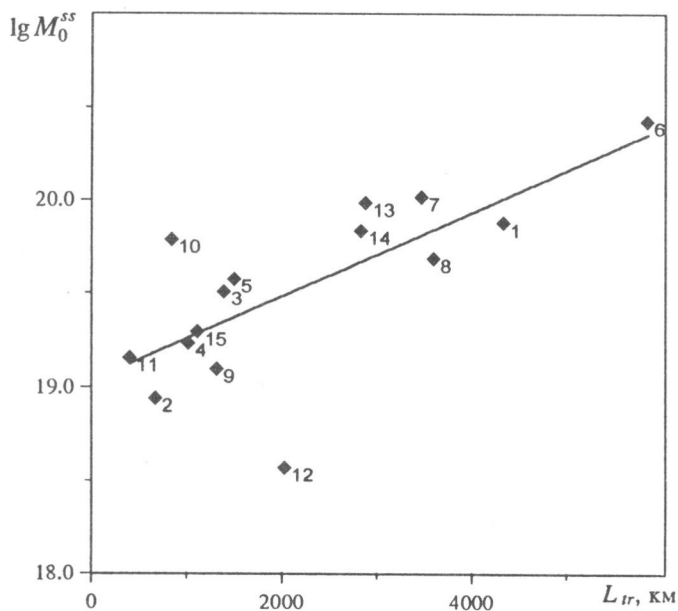


Рис. 10. Зависимость суммарного сейсмического момента для землетрясений с механизмом сдвига от общей длины трансформных разломов
Показана линия линейной регрессии

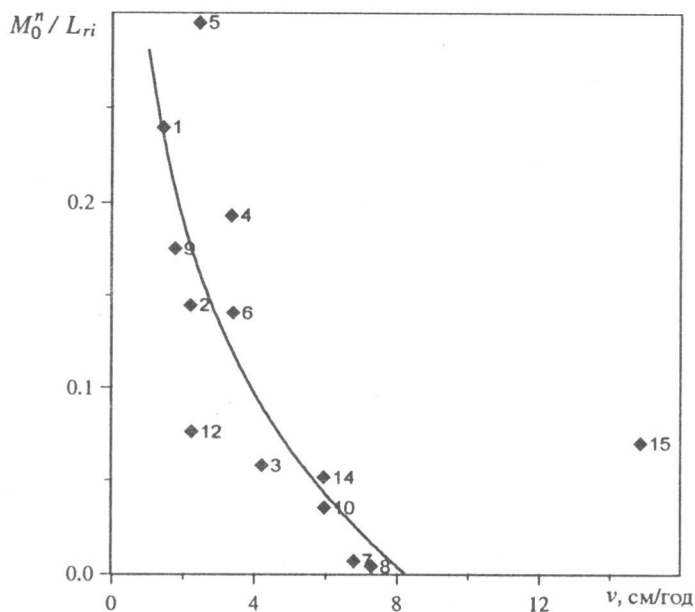


Рис. 11. Зависимость суммарного сейсмического момента для землетрясений с механизмом сброса от средней скорости спрединга
Показана линия логарифмической регрессии

Таким образом, на основании проведенного анализа всей глобальной системы СОХ можно сделать следующие выводы:

1. Определяющая роль в сейсмичности СОХ принадлежит трансформным разломам. Их энергетический вклад на один-два порядка превышает таковой от рифтовых частей СОХ и это соотношение возрастает с увеличением скорости спрединга.

2. Коэффициент сейсмического сцепления α для большинства хребтов изменяется от 1 до 10% и в пределах одного участка всегда выше для трансформных разломов.

3. Корреляционные связи между суммарным сейсмическим моментом, длиной разломов и скоростью спрединга различны для трансформных и рифтовых частей СОХ, что свидетельствует о разной геометрии и природе очагов землетрясений для этих структур. Однако в обоих случаях они подтверждают определяющую роль термической структуры океанической литосферы в сейсмичности СОХ.

В целом, справедливость полученных выводов для всего ряда структур в масштабе всей Земли свидетельствует о единой природе сейсмического процесса и о его четкой обусловленности тектоническими факторами.

Авторы благодарны академику В.И. Кейлис-Бороку, А.В. Ландеру и Т.Л. Кронрод за обсуждение статьи.

Настоящая работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (грант 415-96) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-05-66021).

ЛИТЕРАТУРА

1. Sykes L. Mechanism of earthquakes and nature of faulting on the mid-oceanic ridges // J. Geophys. Res. 1967. Vol.72. P.2131-2153.
2. Francis T.J.G. The detailed seismicity of mid-oceanic ridges // Earth and Planet. Sci. Lett. 1968. Vol.4, N 1. P.39-46.
3. Друмя А.В., Гинсарь В.Н., Шумила В.И. Вариации наклона графиков повторяемости землетрясений – характеристики сейсмического режима и типа геодинамических процессов // Физика Земли. 1990. N 6. С.5-13.
4. Гинсарь В.Н. Геоструктурные закономерности вариаций сейсмического и теплового поля в Атлантическом океане. Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат.наук. Киев. 1987. 21 с.
5. Международный геолого-геофизический атлас Атлантического океана / Под ред. Г.Б. Удинцева. М.: МОК (ЮНЕСКО), Мингео СССР, АН СССР, ГУГК СССР, 1989-1990.
6. Болдырев С.А. Землетрясения и сеймотектонические неоднородности Срединно-Атлантического хребта // Геолого-геофизические исследования на геотранверсах мирового океана. Санкт-Петербург: Севморгеология, 1992. С.19-36.
7. Болдырев С.А. О пространственно-временных особенностях сейсмичности Срединно-Атлантического хребта // Динамические процессы в геофизической среде. М.: Наука, 1994. С.132-148.
8. Burr N.C., Solomon S.C. The relationship of source parameters of oceanic transform earthquakes to plate velocity and transform length // J. Geophys. Res. 1978. Vol.83, N B3. P.1193-1205.

9. *Solomon S.C., Burr N.C.* The relationship of source parameters of ridge-crest and transform earthquakes to the thermal structure of oceanic lithosphere // *Tectonophysics*. 1979. Vol.55, N 1. P.107-126.
10. *Stoddard P.R.* On the relation between transform fault resistance and plate motion // *J. Geophys. Res.* 1992. Vol.97, N B12. P.17637-17650.
11. *Kanamori H., Anderson D.L.* Theoretical basis of some empirical relations in seismology // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* Vol.65, N 5. P. 1073-1095.
12. *Romanelli F., Panza G.F.* Effect of source depth correction on the estimation of earthquake size // *Geoph. Res. Lett.* Vol.22, N 9. P.1017-1019.
13. *Brune J.N.* Seismic moment, seismicity, and rate of slip along major fault zones // *J. Geophys. Res.* 1968. Vol.73, N 2. P.777-784.
14. *DeMets C.R., Gordon G. et.al.* Current plate motions // *Geophys. J.Int.* 1990. Vol.101. P.425-478.
15. *Solomon S.C., Huang P.Y., Meinke L.* The seismic moment budget of slowly spreading ridges // *Nature*. 1988. Vol.334. P.58-60.
16. *Pacheco J.F., Sykes L.R., Scholz C.H.* Nature of seismic coupling along simple plate boundaries of the subduction type // *J. Geophys. Res.* 1993. Vol.98, N B8. P.14133-14159.
17. *Scholz C.H., Cowie P.A.* Determination of geological strain from fault slip data // *Nature*. 1990. Vol.346. P.837-839.
18. *Walsh J.J., Watterson J., Yielding G.* The importance of small scale faulting in regional extension // *Nature*. 1991. Vol.351. P.391-394.
19. *Cowie P.A., Scholz C.H., Edwards M., Malinverno A.* Fault strain and seismic coupling on mid-oceanic ridges // *J. Geophys. Res.* 1993. Vol.98, N B10. P.17911-17920.