

УДК 550.34

ХАРАКТЕРИСТИКИ КОЛЬЦЕВОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГЛУБИН В РЕГИОНЕ ЮЖНОЙ АМЕРИКИ

^{1,2)}Копничев Ю.Ф., ¹⁾Соколова И.Н.

¹⁾Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

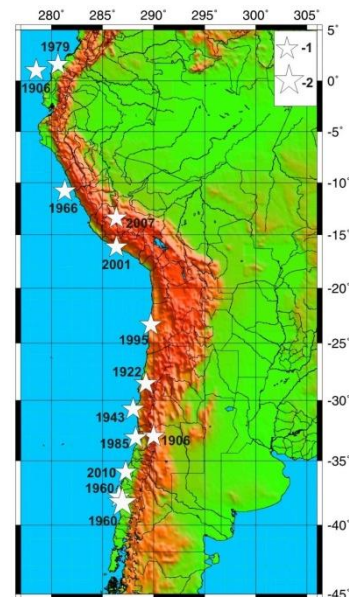
²⁾Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия

Приводятся результаты анализа сейсмичности в регионе Южной Америки на глубинах 0 - 33 и 34 - 70 км перед сильными и сильнейшими землетрясениями, произошедшими в 1995 - 2010 гг., а также в зонах сейсмических брешей. В обоих диапазонах глубин выделены кольцевые структуры сейсмичности. Показано, что эпицентры главных произошедших событий находились, как правило, в областях пересечения или наибольшего сближения выделенных кольцевых структур сейсмичности. На основании анализа данных о размерах колец сейсмичности и пороговых значениях магнитуд получены прогнозные оценки магнитуд готовящихся землетрясений в зонах сейсмических брешей. Проведено сравнение параметров кольцевых структур в районах Южной Америки, Суматры и северо-восточной Японии.

В [1 - 4] показано, что в зонах субдукции перед сильными и сильнейшими землетрясениями формируются кольцевые структуры сейсмичности в разных диапазонах глубин. Это позволяет осуществлять долгосрочный прогноз сильных сейсмических событий. В статье рассматриваются особенности кольцевой сейсмичности в регионе Южной Америки, который характеризуется аномально высоким количеством сильнейших землетрясений [5, 6].

ИСТОРИЧЕСКАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ

Начиная с 1900 г. в регионе Южной Америки (между 46°S и 5°N) произошло 13 сильных и сильнейших сейсмических событий с $M_w \geq 8.0$. В это число входит и Великое Чилийское землетрясение 22 мая 1960 г. с $M_w = 9.6$ – наиболее сильное событие на земном шаре из числа зарегистрированных инструментально (рисунок 1, таблица 1). Очаговая зона этого грандиозного события простиралась примерно между 46°S и 37.5°S. Землетрясение породило одно из сильнейших цунами прошлого века, высота волн которого достигала 30 м [6].



Эпицентры сильных и сильнейших землетрясений:
1 – $M_w = 8.0 - 8.8$; 2 – $M_w = 9.6$ (указаны годы этих событий)

Рисунок 1. Регион исследований – Южная Америка

Таблица 1. Сильнейшие землетрясения в регионе Южной Америки

№	Дата	φ, град. S	λ, град. W	h, км	M_w	Район	№	Дата	φ, град. S	λ, град. W	h, км	M_w	Район
1	31.01.1906	1.0 N	81.5		8.6	Эквадор-Колумбия	8	12.12.1979	1.60 N	79.36	24	8.1	Эквадор-Колумбия
2	17.08.1906	33.0	70.0		8.5	Чили	9	03.03.1985	33.14	71.76	35	8.0	Чили
3	11.11.1922	28.55	70.75	35	8.7	Чили	10	30.07.1995	23.34	70.26	41	8.0	Чили
4	06.04.1943	30.75	72.00		8.2	Чили	11	23.06.2001	16.26	73.64	33	8.4	Перу
5	21.05.1960	37.85	73.38	12	8.2	Чили	12	15.08.2007	13.39	73.64	39	8.0	Перу
6	22.05.1960	38.29	73.05	35	9.6	Чили	13	27.02.2010	35.91	72.73	35	8.8	Чили
7	17.10.1966	10.80	78.68	34	8.2	Перу	-	-	-	-	-	-	-

Следующим по силе стало недавнее землетрясение в центральном Чили 27.02.2010 г., которое произошло к северу от очага 1960 г. Имели место еще два очень сильных события: в центральном Чили (11.11.1922 г., $M_w = 8.7$) и в районе Эквадора-Колумбии (31.01.1906 г., $M_w = 8.6$). Эти землетрясения так-

же сопровождалось мощными цунами. Большинство сильных землетрясений имело механизмы типа надвига, характерные для зон субдукции [7]. Как можно видеть из рисунка 1, в регионе Южной Америки выделяются также зоны сейсмических брешей, в первую очередь, в районе Эквадора - северного Перу

(между 9°S и 1°S) и в районе южного Перу – северного Чили (примерно между 23°S и 17°S). Здесь не было сильных землетрясений с $M_w \geq 8.0$ в течение последних 110 лет.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

По аналогии с [1 - 4] рассмотрены характеристики сейсмичности для разных участков зоны Беньофа в двух диапазонах глубин: 0 - 33 и 34 - 70 км. Используются данные из каталогов землетрясений NEIC (National Event Information Center, Геологическая служба США) с 01.01.1973 г. Для анализа выбирались события из временного интервала, начиная с 01.01.1973 г. до дня, предшествовавшего главному

событию. Исключение составили данные для очаговой зоны последнего землетрясения 27.02.2010 г., для которого рассмотрена сейсмичность начиная с 01.01.1964 г. Отбирались землетрясения с $M \geq M_{п1}$ и $M \geq M_{п2}$ для первого и второго диапазонов глубин, соответственно ($M_{п1}$ и $M_{п2}$ – пороговые значения магнитуд). Обработаны данные о сейсмичности перед 12 сильными и сильнейшими землетрясениями в регионе Южной Америки (таблица 2). Кроме того, изучены данные о сейсмичности в зонах сейсмических брешей - в районах Эквадора, северного и центрального Чили. Для этих зон рассматривались характеристики сейсмичности в период 01.01.1973 - 01.01.2010.

Таблица 2. Характеристики кольцевых структур сейсмичности перед сильными и сильнейшими землетрясениями в регионе Южной Америки

Дата	φ, град. S	λ, град. W	h, км	Mw	L, km	l, km	Mп1	Mп2	Район
30.07.1995	23,34	70,26	41	8	200	150	5	5	Чили
03.10.1995	2,75	77,88	24	7	110		4		Эквадор
21.02.1996	9,71	79,85	15	7,5	120	95	4,4	4,3	Перу
12.11.1996	14,99	75,68	17	7,7	160	110	4,8	4,5	Перу
30.01.1998	23,85	70,15	41	7,1	55	35	4,5	4	Чили
04.08.1998	0,59	80,39	26	7,2	85		4		Эквадор
23.06.2001	16,26	73,64	33	8,4	280	110	5	5,2	Перу
07.07.2001	17,54	72,08	33	7,6	50	85	4,7	4	Перу
15.11.2004	4,7 N	77,51	15	7,2	90	55	4,2	4,2	Колумбия
15.08.2007	13,39	76,64	39	8	170	65	5	5	Перу
14.11.2007	22,25	69,89	40	7,7	140	70	4,7	4,7	Чили
26.02.2010	35,85	72,72	35	8,8	320	270	5	5	Чили

АНАЛИЗ ДАННЫХ

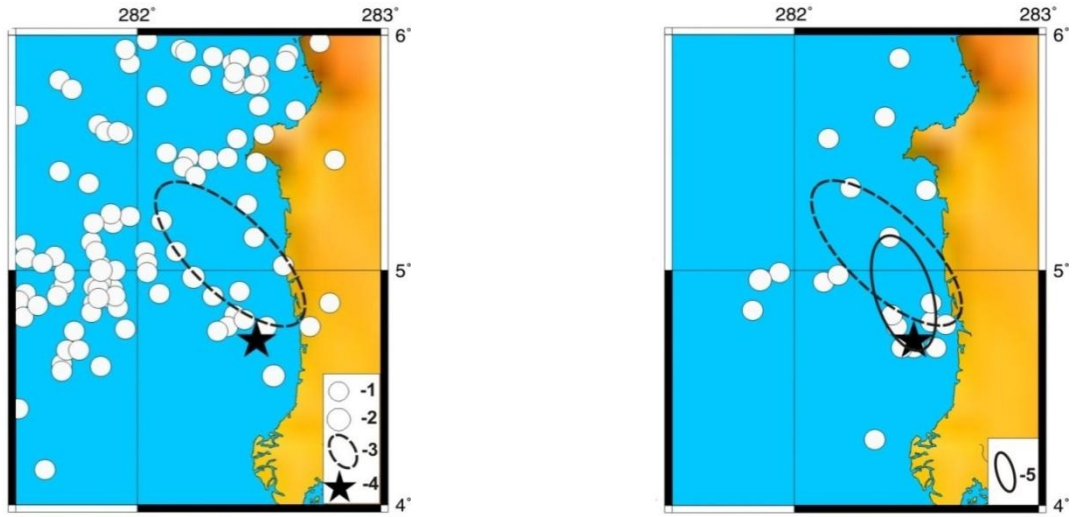
Данные по сильному землетрясению 15.08.2007 г. ($M_w=8.0$) приведены в [1]. Ниже описываются характеристики сейсмичности перед остальными 11 землетрясениями с $M_w=(7.0 - 8.8)$.

Землетрясение 15.11.2004 г. ($M_w=7.2$) произошло в районе Колумбии. Из рисунка 2 видно, что в океанической коре и верхах мантии сформировалась кольцевая структура сейсмичности в диапазоне глубин 0 - 33 км ($M_{п1}=4.2$) с большой осью длиной $L \sim 90$ км, ориентированная под углом $\sim 45^\circ$ к побережью. За тот же период проявилась также кольцевая структура на глубинах 34 - 70 км ($M_{п2}=4.2$) с большой осью размером $l \sim 55$ км, вытянутая в субмеридиональном направлении. Эпицентр главного события находился на расстоянии $\Delta r \sim 15$ км от южной области пересечения колец. Далее, для краткости и

следуя [1 - 4], кольцевые структуры первого диапазона глубин называются «мелкими» (кольцами), а второго – «глубокими».

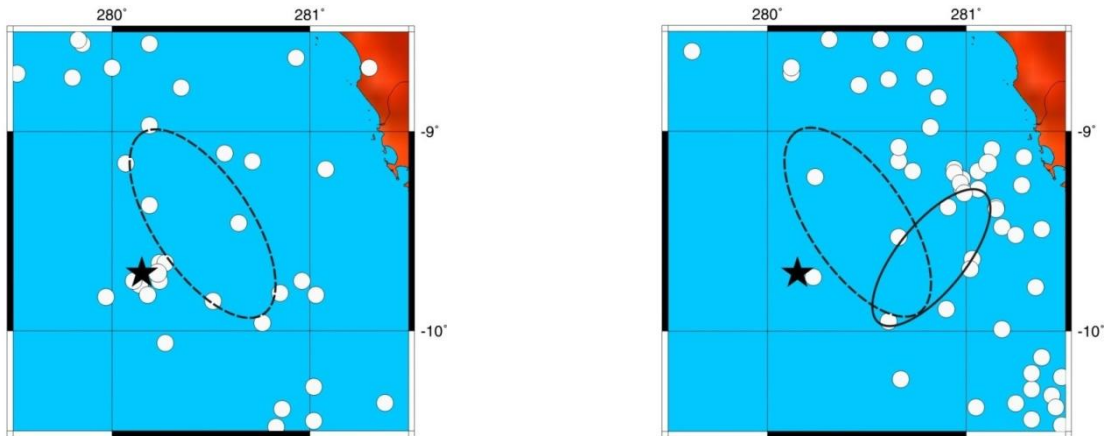
Землетрясение 21.02.1996 г. ($M_w=7.5$) произошло в районе северного Перу. Из рисунка 3 следует, что здесь в период 01.01.1973 - 20.02.1996 образовалось мелкое кольцо ($L \sim 120$ км, $M_{п1}=4.4$), вытянутое параллельно берегу. За тот же период проявилось и глубокое кольцо ($l \sim 95$ км, $M_{п2}=4.3$), ориентированное почти нормально к мелкому. Эпицентр землетрясения 21.02.1996 г. находится к юго-западу от мелкого кольца, на расстоянии ~ 40 км от западной области пересечения колец.

Землетрясение 12.11.1996 г. ($M_w=7.7$) произошло в районе южного Перу. На рисунке 4 показан характер сейсмичности в окрестностях очага этого события.



а – на глубине 0-33 км
б – на глубине 34-70 км
 Эпицентры землетрясений с магнитудой: 1 – $4.2 \leq M < 6.0$; 2 – $M \geq 6.0$;
 3 – мелкое кольцо; 4 – эпицентр главного события; 5 – глубокое кольцо

Рисунок 2. Кольцевая сейсмичность перед землетрясением 15.11.2004 в районе Колумбии

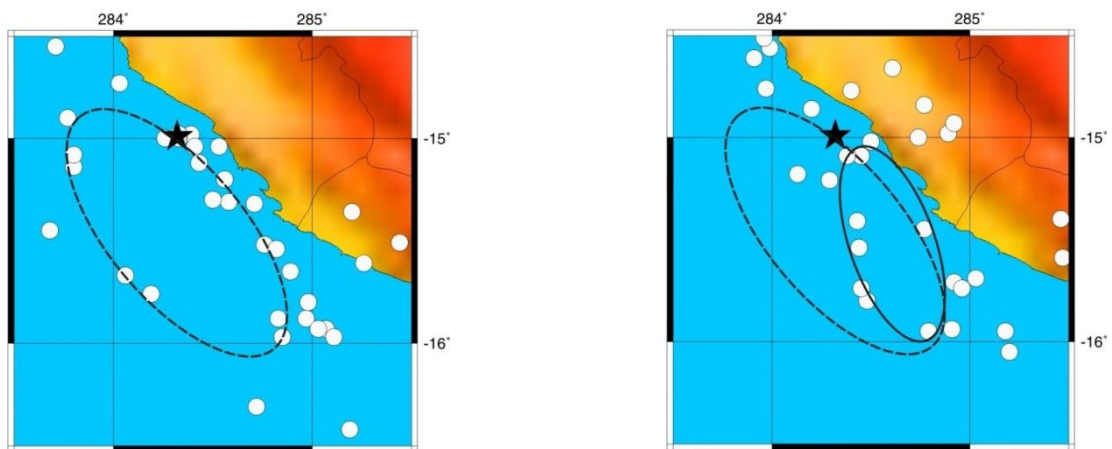


Кружок: малый - ($4.4 \leq M < 6.0$); большой - $M \geq 6.0$
а – на глубине 0-33 км

Кружок: малый - ($4.3 \leq M < 6.0$); большой - $M \geq 6.0$
б – на глубине 34-70 км

Остальные обозначения – на рисунке 2

Рисунок 3. Кольцевая сейсмичность перед землетрясением 21.02.1996 г. в районе северного Перу



Кружок: малый - ($4.8 \leq M < 6.0$); большой - $M \geq 6.0$
а – на глубине 0-33 км

Кружок: ($4.5 \leq M < 6.0$)
б – на глубине 34-70 км

Остальные обозначения – на рисунке 2

Рисунок 4. Кольцевая сейсмичность перед землетрясением 12.11.1996 г. в районе южного Перу

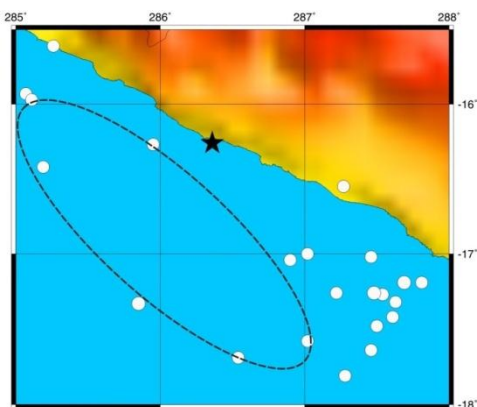
Видно, что в данном случае сформировались мелкое кольцо ($L \sim 160$ км, $M_{п1} = 4.8$), ориентированное параллельно береговой линии, и глубокое кольцо ($L \sim 110$ км, $M_{п2} = 4.5$), вытянутое в близмеридиональном направлении. Эпицентр главного землетрясения находится на расстоянии ~ 15 км от северной области пересечения колец

Землетрясение 23.06.2001 г. ($M_w = 8.4$) произошло в районе южного Перу. На рисунке 5 показан характер сейсмичности в окрестностях очаговой зоны в период 01.01.1973 - 22.06.2001 гг.

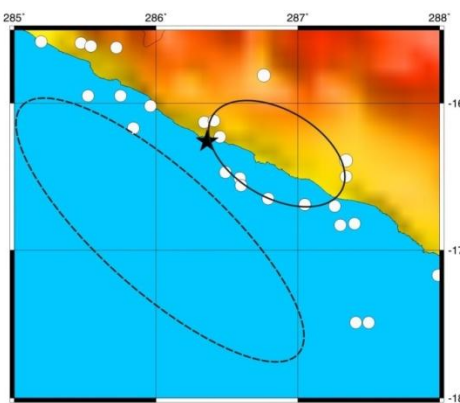
Видно, что в рассматриваемом районе сформировались оба кольца сейсмичности: мелкое ($L \sim 280$ км, $M_{п1} = 5.0$), простирающееся вдоль побережья, и пересекающее береговую линию, и глубокое

($L \sim 110$ км, $M_{п2} = 5.2$). Интересно, что в данном случае выполняется условие $M_{п1} < M_{п2}$, хотя гораздо чаще наблюдается обратная зависимость [1 - 4]. Эпицентр главного события находился в районе глубокого кольца, на расстоянии ~ 25 км от мелкого кольца. Следует отметить сравнительно малое число землетрясений в районе мелкого кольца (всего 8); все они приходятся на период с 1979 г. по 1998 г. Кроме того, максимальная магнитуда этих событий не превышала 6.0.

Землетрясение 27.02.2010 г. ($M_w = 8.8$) было сильнейшим после Великого Чилийского землетрясения 1960 г. На рисунке 6 показан характер сейсмичности перед этим землетрясением за период 01.01.1964 - 26.02.2010 гг.



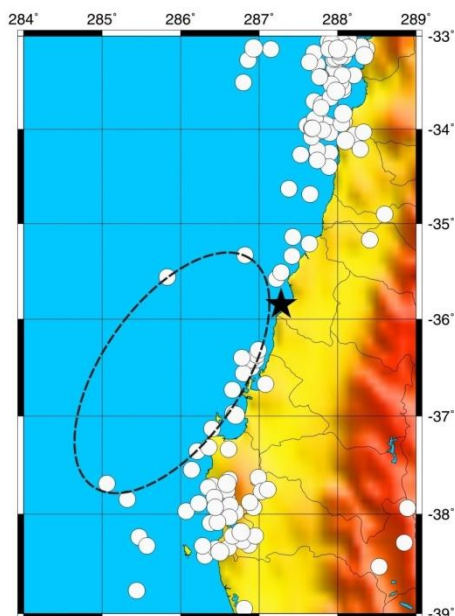
Кружок: малый - ($5.0 \leq M < 6.0$); большой - $M \geq 6.0$
а - на глубине 0-33 км



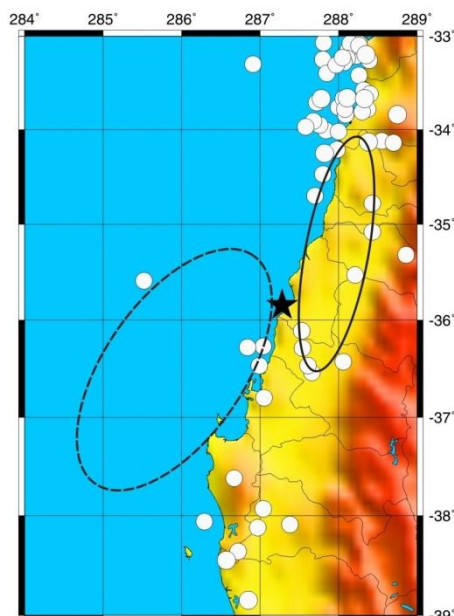
Кружок: ($5.2 \leq M < 6.0$); большой - $M \geq 6.0$
б - на глубине 34-70 км

Остальные обозначения - на рисунке 2

Рисунок 5. Кольцевая сейсмичность перед землетрясением 23.06.2001 г. в районе южного Перу



Кружок: малый - ($5.0 \leq M < 6.0$); большой - $M \geq 6.0$
а - на глубине 0-33 км



Кружок: ($4.5 \leq M < 6.0$); большой - $M \geq 6.0$
б - на глубине 34-70 км

Остальные обозначения - на рисунке 2

Рисунок 6. Кольцевая сейсмичность перед землетрясением 27.02.2010 г. в районе центрального Чили

Как следует из рисунка 6, в данном случае сформировались мелкое кольцо ($L \sim 320$ км, $M_{п1} = 5.0$), вытянутое вдоль береговой линии, и узкое глубокое кольцо ($l \sim 270$ км, $M_{п2} = 5.0$), ориентированное в субмеридиональном направлении. Кольца почти касаются в районе $\sim 36^\circ S$ (расстояние между ними менее 30 км, что во много раз меньше размеров колец); эпицентр главного события находится в области наибольшего сближения колец сейсмичности. Следует отметить, что на севере глубокое кольцо граничит с очаговой зоной землетрясения 1985 г. ($M_w = 8.0$), а на юге мелкое кольцо граничит с зоной землетрясения 1960 г. На рисунке 7 показано распределение магнитуд землетрясений, концентрирующихся в районе мелкого кольца.

Из рисунка 7 видно, что примерно 90% событий произошло в период 1971 - 2009 гг. При этом наблюдается некоторое увеличение количества землетрясений за единицу времени в последние 4 года перед главным событием. Магнитуды M землетрясений в районе мелкого кольца не превышали 5.9.

Данные о параметрах кольцевых структур, сформировавшихся перед остальными 7 сильными землетрясениями, приведены в таблице 2. Заметим, что для двух событий, произошедших в районе Эквадора, не удалось выявить глубоких колец сейсмичности.

Зоны сейсмических брешей. На рисунках 8 - 11 представлены характеристики сейсмичности в зонах сейсмических брешей - в районах Колумбии-Эква-

дора и Чили. Для этих зон рассмотрены кольцевые структуры с $M_{п1}, M_{п2} > \sim 5.0$.

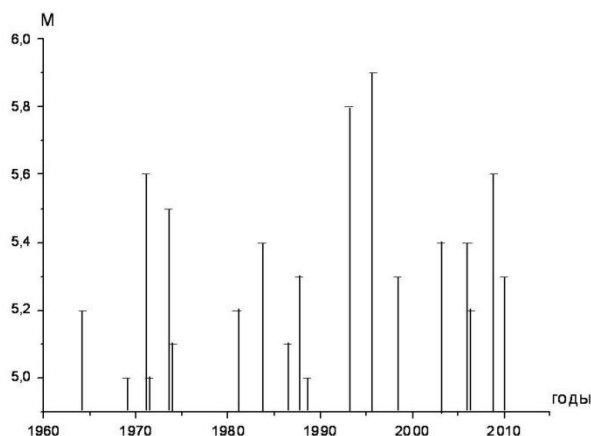
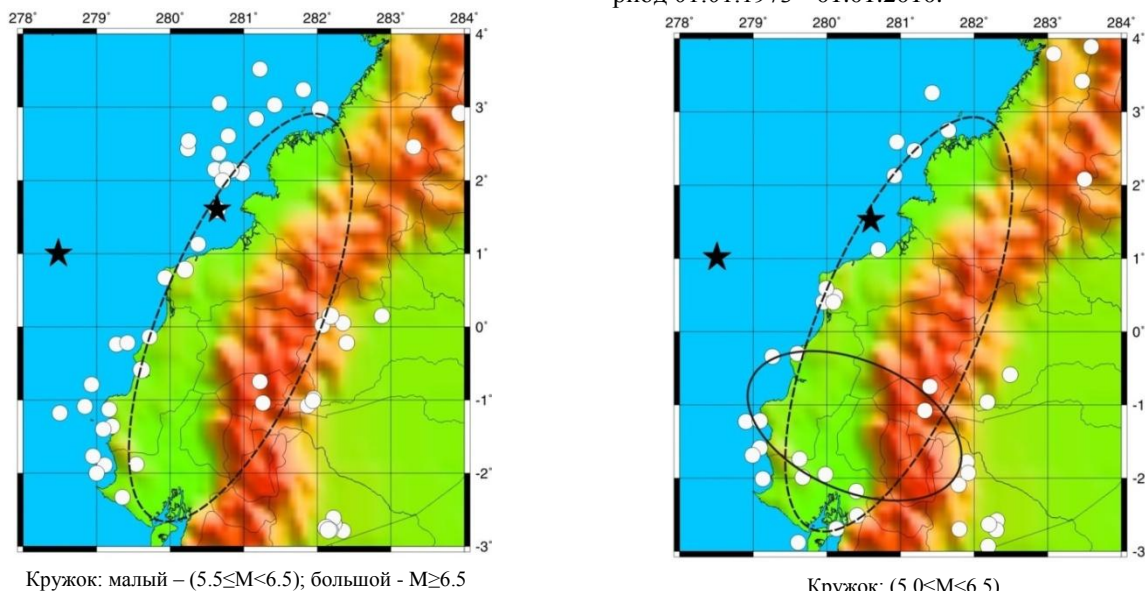


Рисунок 7. Распределение во времени магнитуд событий в районе мелкого кольца сейсмичности перед землетрясением 27.02.2010 г.

Сейсмическая брешь в районе Эквадора-Колумбии. В XX веке в районе северного Эквадора и Колумбии произошло 4 сильных землетрясения с $M_w \geq 7.8$, включая событие 31.01.1906 г. (таблица 1). В то же время в южном Эквадоре и северном Перу (между $9^\circ S$ и $1^\circ S$) не было землетрясений с $M_w > 7.7$, начиная с 1900 г. [8]. Рисунок 8 иллюстрирует характер сейсмичности в районе между $4^\circ S$ и $4^\circ N$ в период 01.01.1973 - 01.01.2010.



Кружок: малый - ($5.5 \leq M < 6.5$); большой - $M \geq 6.5$

а - на глубине 0-33 км

Звездочки - эпицентры землетрясений 31.01.1906 г. и 12.12.1979 г. Остальные обозначения - на рисунке 2

Кружок: ($5.0 \leq M < 6.5$)

б - на глубине 34-70 км

Рисунок 8. Кольцевая сейсмичность в районе Эквадора-Колумбии на глубинах

Из рисунка 8 видно, что в исследуемом районе сформировались очень крупные кольцевые структуры сейсмичности: мелкое кольцо ($L \sim 670$ км, $M_{п1} = 5.5$), вытянутое вдоль побережья, и глубокое ($l \sim 340$ км, $M_{п2} = 5.0$) - ориентированное почти нор-

мально к нему. Глубокое кольцо пересекает южную часть мелкого кольца, при этом западные области пересечения колец находятся на границе океана (на широтах $\sim 0.3^\circ S$ и $1.7^\circ S$). Следует отметить, что на границе мелкого кольца произошло три события с

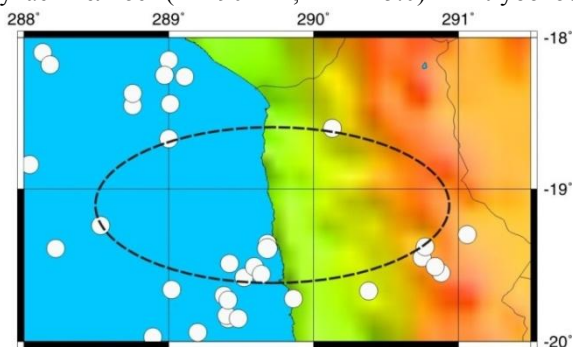
$M \geq 7.0$, включая очень сильное землетрясение 1979 г. ($M_w=8.1$). Кроме того, внутри мелкого кольца попадает значительная часть очаговой зоны землетрясения 31.01.1906 г. Следует также отметить, что восточная граница мелкого кольца (между $2^\circ S$ и $2^\circ N$) соответствует вулканической области Анд.

Сейсмическая брешь в районе северного Чили. Здесь, к северу от очага землетрясения 1995 г. в Антофагасте ($M_w=8.0$), не было достаточно сильных событий около 130 лет [5, 6]. На рисунке 9 показан характер сейсмичности в районе между $20^\circ S$ и $18^\circ S$.

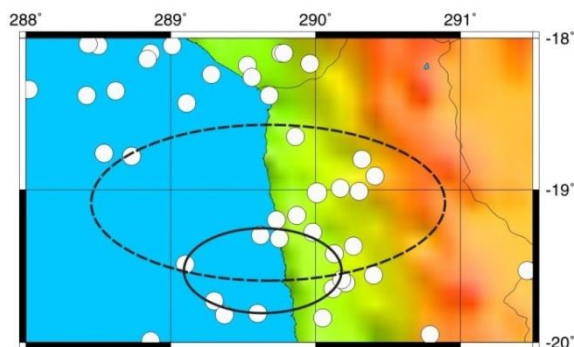
Как видно из рисунка 9, в районе северного Чили эпицентрами событий за период до 01.01.2010 г. образованы меньшие по размерам кольцевые структуры: мелкая ($L \sim 260$ км, $M_{п1}=4.8$) и глубокая ($L \sim 120$ км, $M_{п2}=4.9$), ориентированные в субширотном направлении. При этом глубокое кольцо пересекает южную границу мелкого кольца. Еще одна пара колец за тот же период сформировалась южнее, между $23.5^\circ S$ и $21.5^\circ S$. Из рисунка 10 следует, что в данном случае мелкое ($L \sim 190$ км, $M_{п1}=5.0$) и глубокое

($L \sim 130$ км, $M_{п2}=5.0$) кольца сейсмичности также вытянуты в субширотном направлении. При этом большая часть мелкого кольца находится под океаном, а глубокое кольцо – целиком в районе континента. Оба кольца на юге граничат с афтершоковой областью землетрясения в Антофагасте 30.07.1995 г. ($M_w=8.0$). Кольца пересекаются в районе меридиана $70^\circ W$.

Сейсмическая брешь в районе центрального Чили. Здесь между $30^\circ S$ и $26^\circ S$ не было событий с $M_w \geq 8.0$ после сильнейшего землетрясения 11.11.1922 г. ($M_w=8.7$). В данном районе, как показано на рисунке 11, к 01.01.2010 г. образовались довольно крупные кольцевые структуры сейсмичности: мелкая ($L \sim 250$ км, $M_{п1}=5.3$) и глубокая ($L \sim 180$ км, $M_{п2}=5.1$), вытянутые в субмеридиональном направлении. Мелкое кольцо почти целиком располагается под океаном, а глубокое – в основном под континентом. Кольца почти касаются друг друга на границе океана, примерно в районе $28^\circ S$.



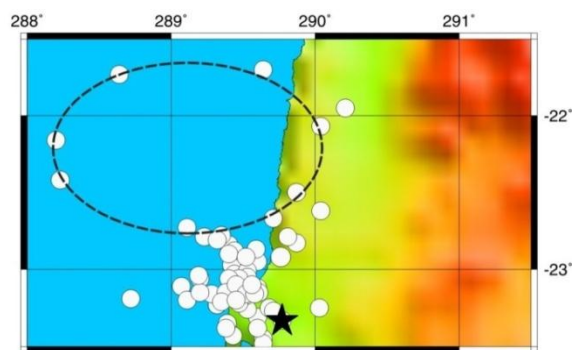
Кружок: малый – ($4.8 \leq M < 6.0$); большой - $M \geq 6.0$
а – на глубине 0-33 км



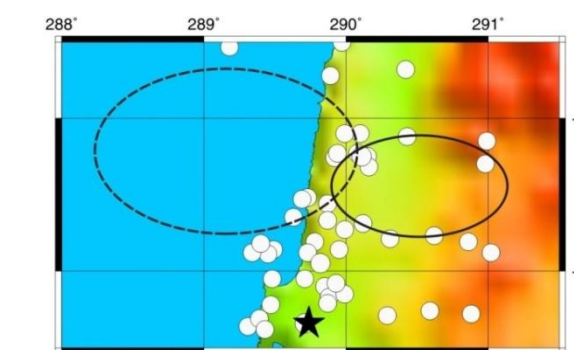
Кружок: малый - ($4.9 \leq M < 6.0$), большой - $M \geq 6.0$
б – на глубине 34-70 км

Остальные обозначения – на рисунке 2

Рисунок 9. Кольцевая сейсмичность в районе северного Чили



Кружок: малый – ($5.0 \leq M < 6.0$); большой - $M \geq 6.0$
а – на глубине 0-33 км



Кружок: малый - ($5.0 \leq M < 6.0$), большой - $M \geq 6.0$
б – на глубине 34-70 км

Звездочка – эпицентр землетрясения 30.07.1995 г. Остальные обозначения – на рисунке 2.

Рисунок 10. Кольцевая сейсмичность в районе северного Чили

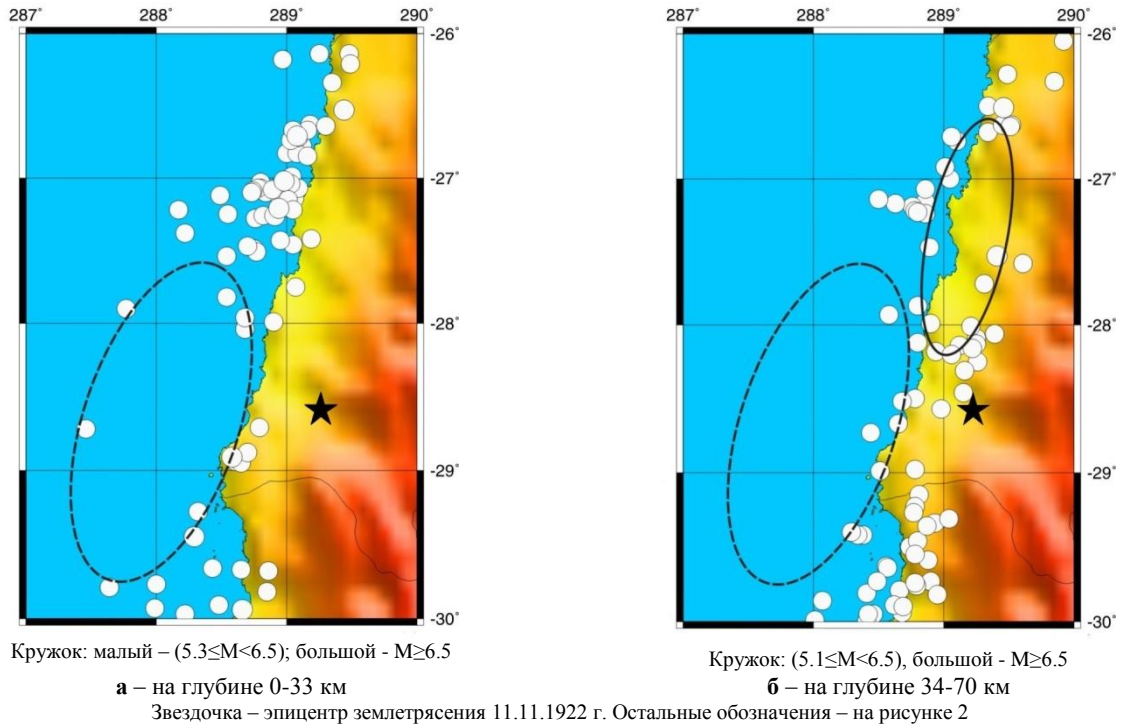


Рисунок 11. Кольцевая сейсмичность в районе центрального Чили

Зависимости размеров кольцевых структур от магнитуды. На рисунке 12 показаны зависимости размеров выделенных кольцевых структур (длины больших осей L и l) от магнитуды главных событий в целом для региона Южной Америки.

Из рисунка 12а следует, что наблюдается рост параметра L с магнитудой. Уравнение линейной регрессии имеет вид:

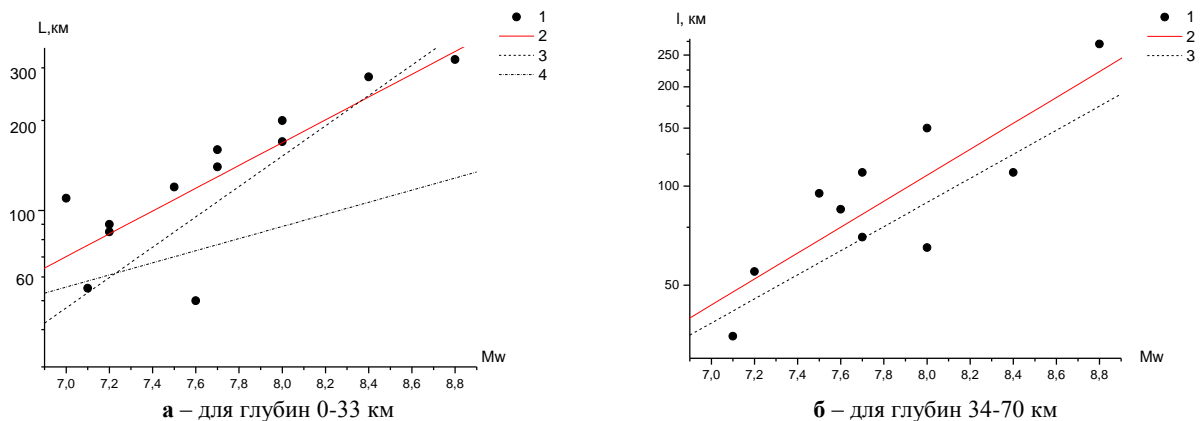
$$\lg L(\text{км}) = 0.38M_w - 0.82, \quad r = 0.83, \quad (1)$$

где r – коэффициент корреляции.

Следует отметить, что значение параметра L для события 07.07.2001 г. (афтершока землетрясения 23.06.2001 г.) резко отклоняется от зависимости (1),

выходя за пределы интервала $\pm 2\sigma$. На рисунке 12а показаны также аналогичные зависимости, полученные ранее для районов Суматры (в диапазоне $M_w = 7.0-9.0$) [2] и северо-восточной Японии ($M_w = 7.0-8.3$) [4]. Из рисунка видно, что в регионе Южной Америки величины L в диапазоне магнитуд $M_w = 7.0 - 8.4$ заметно выше, чем в районе Суматры, и значительно выше, чем в районе северо-восточной Японии. Из рисунка 12б следует, что параметр l также быстро растет с магнитудой. Уравнение линейной регрессии описывается формулой:

$$\lg l(\text{км}) = 0.39M_w - 1.12, \quad r = 0.84 \quad (2)$$



1 – индивидуальные значения для региона Южной Америки.

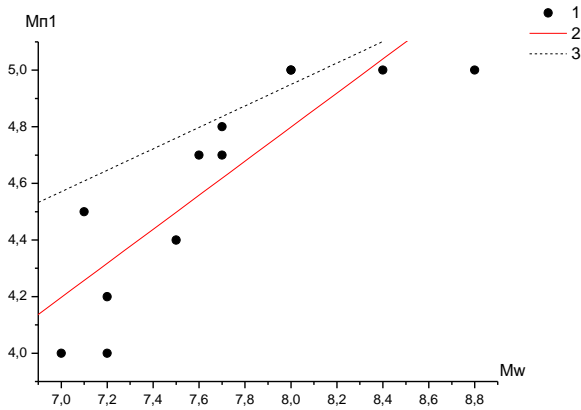
Корреляционные зависимости для районов: 2 – Южной Америки, 3 – Суматры, 4 – северо-восточной Японии

Рисунок 12. Зависимость длины большой оси кольца сейсмичности (L , l) от магнитуды M_w

В данном случае линия, характеризующая зависимость $\lg(L/M_w)$ для региона Южной Америки, практически параллельна аналогичной зависимости, полученной для района Суматры, и выше ее в среднем примерно на 0.1. Сопоставление с районом северо-восточной Японии не проводилось, поскольку для этого района (по небольшому числу данных) величины L практически не зависят от M_w . Значения отношения L/L варьируются от 0.6 до 2.6, в среднем величина L/L равна 1.7 ± 0.6 .

На рисунке 13 показан характер зависимости пороговых значений магнитуд событий для мелких и глубоких колец - M_{p1} и M_{p2} от величины M_w . Видно, что наблюдается рост параметров M_{p1} и M_{p2} с увеличением M_w . Уравнения линейной регрессии имеют вид:

$$M_{p1} = -0.01 + 0.60 M_w, r=0.85, \quad (3)$$



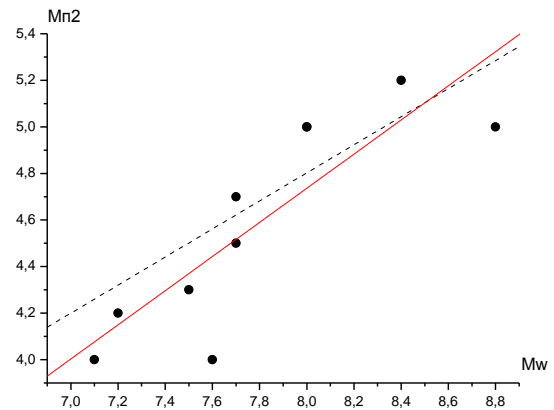
а – для глубин 0-33 км

$$M_{p2} = -1.13 + 0.73 M_w, r=0.85. \quad (4)$$

Следует заметить, что в данном случае значение M_{p2} для землетрясения 07.07.2001 г. также значительно ниже, чем в среднем для рассматриваемого региона (далеко выходит за пределы интервала $\pm\sigma$). Из рисунков 13а,б следует, что при сравнительно малых значениях M_w линии, характеризующие зависимости (3) и (4), идут ниже, чем для района Суматры, однако величины M_{p1} и M_{p2} растут с M_w значительно быстрее.

На рисунке 14 показана зависимость максимальных магнитуд землетрясений в районах мелких колец (M_{1max}) от магнитуд главных событий. Для сравнения приведена полученная ранее корреляционная зависимость для района Суматры [2], которая описывается формулой

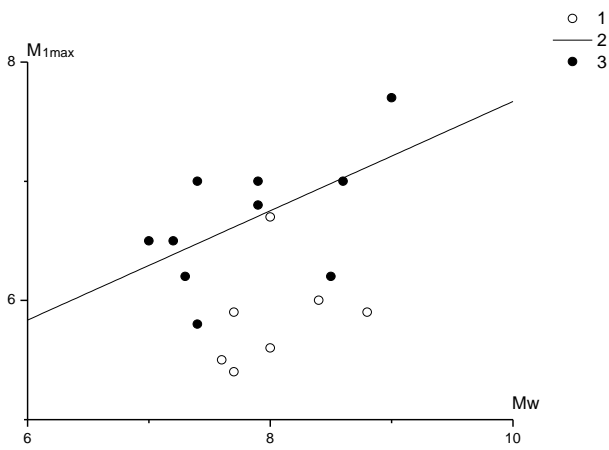
$$M_{1max} = 3.08 + 0.46 M_w, r=0.47 \quad (5)$$



б – для глубин 34-70 км

1 - индивидуальные значения для региона Южной Америки. Корреляционные зависимости для районов: 2 – Южной Америки, 3 – Суматры

Рисунок 13. Зависимость пороговых величин M_p от магнитуды M_w для глубин



1 – Южная Америка; 2 – Суматра (корреляционная зависимость); 3 – Суматра (величины M_{1max})

Рисунок 14. Зависимости величин M_{1max} от магнитуды M_w

Видно, что в регионе Южной Америки величины M_{1max} в диапазоне $M_w = (7.6 - 8.8)$ варьируются от 5.4 до 6.7, что значительно ниже, чем для района Суматры. Отклонение величин M_{1max} от корреляционной зависимости, полученной для района Суматры, в среднем составляет -0.91 ± 0.38 , что далеко выходит за пределы интервала $\pm\sigma$. Отсюда следует, что и суммарная энергия землетрясений (для данной M_w) в районах мелких колец в регионе Южной Америки значительно ниже, чем в районе Суматры

Оценка магнитуд возможных сильных землетрясений в регионе Южной Америки. Для оценки величин M_w землетрясений, которые могут произойти в районах кольцевых структур, использованы формулы (1) – (3), поскольку формула (4) получена по меньшему числу данных. В таблице 3 приведены прогнозные значения M_w , полученные путем осреднения величин магнитуд, рассчитанных по этим формулам.

Таблица 3. Величины M_w для возможных сильных землетрясений в зонах сейсмических брешей

φ, град. S	λ, град. W	M_w	L, км	l, км	Mп1	Mп2	Район
3-4 N	82-76	9.4±0.2	670	340	5.5	5.0	Эквадор-Колумбия
20-18	72-69	8.2±0.2	260	120	4.8	4.9	Сев. Чили
23.5-21.5	72-68	8.3±0.1	190	130	5.0	5.0	Сев. Чили
30-26	73-70	8.7±0.1	250	180	5.3	5.1	Центр. Чили

Как видно из таблицы 3, величины M_w для возможных сильных землетрясений в рассмотренных районах варьируются от 8.2 до 9.4.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные свидетельствуют о том, что в регионе Южной Америки, как и в других зонах субдукции [1 - 4], широко развиты кольцевые структуры сейсмичности в двух диапазонах глубин. Ранее отмечалось, что появление кольцевых структур, по-видимому, связано с миграцией мантийных флюидов, играющих очень важную роль в процессах подготовки сильных землетрясений [1 - 4]. Существенно, что для 9 из 10 рассмотренных сильных землетрясений в регионе Южной Америки, для которых выявлены пары кольцевых структур, их эпицентры находились вблизи областей пересечения или наибольшего сближения мелких и глубоких колец, как и в других районах [1 - 4] (единственное исключение составляют данные для землетрясения 21.02.1996 г. в районе северного Перу, однако и в этом случае выполняется условие $\Delta l/L \ll 1$). В [1, 2] отмечено, что данный эффект, скорее всего, связан с тем, что в таких областях наблюдается максимальная толщина двухфазного слоя с заметной долей флюидов, на кровле которого имеет место концентрация напряжений, приводящая в конечном счете к подвижке при сильном землетрясении. Для двух событий с $M_w=7.0$ и 7.2 , возможно, не удалось выявить глубокие кольца из-за достаточно низких величин $M_{п2}$ (рисунок 13б), сопоставимых с пороговыми значениями магнитуд землетрясений, регистрируемых в районе Эквадора.

Для региона Южной Америки, так же, как и в районе Суматры, наблюдаются линейные зависимости величин lgL , $lg l$, а также $M_{п1}$ и $M_{п2}$ от магнитуды готовящегося землетрясения. Линейные зависимости параметров lgL , $M_{п1}$ и $M_{п2}$ от M_w намечаются также для района северо-восточной Японии, но по меньшему числу данных [4]. Сопоставление полученных результатов с [2 - 4] показало, что кольцевые структуры в регионе Южной Америки нередко выражены хуже, чем в районах Суматры, Камчатки и северо-восточной Японии. Резкое занижение величин L и $M_{п2}$ для землетрясения 07.07.2001 г. ($M_w=7.6$) может быть объяснено тем, что для данного афтершока сильнейшего события 23.06.2001 г. не успели полностью сформироваться кольцевые структуры сейсмичности, отражающие процесс подъема глубинных флюидов. Для этого землетрясения, по-видимому, основную роль сыграл триггерный эффект главного события, обусловивший перераспределение напряжений в оча-

говой зоне, аналогично некоторым землетрясениям в районе Суматры [2].

Следует отметить, что для трех рассмотренных районов, величины L (для данной M_w) минимальны в районе северо-восточной Японии и максимальны в регионе Южной Америки. Аналогичная зависимость наблюдается и для наибольшей энергии зарегистрированных землетрясений: $M_{wmax}=8.4$ для северо-восточной Японии, 9.0 - для Суматры и 9.6 - для Южной Америки [8]. Из рисунков 13 и 14 следует также, что суммарная энергия землетрясений в районах мелких колец (для данной M_w) в регионе Южной Америки намного ниже, чем в районе Суматры. Ранее отмечалось, что эта энергия есть мера объема поднимающихся в районах колец флюидов [3, 4, 9]. Отсюда может следовать, что проницаемость пород, а также связанное с ней содержание флюидов [10] в земной коре и верхах мантии в регионе Южной Америки значительно ниже, чем в районе Суматры. Этот вывод поддается экспериментальной проверке, в связи с чем, данному вопросу будет посвящена отдельная работа.

Существенно, что кольцевые структуры выделены в зонах сейсмических брешей, где достаточно длительное время не было сильных землетрясений с $M_w \sim 8.0$. Наибольшая прогнозная величина M_w получена для района Эквадора и Колумбии. Самое сильное землетрясение произошло здесь в 1906 г. ($M_w=8.6$). Очаг этого события находился примерно между $0.6^\circ S$ и $3.6^\circ N$ [5]. Сопоставление данных из [5] с данными, приведенными на рисунке 8, показало, что очаг землетрясения 1906 г. располагался вдоль северо-западной границы мелкого кольца. Вместе с тем мелкое кольцо простирается значительно южнее южной границы очага 1906 г. (примерно на 2°). Судя по имеющимся данным, эпицентр готовящегося сильнейшего землетрясения должен находиться вблизи одной из областей пересечения мелкого и глубокого колец. Наиболее вероятное положение будущего эпицентра землетрясения – около юго-западной области пересечения колец (к югу от очага 1906 г.). Полученные данные не позволяют судить о направлении развития будущего очага; однако есть основания предполагать, что значительная часть разрыва может распространяться к югу от $1^\circ S$, в зону сейсмической брешы, где в течение нескольких сотен лет не было событий с $M \geq 8.0$ [5].

Еще одна зона сейсмической брешы располагается в районе северного Чили. Последнее сильное землетрясение ($M \sim 8.0$) произошло здесь в 1877 г. [6]. Анализ собранных данных позволяет предполагать,

что здесь (между 20°S и 18°S) может готовиться событие с $M_w=8.2\pm 0.2$. Следующая пара выявленных сравнительно небольших колец сейсмичности формируется южнее, к северу от очага землетрясения в Антофагасте (1995 г.). Оценки показывают, что здесь может идти подготовка сильного события с $M_w=8.3\pm 0.1$. Эпицентр этого землетрясения, скорее всего, будет находиться вблизи одной из областей пересечения мелкого и глубокого колец. Более крупные кольца (с относительно высокими величинами M_p1 и M_p2) образовались в районе центрального Чили. Последнее сильное землетрясение ($M_w=8.7$) произошло здесь в 1922 г. Эпицентр готовящегося землетрясения ($M_w=8.7\pm 0.1$), скорее всего, должен будет находиться вблизи от области наибольшего

сближения колец (примерно в районе 28° S, 71.2°W). Интересно, что картина сейсмичности в этом районе очень похожа на ту, которая проявилась перед последним сильнейшим землетрясением 27.02.2010 г.

Полученные данные не позволяют судить о времени прогнозируемых событий. Для такого рода заключений необходимы дополнительные исследования длительности формирования колец сейсмичности перед сильными и сильнейшими землетрясениями. Тем не менее, в целях среднесрочного прогноза сейсмических событий в районах выделенных кольцевых структур в зонах сейсмических брешей целесообразно вести постоянный мониторинг геодинамических процессов различными геофизическими и геохимическими методами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2009. – Вып. 1. – С. 77 - 85.
2. Копничев, Ю.Ф. Кольцевая сейсмичность в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2009. – Вып. 3. – С. 67 - 75.
3. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин в районах Курил и Камчатки / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2009. – Вып. 3. – С. 76 - 87.
4. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин в районе северо-восточной Японии / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК, 2009. – Вып. 3. – С. 88 - 97.
5. Kelleher, J. Rupture zones of large South American earthquakes and some predictions / J. Kelleher // J. Geophys. Res, 1972. – V. 77, N 11. – P. 2087 - 2103.
6. Lomnitz, C. Major earthquakes of Chile: a historical survey, 1535-1960 / C. Lomnitz // Seismol. Res. Lett. 2004. – V. 75, N 3. – P. 368 - 378.
7. Pacheco, J. Seismic moment catalog of large shallow earthquakes, 1900 to 1989 / J. Pacheco, L.Sykes // Bull. Seismol. Soc. Amer., 1992. – V. 82, N 3. P. 1306 - 1349.
8. Engdahl, E. Global seismicity: 1900 - 1999. In: Earthquake & engineering seismology. Part A. / E. Engdahl, A.Villasenor // Academic Press. An imprint of Elsevier Science – 2002. – P. 665 – 690.
9. Umeda, K. Helium isotopes as geochemical indicators of a serpentinized fore-arc wedge / K. Umeda, G. McCrank, A. Ninomiya // J. Geophys. Res., 2007. – V.112. B10206. doi: 10.1029/2007JB005031.
10. McKenzie D. The generation and compaction of partially molten rocks // J. Petrol. 1984. – V.25. – P. 713 - 765.

ОНТҮСТІК АМЕРИКА АУМАҒЫНДА ТЕРЕНДІКТИҢ ӘР АУҚЫМДАРЫНДА САҚИНАЛЫ СЕЙСМИКАЛЫЛЫҒЫНЫҢ СИПАТТАМАЛАРЫ

^{1,2}Копничев Ю.Ф. ¹Соколова И.Н.

¹ҚР ҰЯО Геофизикалық институты, Курчатов, Қзақстан

²РҒА О.Ю. Шмидт атындағы Жер физикасы институты, Мәскеу, Ресей

1995 - 2010 ж.ж. Онтүстік Америка аумағында қатты және өте қатты жерсілкінулер алдында терендіктің 0 - 33 және 34 - 70 км. терендіктерінде, сондай-ақ сейсмикалық қуыстар белдемдерінде сейсмикалылығын талдау нәтижелері келтіріледі. Терендіктің екі ауқымында да сейсмикалылығының сақиналы құрылымдары айқындалған. Болған басты оқиғалардың эпиорталықтары, әдеттегідей, айқындалған сейсмикалылықтың сақиналы құрылымдары қиылысқан немесе ең жақын келген аймақтардың жанында болуы көрсетілген. Сейсмикалылық сақиналарының мөлшерлері және магнитудалардың табалдырық мәндері туралы деректерін талдау негізінде сейсмикалық қуыстар белдемдерінде дайындалудағы жерсілкінулер магнитудаларының болжамды бағалары алынған. Онтүстік Америка, Суматра және солтүстік-шығыс Жапония аудандарында сақиналы құрылымдардың параметрлерін салыстыруы жүргізілген.

**CHARACTERISTICS OF RING-SHAPED SEISMICITY
IN VARIOUS DEPTH RANGES IN THE REGION OF SOUTH AMERICA**

^{1,2)}Yu.F. Kopnichev, ¹⁾I.N. Sokolova

¹⁾*Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan*

²⁾*Institute of the Earth Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Results of seismicity analysis in the region of South America in depth ranges of 0 - 33 and 34 - 70 km prior to large and great earthquakes, occurred in 1995 - 2 010, and also in seismic gap zones are presented. Ring-shaped seismicity structures are found in both depth ranges. It was shown, that epicenters of the major events were located, as a rule, near areas of intersection or closest rapprochement of ring-shaped seismicity structures. Prognostic estimates of magnitudes of preparing earthquakes in seismic gap zones are obtained, based on an analysis of the data on seismicity ring sizes and threshold magnitude values. A comparison of the ring structures parameters in the regions of South America, Sumatra and north-eastern Japan are carried out.