

ВАРИАЦИИ КРИПЕКСА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПА ТЕКТОНИЧЕСКИХ СТРУКТУР И МЕХАНИЗМА ОЧАГА: СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

А.Н. Каверина, А.Г. Прозоров

CREEPEX DEPENDENCE ON THE TYPE
OF TECTONIC STRUCTURE AND SOURCE MECHANISM:
STATISTICAL ANALYSIS

A.N. Kaverina and A.G. Prozorov

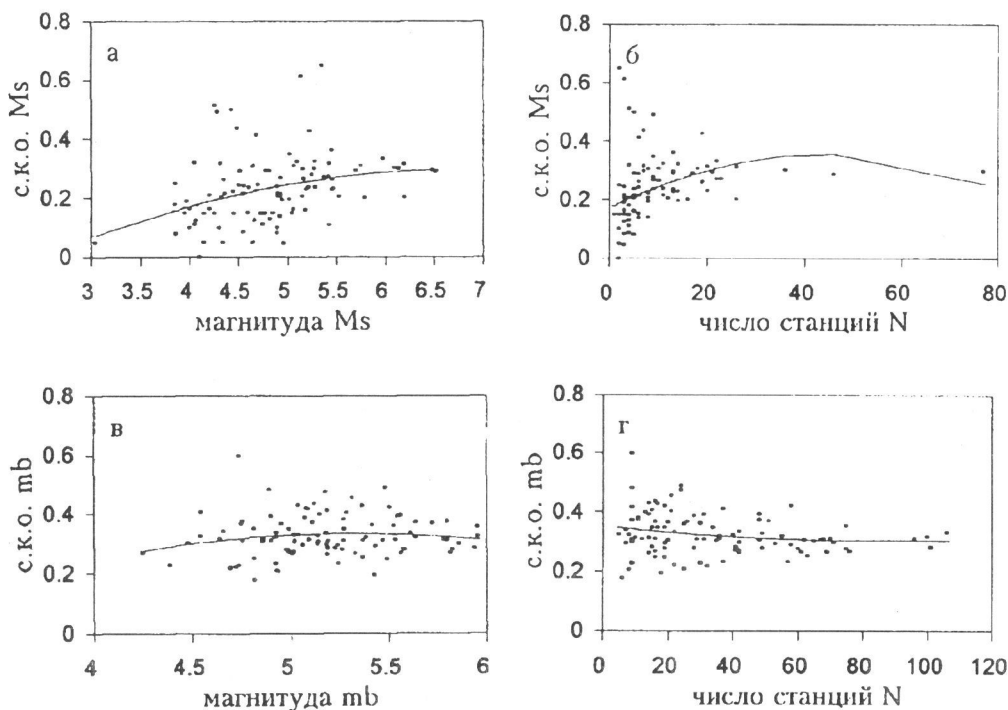
Creepex which is the difference between M_s magnitude and the orthogonal regression of M_s on m_b is used as a spectral characteristic of seismic sources. Estimation of creepex precision is made on EDR bulletin data. The statistical significance of the difference between the source spectrums of subduction and spreading zones is demonstrated using the data of A.M. Dziewonski's CMT catalog. The spectrum are different also for two continuous zones with different spreading rates. Creepex in relation to a parameter of source mechanism – null axis plunge – is studied for spreading and subduction zones.

Сейсмологическая сеть WWSSN определяет магнитуду M_s по поверхностным волнам, с периодом $T = 20$ с и магнитуду M_b по объемным, с периодом $T = 1$ с. Переменные M_s и m_b являются, таким образом, мерой энергии излучения в низко- и высокочастотной областях спектра.

Теоретическое изучение свойств поверхностных и объемных волн, излучаемых сейсмическими источниками различной природы – землетрясениями и подземными ядерными взрывами – показало, что соотношение M_s/m_b является хорошим дискриминантом таких событий [1]. Дискриминация объясняется, по-видимому, комбинацией эффектов различия в размерах источника (при $m_b = 6$ – это 1 км для взрывов и 10 км для землетрясений), в продолжительности события (0.5 с и 5 с соответственно), а также, возможно, различиями в механизме и глубине очага. Это в совокупности делает излучение землетрясений более низкочастотным по сравнению со взрывами той же силы, измеренной по m_b [2]. Соотношение M_s/m_b до сих пор является одним из основных критериев в исследованиях по распознаванию подземных ядерных взрывов [3].

Критерий M_s/m_b для выделения среди землетрясений высокочастотных и низкочастотных событий был впервые применен в работе А.Г. Прозорова, Д.А. Хадсона [4]. Позднее теми же авторами [5, 6] в качестве спектральной характеристики землетрясения был введен так называемый крипекс c – разность между M_s и ортогональной регрессией M_s на m_b (образовано от начальных частей слов *с*реер и *exp*losion). Пространственное распределение крипекса оказалось связанным с тектонической природой источников: отрицательные значения доминируют в зонах субдукции (что означает преобладание низкочастотных событий), положительные – в зонах спрединга (преобладание высокочастотных событий).

В последнее время возрос интерес к исследованию спектральных особенностей землетрясений в связи с концепцией так называемых медленных и глухих землетрясений. В работе Г. Березы, Т. Джордана [7] такие землетрясения исследуются по эпизодам возбуждения сферических колебаний Земли, при этом большинство медленных (низкочастотных) землетрясений обнаружено на океанических трансформных разломах, что подтверждает результаты, полученные ранее по крипексу. Данная работа продолжает исследование глобального распределения крипекса с целью оценки статистической значимости выявленных различий.



Р и с. 1. Зависимость среднего квадратичного отклонения оценок магнитуды M_s от магнитуды (а) и количества станций (б); то же для магнитуды m_b (в, г)

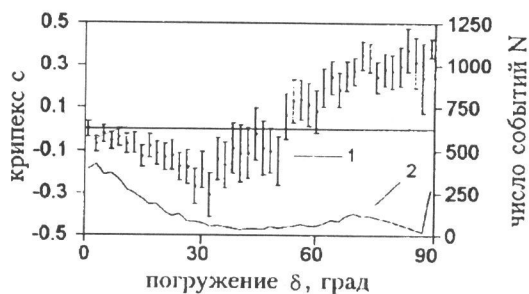
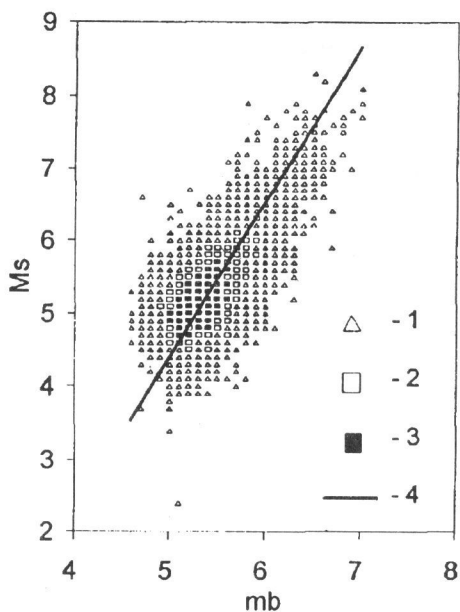
Исходные данные. Точность оценки величины крипекса для отдельного события определяется экспериментальной ошибкой определения магнитуд. Для оценки этой ошибки использовался бюллетень Earthquake Data Report (EDR) Геологической Службы США, представляющий собой сводку всех амплитудных данных и сейсмических фаз, которые относятся к событиям, опубликованным в каталоге Preliminary Determination of Epicenters (PDE). В бюллетене приведены средние значения магнитуд M_s и m_b и их оценки, полученные по отдельным станциям. Они вычисляются по формулам

$$M_s = \log(A/T) + 1.66 \log(\Delta) + 3.3,$$

$$m_b = \log(A/T) + Q(\Delta, h),$$

где A – максимальная амплитуда (в мкм); T – период (в с); Δ – эпицентральное расстояние (в град); Q – фактор, учитывающий глубину h и расстояние Δ [8]. При оценке среднего в бюллетене исключаются станционные значения магнитуд с отклонением от среднего более чем на 25%, а также оценки M_s , полученные по горизонтальным компонентам. Магнитуда M_s определена только для событий, фокальная глубина которых (учитывая стандартное отклонение) меньше 50 км, для станций с $20^\circ \leq \Delta \leq 160^\circ$ и для периодов $18 \leq T \leq 22$ с; при вычислении M_s не использовалась коррекция фокальной глубины. Магнитуда m_b не определялась по вступлениям РКР, а также для близких станций с $\Delta \leq 5^\circ$.

Для исследования зависимости крипекса от механизма очага использовались данные составленного Дзиевонским каталога СМТ, который, в частности, содержит представление тензора момента в собственной системе координат [9]. Каталог относится к периоду с 1977 по 1991 г.



Р и с. 2. Диаграмма $M_s - m_b$ для событий из СМТ каталога: 1 – менее 20 событий, 2 – от 20 до 40 событий, 3 – более 40 событий, 4 – линия ортогональной регрессии M_s на m_b

Р и с. 3. Зависимость крипекса и числа событий от угла погружения нейтральной оси δ :

1 – среднее значение крипекса c и границы отклонения среднего $\sigma_{av} = \sigma/N^{0.5} = 0.73/N^{0.5}$, 2 – число событий N

Р и с. 4. Гауссовский потенциал w для осреднения зависимости крипекса от угла погружения нейтральной оси δ

Точность оценки крипекса. Для оценки дисперсии магнитуд M_s и m_b был выбран период 01.09.90–15.10.90 гг. и землетрясения, для которых обе магнитуды определены по двум и более станционным значениям. Объем выборки был фиксирован на уровне $n = 100$ событий. Выборочные значения среднего квадратичного отклонения σ оценок магнитуды M_s и m_b представлены на рис. 1. Видно, что средняя линия, проведенная по этим точкам, практически не зависит ни от магнитуды, ни от числа станций. Среднее значение дисперсии вычислено на основе отклонений от средней величины для всех событий и станций. Для M_s объем выборки равен 911, среднее квадратичное отклонение $\sigma(M_s) = 0.28$, для m_b объем выборки составил 3405 отклонений, и $\sigma(m_b) = 0.32$.

По определению крипекс вычисляется по формуле

$$c = M_s - km_b - l,$$

где k и l – коэффициенты ортогональной регрессии M_s на m_b . Поэтому дисперсию крипекса можно оценить по формуле

$$\sigma^2(c) = \sigma^2(M_s) + k^2\sigma^2(m_b).$$

На рис. 2 представлены PDE-оценки магнитуд M_s и m_b для всех землетрясений из каталога Дзиевонского за период 1977–1991 гг. (число событий $N = 5659$) и линия ортогональной регрессии,

$$M_s = 2.13m_b - 6.25.$$

Для этой совокупности событий $k = 2.13$, стандартное отклонение крипекса для отдельного события составляет $\sigma = 0.73$.

Номер зоны	Название зоны	Среднее значение крипекса	Отклонение среднего значения	Число событий
Зоны спрединга				
1	Южно-Тихоокеанское поднятие (до пересечения с Чилийским поднятием)	+0.50	0.08	81
2	Австрало-Антарктическое поднятие	+0.48	0.06	130
3	Восточно-Тихоокеанское поднятие (до пересечения с Чилийским поднятием)	+0.40	0.07	117
4	Чилийское поднятие	+0.23	0.08	84
5	Северо- и Южно-Атлантический хребты	+0.23	0.04	294
6	Южная граница плиты Кокос	+0.18	0.10	53
7	Аравийско-Индийский и Центрально-Индийский хребты	+0.11	0.07	96
8	Африкано-Антарктический и Западно-Индийский хребты	+0.07	0.08	84
Зоны субдукции				
9	Зондский желоб	-0.26	0.04	312
10	Южно-Сэндвичев желоб	-0.22	0.07	97
11	Курило-Камчатский и Японский желоба	-0.21	0.04	360
12	Перуанский и Чилийский желоба	-0.11	0.05	228
13	Алеутский желоб	-0.11	0.04	277
14	Филиппинский и Нансей желоба	-0.10	0.03	545
15	Марианский и Бонинский желоба	-0.02	0.06	160
16	Центрально-Американский желоб	+0.19	0.07	123

Крипекс в зонах спрединга и субдукции. Из исследуемой совокупности землетрясений было выделено несколько выборок в соответствии с принадлежностью к зонам спрединга и субдукции, использовались при этом данные из [10–13]. Средние значения крипекса для исследованных зон спрединга и субдукции приведены в таблице.

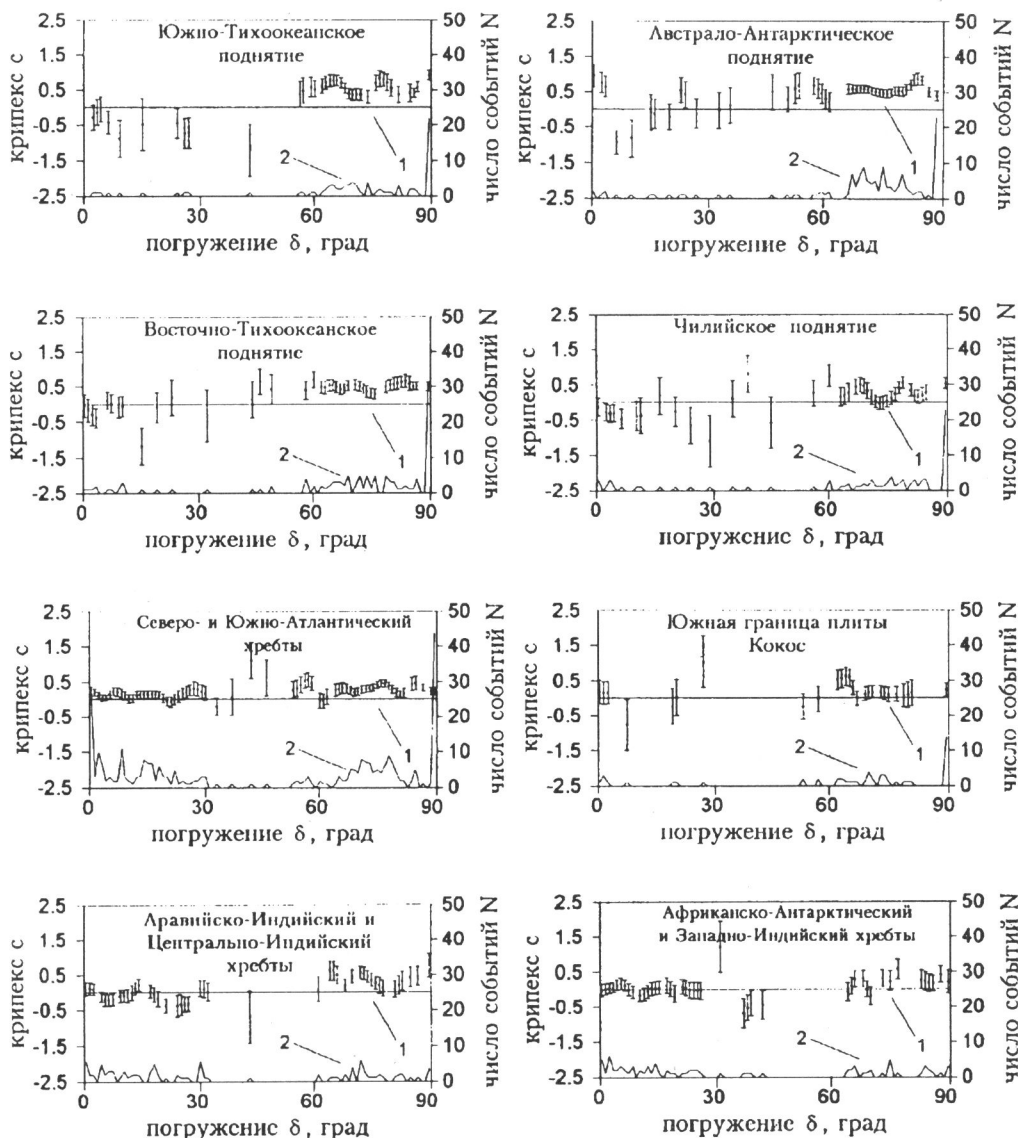
Из зон спрединга наиболее высокие значения крипекса имеют Австрало-Антарктическое (№ 2), Южно-Тихоокеанское (№ 1) и Восточно-Тихоокеанское (№ 3) поднятия; наиболее низкие, но положительные – Аравийско-Индийский и Центрально-Индийский (№ 7), Африкано-Антарктический и Западно-Индийский хребты (№ 8).

В зонах субдукции крипекс отрицателен (за исключением Центрально-Американского желоба), минимальные значения относятся к Зондскому (№ 9), Южно-Сэндвичеву (№ 10), Курило-Камчатскому и Японскому желобам (№ 11). Цепочка желобов от Новой Гвинеи до Новой Зеландии исключена из рассмотрения ввиду их сложного строения, требующего более детального изучения.

Средние значения крипекса для всех исследованных зон спрединга и субдукции равны: для спрединга $c = 0.28 \pm 0.024$, для субдукции $c = -0.13 \pm 0.016$. Различие средних значений составляет $14,1\sigma$ и тем самым бесспорно статистически значимо.

Зависимость величины крипекса от механизма очага. В качестве параметра, характеризующего механизм очага, был выбран угол погружения нейтральной оси δ . Термин "механизм очага", таким образом, имеет здесь узкий смысл и разделяет механизм землетрясения на три типа: 1) чистый сдвиг ($\delta = 90^\circ$), 2) чистый сброс и взброс ($\delta = 0^\circ$), 3) сброс или взброс со сдвиговой компонентой. Угол погружения нейтральной оси – параметр, который позволяет анализировать данные, не углубляясь в детали, хотя и не позволяет полностью расклассифицировать сейсмические события по типу механизма очага.

Для определения по всему миру зависимости крипекса от угла погружения нейтральной оси была использована совокупность из 5659 событий, в которую вошли все землетрясения из каталога с определенными M_s и m_b . На рис. 3 представлены вели-



Р и с. 5. Зависимости крипекса и числа событий от угла погружения нейтральной оси для восьми зон спрединга. Условные обозначения как на рис. 3

чины крипекса c , осредненные по углу δ с шагом 2° , а также число событий N с тем же шагом по δ .

Крипекс положителен для очагов с преобладающей сдвиговой компонентой и чистых сдвигов ($54^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$), и отрицателен для остальных значений угла δ . Минимальное значение достигается при $\delta = 30^\circ$, что соответствует очагам с преобладающей сбросо/взбросовой компонентой. Для чистых сбросов/взбросов крипекс приближается к нулю, оставаясь отрицательным.

Очагов с преобладающей сбросо/взбросовой компонентой ($0^\circ \leq \delta \leq 30^\circ$) значительно больше в каталоге, чем очагов с преобладающей сдвиговой компонентой. Максимальное удельное количество событий приходится на чистый сдвиг ($\delta = 90^\circ$). Относительно малое число событий приходится на участок $30^\circ \leq \delta \leq 50^\circ$.

Региональные зависимости величины крипекса от механизма очага. Пространственное распределение землетрясений с различными механизмами очага связано с принципиальными различиями в тектоническом строении сейсмических зон. В зонах субдукции большая часть землетрясений имеет взбросовый характер, в районах рифтовых долин наблюдаются сбросы, а на трансформных разломах преобладают сдвиги [14]. В связи с этим интерес представляет зависимость крипекса от угла погружения нейтральной оси для различных типов границ плит.

Поскольку объем выборки для одной зоны относительно мал, зависимости крипексов сглажены: каждому углу δ соответствует крипекс, осредненный по всем значениям для событий с углом от $\delta - 5^\circ$ до $\delta + 5^\circ$ с гауссовским потенциалом осреднения, значения которого приведены на рис. 4.



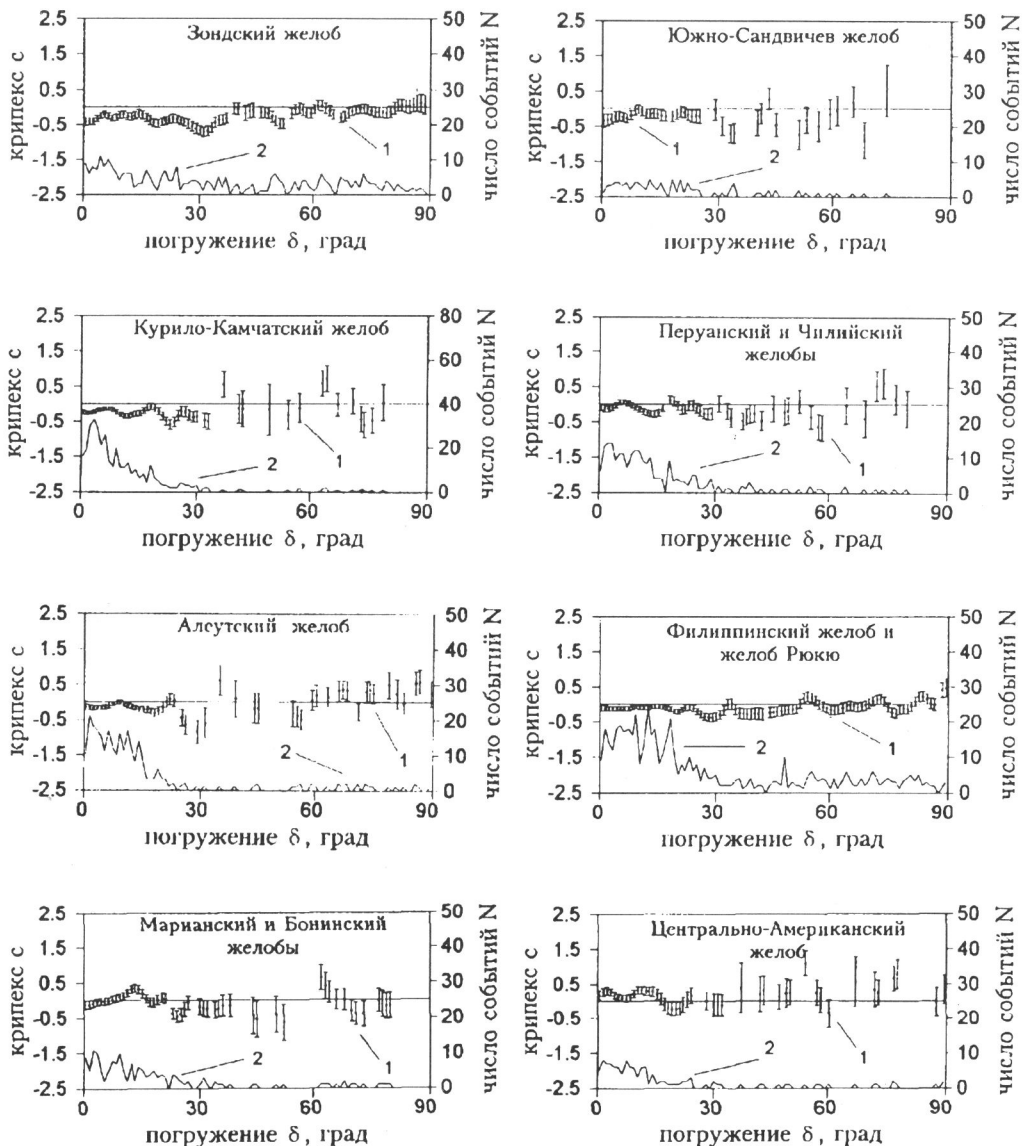
Рис. 6. Зависимость средних значений крипекса для зон спрединга от скорости спрединга:

Цифры соответствуют нумерации первых восьми зон в таблице

Для зон спрединга на рис. 5 представлены графики зависимости крипекса и числа событий от угла погружения нейтральной оси (см. таблицу) (зависимость осреднена по углу δ с шагом 2° и сглажена указанным выше методом). Для хребтов в Тихом океане (№ 1, № 3) и Австрало-Антарктического поднятия (№ 2) почти все землетрясения имеют сдвиговый механизм очага или доминирующую сдвиговую компоненту. Для этих событий крипекс положителен и колеблется около 0.5. В районах Атлантического (№ 5), Африкано-Антарктического и Западно-Индийского (№ 8), Аравийско-Индийского и Центрально-Индийского (№ 7) хребтов наряду со сдвиговыми присутствуют и сбросо/взбросовые механизмы очага — для событий первого типа крипекс в основном положителен, для второго — колеблется около нуля. Для всех землетрясений этих областей среднее значение крипекса для сбросо/взбросового типа ($0^\circ \leq \delta \leq 54^\circ$) значительно отличается от такового для сдвигов ($55^\circ \leq \delta \leq 90^\circ$): для сбросо/взбросов крипекс $c = 0.07 \pm 0.05$, для сдвигов $c = 0.29 \pm 0.05$.

Цепочка хребтов от Австрало-Антарктического до Восточно-Тихоокеанского поднятия (№ 1, № 2, № 3) характеризуется более высокой скоростью спрединга, чем цепочка от Северо-Атлантического до Аравийско-Индийского хребта (№ 5, № 7, № 8). Средние значения крипекса для событий в областях этих цепочек хребтов равны 0.46 ± 0.04 и 0.18 ± 0.03 соответственно, что отвечает различию в 5.3σ . Зависимость значений крипекса от средней по протяженности хребта скорости спрединга приведена на рис. 6 (значения скоростей вычислены по данным работы [15]).

Для зон субдукции на рис. 7 представлены графики зависимости крипекса и числа событий от угла погружения нейтральной оси, полученные аналогично зависимостям для зон спрединга. Большинство зон характеризуется практическим отсутствием очагов с преобладающей сдвиговой компонентой. Исключение составляют Зондский (№ 9), Филиппинский и Нансей желоба (№ 14), где механизмы со сдвиговой компонентой также присутствуют и составляют 42% и 25% соответственно.



Р и с. 7. Зависимости крипекса и числа событий от угла погружения нейтральной оси для восьми зон субдукции. Условные обозначения как на рис. 3

* * *

На основе каталога EDR оценена дисперсия магнитуд M_s и m_b , которая определяет стандартное отклонение крипекса $\sigma = 0.73$ для отдельного события из исследуемой совокупности. Таким образом, точность определения крипекса достаточна для утверждения о статистической значимости различий в глобальном распределении крипекса: преобладание высокочастотных землетрясений с низкими значениями крипекса в зонах субдукции и низкочастотных землетрясений с высокими значениями крипекса в зонах спрединга. Низкие частоты в спектре связаны с относительно большими размером очага и временем в очаге, что, в свою очередь, говорит о низком уровне тектонических

напряжений или относительно высокой температуре материала. Видимо, это же является причиной того, что в областях, где скорость спрединга выше (Тихоокеанические поднятия и Австрало-Антарктический хребет), значения крипекса существенно превышают значения в зонах с меньшей скоростью (Северо- и Южно-Атлантический, Африкано-Антарктический и Западно-Индийский хребты).

Зависимость для всего мира величины крипекса от угла погружения нейтральной оси говорит о преобладании низких частот в спектре землетрясений с доминирующей сдвиговой компонентой. Выбранный параметр механизма очага – угол δ – не позволяет разделить сбросы и взбросы, тем не менее для событий с доминирующей сбросо/взбросовой компонентой заметно уменьшение величины крипекса, т.е. преобладание высокочастотных событий.

В работах [16, 17] отмечается теоретическая зависимость магнитуд m_R и m_P (аналоги M_s и m_b соответственно) от механизма очага. В частности, при одинаковых глубине очага, сейсмическом моменте и временной функции моделей источников у землетрясений с вертикальной подвижкой, как правило, магнитуды завышены по сравнению с землетрясениями с горизонтальной подвижкой. Однако, поскольку завышаются обе магнитуды, и коэффициент завышения зависит от расположения очага по отношению к станции, результат для крипекса остается неопределенным.

Проведенный в работе [18] анализ огибающих P -волн на фронте нарастания для 33 сильных взбросовых, сдвиговых и сбросовых землетрясений по записям частотно-избирательных сейсмических станций показал, что взбросы имеют наиболее высокочастотные, а сбросы – наиболее низкочастотные спектры.

Полученная в данной работе зависимость становится более прозрачной для отдельных зон спрединга и субдукции. В областях спрединга большее число землетрясений имеет сдвиговый характер и относится, видимо, к разломам, направленным вкостростирунию хребта. В зонах же хребтов Атлантического и западной части Индийского океанов существенно больше событий с доминирующей сбросо/взбросовой компонентой. Это, по-видимому, сбросы внутри рифтовых долин [19, 20], хотя по углу погружения нейтральной оси мы не можем это утверждать однозначно. Зависимость крипекса от угла δ для этих хребтов, позволяет сделать вывод, что сбросы в рифтовой долине являются более высокочастотными, чем сдвиговые землетрясения на трансверсальных разломах. Это плохо согласуется с повышенным тепловым потоком в осевой части хребта, уменьшающимся по мере удаления от нее.

В зонах субдукции в основном имеют место события с доминирующей сбросо/взбросовой компонентой. Величина крипекса может варьировать для разных зон и даже внутри одной зоны в связи с разнообразием и сложным строением зон субдукции. Однако чаще крипекс отрицателен, что подтверждает наличие высоких тектонических напряжений и более высокой прочности пород погружающейся холодной литосферы.

Авторы благодарны академику В.И. Кейлис-Бороку и А.В. Ландеру за ценные предложения в ходе обсуждения работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кейлис-Борок В.И. Различие спектров поверхностных волн землетрясений и подземных взрывов // Труды ИФЗ АН СССР. 1960. № 15. С. 88–101.
2. Dahlman O., Israelson H. Monitoring underground nuclear explosions. Amsterdam: Elsevier. 1977. 440 p.
3. Stevens J.L., Day S.M. The physical basis of $m_b : M_s$ and variable frequency magnitude methods for earthquake/explosion discrimination // J. Geophys. Res. 1985. Vol. 90, N B4. P. 3009–3020.
4. Прозоров А.Г., Хадсон Д.А. Зависимость между M_s и m_b от региональных условий и локальных взаимосвязей // Машинный анализ цифровых сейсмических данных. М.: Наука, 1974. С. 65–82. (Вычисл. сейсмология; Вып. 7).
5. Прозоров А.Г., Хадсон Д.А. Изменение крипекса перед сильными землетрясениями // Прогноз землетрясений и изучение строения Земли. М.: Наука, 1983. С. 26–35. (Вычисл. сейсмология; Вып. 15).
6. Prozorov A.G., Sabina F.J. Study of the properties of seismicity in the Mexico region // Geophys. J. Roy. Astron. Soc. 1984. Vol. 76. P. 317–336.

7. *Beroza G.C., Jordan T.H.* Searching for slow and silent earthquakes using free oscillations // *J. Geophys. Res.* 1990. Vol. 95. P. 2485–2510.
8. *Gutenberg B., Richter C.F.* Magnitude and energy of earthquakes // *Ann. di Geof.* 1956. Vol. 9, N 1. P. 1–15.
9. *Dziewonski A.M., Ekstrom G., Franzen J.E., Woodhouse J.H.* Centroid-moment tensor solutions for January–March 1986 // *Phys. Earth and Planet. Inter.* 1987. Vol. 45. P. 1–10.
10. Geodynamic Map of the Circum-Pacific Region. American Association of Petroleum Geologists. 1985.
11. World Ocean Floor, 1 : 42 440 000. National Geographic Society. 1981.
12. Рельеф дна мирового океана, 1 : 25 000 000. Главное управление навигации и океанографии Мин. Обороны СССР. 1980.
13. Тектоническая карта мира, 1 : 15 000 000. Мингео СССР. 1981.
14. *Кокс А., Харп Р.* Тектоника плит. М.: Мир, 1989. 427 с.
15. *Demets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S.* Current plate motions // *Geophys. J. Int.* 1990. Vol. 101, N 2. P. 425–478.
16. *Левшин А.Л., Грудева Н.П.* Некоторые вопросы теории магнитуд // Магнитуда и энергетическая классификация землетрясений. Т. 1. М.: ИФЗ АН СССР, 1974. С. 172–180.
17. *Грудева Н.П.* Исследование динамических характеристик сейсмических волн от удаленных точечных источников. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.12. М.: ИФЗ АН СССР, 1976. 116 с.
18. *Нерсесов И.Л., Копничев Ю.Ф., Медведева Е.В.* Особенности высокочастотного излучения сильных землетрясений с различными механизмами очагов // ДАН СССР. 1979. Т. 244, N 4. С. 859–863.
19. *Huang P.Y., Solomon S.C., Bergman E.A., Nabelek J.L.* Focal depths and mechanisms of Mid-Atlantic ridge earthquakes from body waveform inversion // *J. Geophys. Res.* 1986. Vol. 91, N B1. P. 579–598.
20. *Huang P.Y., Solomon S.C.* Centroid depths and mechanisms of mid-ocean ridge earthquakes in the Indian ocean, gulf of Aden and Red sea // *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92, N B2. P. 1361–1382.