

УДК 550.34

## КОЛЬЦЕВАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГЛУБИН ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ И СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В РАЙОНЕ СУМАТРЫ

<sup>1,2)</sup>Копничев Ю.Ф., <sup>1)</sup>Соколова И.Н.

<sup>1)</sup>*Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

<sup>2)</sup>*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия*

Анализируются характеристики сейсмичности в районе Суматры в двух диапазонах глубин: 0 - 33 и 34 - 70 км, перед сильными землетрясениями с  $M_w=7.0-9.0$ , произошедшими в 2001 - 2008 гг., а также в зонах сейсмических брешей. Выделены кольцевые структуры сейсмичности в обоих диапазонах глубин. Показано, что эпицентры главных событий, как правило, находятся вблизи областей пересечения или наибольшего сближения «мелких» и «глубоких» колец. Получены корреляционные зависимости размеров колец, а также пороговых значений магнитуд землетрясений в районах колец от энергии главных событий. Выделенные кольцевые структуры в зонах сейсмических брешей позволяют предполагать, что в районах центральной и южной Суматры происходят активные процессы подготовки сильных землетрясений.

### ВВЕДЕНИЕ

В [1, 2] показано, что в зонах субдукции перед сильными и сильнейшими землетрясениями формируются кольцевые структуры сейсмичности в разных диапазонах глубин. Было установлено, что наблюдаются большие вариации размеров колец сейсмичности при близких магнитудах главных событий, что, возможно, в значительной степени связано с различиями сейсмотектонических условий в разных зонах субдукции. В статье проводится более детальный анализ характеристик кольцевой сейсмичности в районе Суматры, где за последние 8 лет произошло несколько сильнейших событий, включая Великое Суматринское землетрясение 26 декабря 2004 г. с  $M_w=9.0$ .

### МЕТОДИКА И ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

По аналогии с [1, 2] рассмотрены характеристики сейсмичности для разных участков зоны Бенюофа в двух диапазонах глубин: 0 - 33 и 34 - 70 км. Использованы каталоги землетрясений ISC (International Seismological Center, Международный сейсмологический центр) до 1973 г. и NEIC (National Event Information Center, каталог Геологической службы США) с 01.01.1973. Анализировались данные о зем-

летрясениях, произошедших в окрестностях будущих очаговых зон, с магнитудами  $M \geq M_{p1}$  и  $M \geq M_{p2}$ , где  $M_{p1}$  варьировалось от 4.5 до 5.5 (для первого), а  $M_{p2}$  от 4.0 до 5.5 для второго диапазонов глубин. Временной интервал выбирался, как правило, с 01.01.1973 до дня, предшествовавшего главному сейсмическому событию. Исключение составляют данные для очаговой зоны Суматринского землетрясения 26 декабря 2004 г., для которой рассмотрены характеристики сейсмичности начиная с 01.01.1969. Обработаны данные о характере сейсмичности перед 10 сильными и сильнейшими землетрясениями с  $M_w=7.0-9.0$  в районе Суматры (таблица 1).

Кроме того, изучены характеристики сейсмичности в двух зонах сейсмических брешей (в районах центральной и южной Суматры). Для этих зон рассмотрены события, произошедшие до 01.01.2009.

### АНАЛИЗ ДАННЫХ

Данные по четырем сильнейшим землетрясениям (пп.1, 4, 5 и 6 из таблицы 1) приведены в [1, 2]. Ниже описываются характеристики колец сейсмичности, сформировавшихся перед остальными шестью землетрясениями с  $M_w=7.0-7.9$ .

Таблица 1. Параметры кольцевых структур в районе Суматры

N	Дата	Широта, град	Долгота, град	H, км	Mw	Mp1	L, км	Mp2	I, км
1	04.06.2000	-4.72	102.09	33	7.9	5.5	150	5.5	60
2	13.02.2001	-4.68	102.56	36	7.4	4.8	80	4.5	60
3	02.11.2002	2.82	96.09	30	7.4	4.8	65	4.2	40
4	26.12.2004	3.30	95.98	30	9.0	5.5	700	5.5	200
5	28.03.2005	2.09	95.11	30	8.6	5.0	190	5.0	180
6	12.09.2007	-4.44	101.37	34	8.5	5.0	290	5.0	100
7	12.09.2007	-2.63	100.84	35	7.9	5.0	150	5.0	160
8	13.09.2007	-2.13	99.63	22	7.0	4.5	85	4.0	40
9	20.02.2008	2.77	95.96	26	7.3	4.8	35	4.5	30
10	25.02.2008	-2.49	99.97	25	7.2	4.5	60	4.5	60

Примечание: L и I – большие оси соответственно «мелкого» и «глубокого» колец сейсмичности

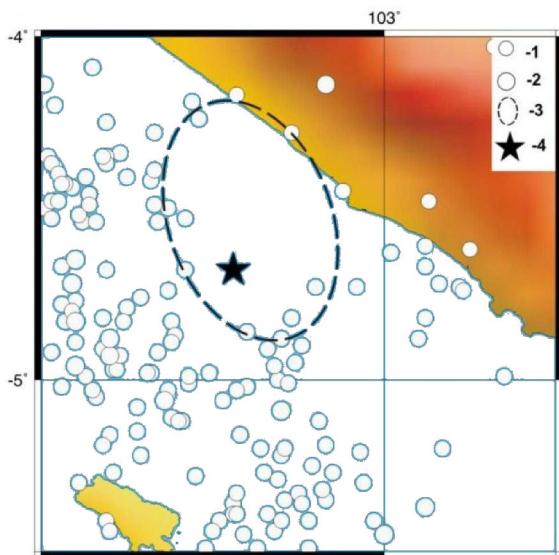
**КОЛЬЦЕВАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГЛУБИН  
ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ И СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В РАЙОНЕ СУМАТРЫ**

*Землетрясение 13 февраля 2001 г. (п. 2 таблицы 1)* имело магнитуду  $Mw=7.4$ ; оно произошло в районе южной Суматры. На рисунке 1 приведены карты сейсмичности в окрестности очага этого события на глубинах 0 - 33 км ( $Mp1=4.8$ ) и 34 - 70 км ( $Mp2=4.5$ ). Неглубокие события (на фоне афтершоков землетрясения 04.06.2000) сформировали кольцевую структуру с большой осью  $L\sim 80$  км, вытянутую в субмеридиональном направлении. Землетрясения с глубиной гипоцентров  $h=34 - 70$  км образовали кольцо меньшего размера - с большой осью  $l\sim 60$  км, северо-западного направления, параллель-

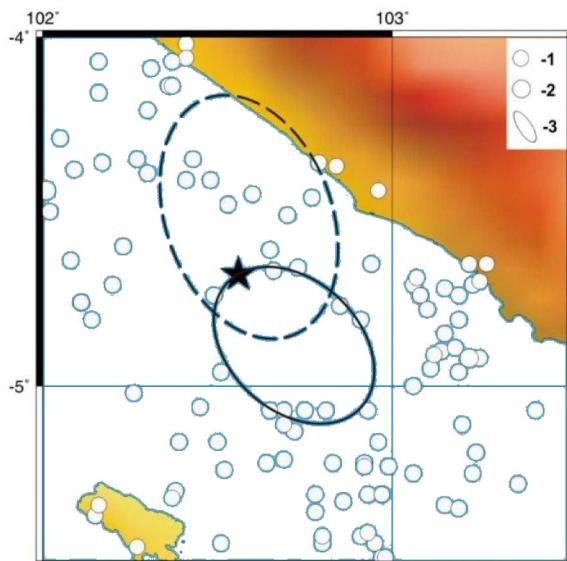
ного побережью. Для краткости, следяя [2], кольца первого диапазона глубин будем называть «мелкими», а второго – «глубокими».

Как следует из рисунка 1б, эпицентр главного события находится на расстоянии около 10 км от области пересечения мелкого и глубокого колец.

*Землетрясение 2 ноября 2002 г. (п.3 таблицы 1)* с  $Mw=7.4$  наблюдалось в районе северной Суматры, на границе между очагами землетрясений, произошедших 26.11.2004 и 28.03.2005. На рисунке 2 представлена сейсмичность в окрестностях очаговой зоны этого события ( $Mp1=4.8$ ,  $Mp2=4.2$ ).

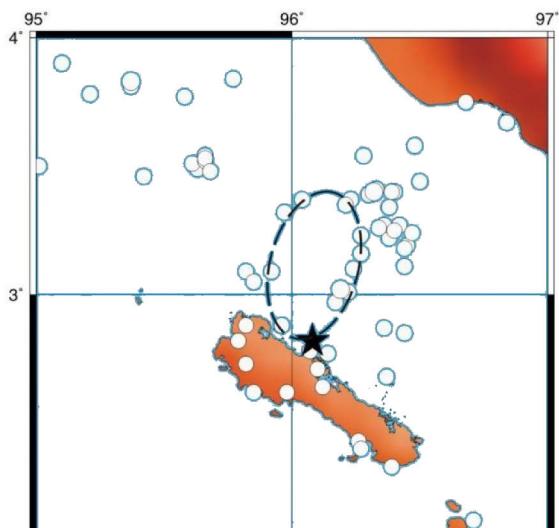


Эпицентры землетрясений: 1 –  $(4.8 \leq M < 6.0)$ , 2 –  $M \geq 6.0$ ,  
3 – мелкое кольцо; 4 – эпицентр главного события  
**a** – (0 – 33) км

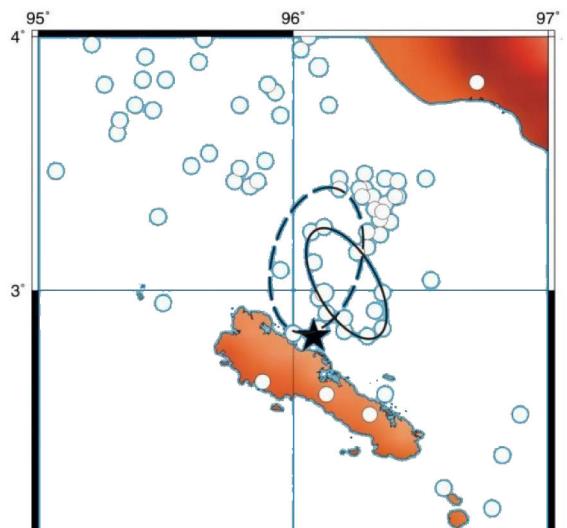


Эпицентры землетрясений: 1 –  $(4.5 \leq M < 6.0)$ ,  
2 –  $M \geq 6.0$ . 3 – глубокое кольцо  
**b** – (34 – 70) км

*Рисунок 1. Кольцевая сейсмичность перед Суматринским землетрясением 13.02.2001 на различных глубинах*



малый кружок –  $(4.8 \leq M < 6.0)$   
**a** – (0 – 33) км



малый кружок –  $(4.2 \leq M < 6.0)$   
**b** – (34 – 70) км

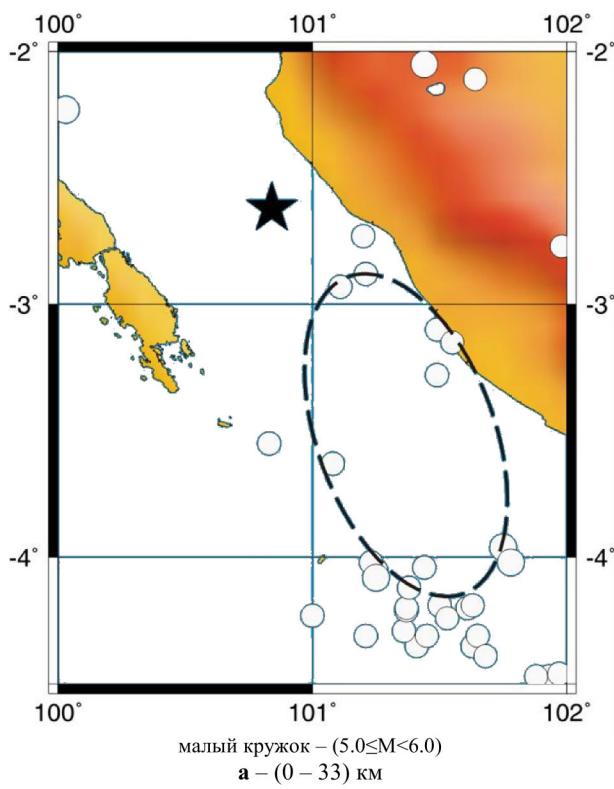
Остальные обозначения – на рисунке 1

*Рисунок 2. Кольцевая сейсмичность перед Суматринским землетрясением 02.11.2002 на различных глубинах*

**КОЛЬЦЕВАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГЛУБИН  
ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ И СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В РАЙОНЕ СУМАТРЫ**

Перед данным землетрясением сформировались кольцевые структуры – мелкая, ориентированная в субмеридиональном направлении ( $L \sim 65$  км), и глубокая, вытянутая почти параллельно берегу ( $l \sim 40$  км). Существенно, что эпицентр главного события находился вблизи от области пересечения колец (на расстоянии  $r \sim 10$  км).

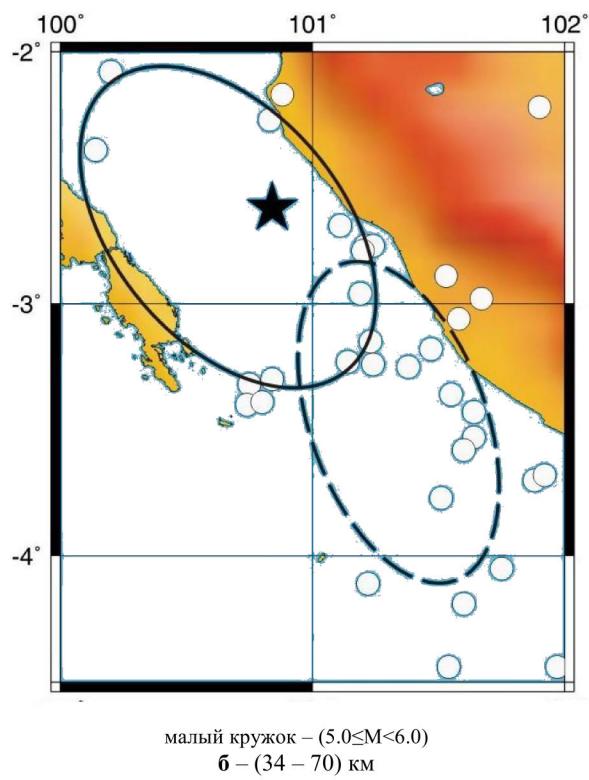
*Землетрясение 12 сентября 2007 г.* (п.7 таблицы 1) с  $Mw=7.9$  произошло в районе центральной Суматры сразу после сильнейшего землетрясения с  $Mw=8.5$  (п.6 таблицы 1), однако на сравнительно большом расстоянии (около 200 км) от эпицентра этого землетрясения, поэтому, скорее всего, не является его афтершоком. Из рисунка 3 следует, что в этом районе сформировались мелкое кольцо ( $Mp1=5.0$ ) с большой осью размером  $L \sim 150$  км, ориентированное в субмеридиональном направлении, и



глубокое ( $Mp2=5.0$ ), вытянутое параллельно берегу с большой осью  $l \sim 160$  км.

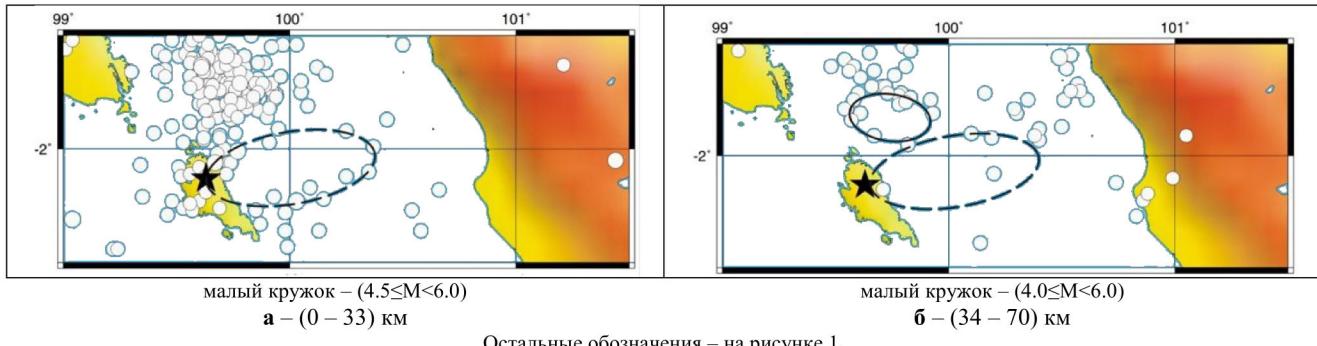
Как следует из рисунка 3, эпицентр землетрясения 12.09.2007 находился внутри глубокого кольца, на сравнительно большом расстоянии от области пересечения мелкого и глубокого колец. ( $l \sim 50$  км).

*Землетрясение 13 сентября 2007 г.* (п.8 таблицы 1) с  $Mw=7.0$  имеет эпицентр к западу от мелкого кольца рассмотренного выше события 12.09.2007. На рисунке 4 показано, что перед рассматриваемым землетрясением образовалось мелкое кольцо ( $Mp1=4.5$ ) с большой осью размером  $L \sim 85$  км, ориентированное почти нормально к береговой линии, и глубокое кольцо ( $Mp2=4.0$ ), с большой осью длиной  $l \sim 40$  км, вытянутое под углом  $\sim 45^\circ$  к береговой линии. Эпицентр главного события находился вблизи границы мелкого кольца, на расстоянии  $\sim 5$  км от области касания колец.



Остальные обозначения – на рисунке 1

*Рисунок 3. Кольцевая сейсмичность перед Суматринским землетрясением 12.09.2007 на различных глубинах*



Остальные обозначения – на рисунке 1.

*Рисунок 4. Кольцевая сейсмичность перед Суматринским землетрясением 13.09.2007 на различных глубинах*

**КОЛЬЦЕВАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГЛУБИН  
ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ И СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В РАЙОНЕ СУМАТРЫ**

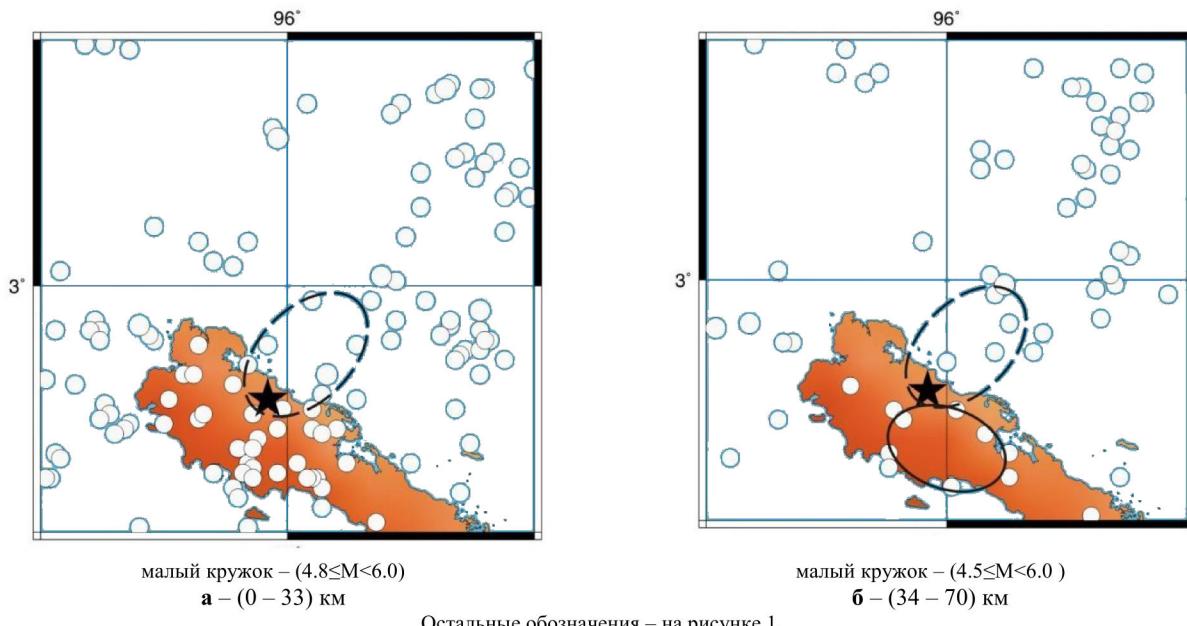
Мелкое и глубокое кольца почти касаются друг друга. Эпицентр главного события находился практически на границе мелкого кольца, на расстоянии около 30 км от области наибольшего сближения колец.

*Землетрясение 20 февраля 2008 г. (п.9 таблицы 1)* с  $M_w=7.3$ , как и событие 02.11.2007 г., произошло на границе между очаговыми зонами событий 26.12.2004 и 28.03.2005. На рисунке 5 показана сейсмическая ситуация перед землетрясением 20 февраля 2008 г.

Сформировались мелкое кольцо ( $M_p1=4.8$ ), ориентированное почти нормально к береговой линии, с большой осью длиной  $L \sim 35$  км и глубокое кольцо ( $M_p2=4.5$ ), вытянутое в субширотном направлении ( $\sim 30$  км). Эпицентр главного события находился

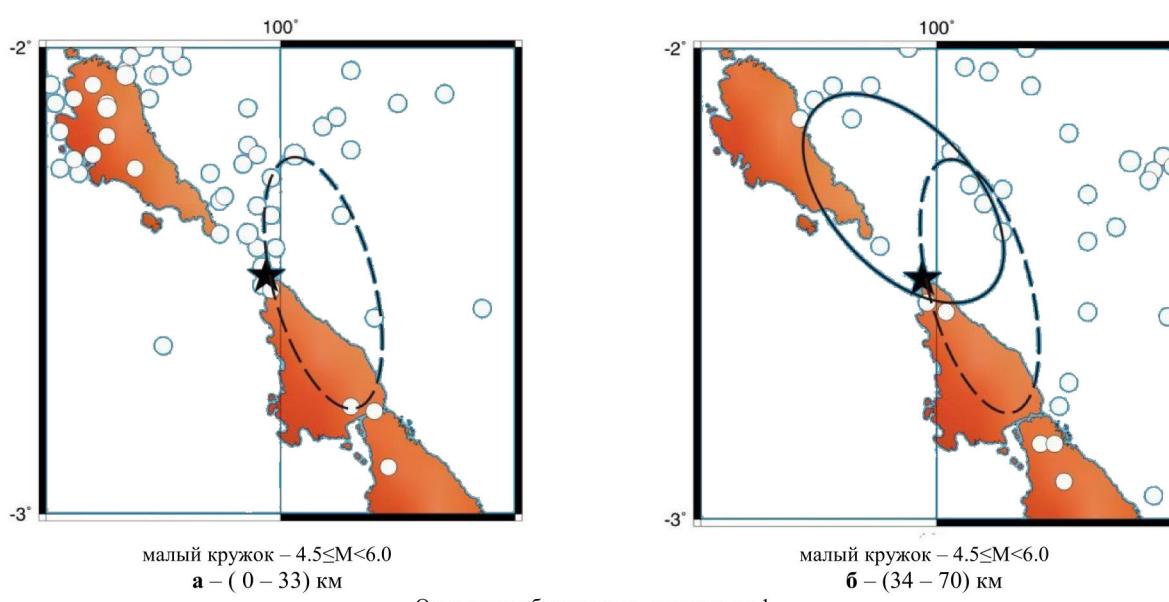
вблизи границы мелкого кольца, на расстоянии  $\sim 5$  км от области касания мелкого и глубокого колец.

*Землетрясение 25 февраля 2008 г. (п.10 таблицы 1)* с  $M_w=7.2$  произошло в очаговой зоне события 12.09.2007 ( $M_w=8.5$ ), поэтому его можно считать отдаленным афтершоком этого землетрясения. Тем не менее, как это показано на рисунке 6, перед событием также сформировались кольцевые структуры: мелкое кольцо ( $M_p1=4.5$ ), вытянутое в субмеридиональном направлении, и глубокое ( $M_p2=4.5$ ), ориентированное параллельно желобу. Длина больших осей обоих колец  $\sim 60$  км. В данном случае эпицентр землетрясения 25.02.2008 расположен непосредственно в области пересечения колец.



*Рисунок 5. Кольцевая сейсмичность перед Суматринским землетрясением 20.02.2008 на различных глубинах*

Остальные обозначения – на рисунке 1.



*Рисунок 6. Кольцевая сейсмичность перед Суматринским землетрясением 25.02.2008 на различных глубинах*

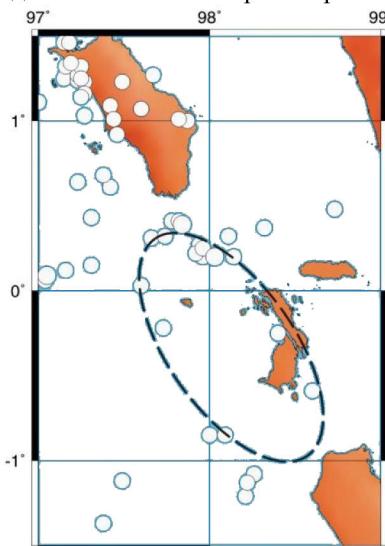
**КОЛЬЦЕВАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ ГЛУБИН  
ПЕРЕД СИЛЬНЫМИ И СИЛЬНЕЙШИМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В РАЙОНЕ СУМАТРЫ**

**Зоны сейсмических брешей (seismic gaps).** На рисунках 7 - 9 показаны характеристики сейсмичности в зонах сейсмических брешей (в районах центральной и южной Суматры).

**Сейсмическая брешь в районе центральной Суматры.** Последнее сильное землетрясение ( $M=7.7$ ) произошло в районе центральной Суматры в 1935 г. [3]. На рисунке 7 представлены карты сейсмичности в этом районе за исследуемый период также для двух уровней глубин. Из рисунка видно, что кольцевые структуры сейсмичности сформировались к югу от колец, связанных с подготовкой очага землетрясения 28.03.2005. Мелкое кольцо ( $M_p1=5.3$ ) с большой осью длиной  $L\sim 170$  км ориентировано парал-

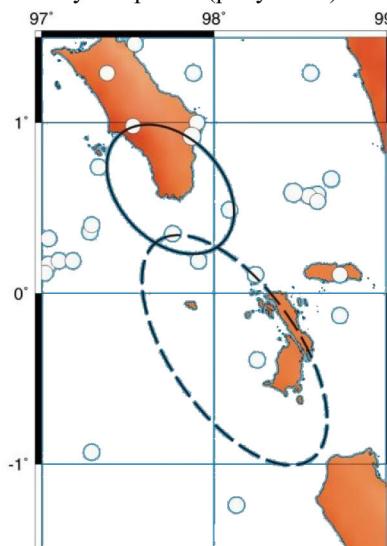
лельно побережью, а глубокое кольцо ( $M_p2=5.1$ ), расположенное к северо-западу от мелкого, с  $l\sim 95$  км, ориентировано в направлении северо-запад – юго-восток.

**Сейсмическая брешь в районе южной Суматры.** Здесь, в зоне субдукции, к югу от очагов землетрясений 04.06.2000 ( $M_w=7.9$ ) и 12.09.2007 ( $M_w=8.5$ ) не было сильных событий с  $M\geq 7.5$ , по крайней мере, с 1900 г. [3]. Однако, начиная с 1973 г., в данном районе образовались две пары кольцевых структур. Одно мелкое кольцо ( $M_p1=5.5$ ) с большой осью длиной  $L\sim 130$  км вытянуто параллельно береговой линии, а глубокое ( $M_p2=5.5$ ,  $l\sim 100$  км) ориентировано практически субширотно (рисунок 8).



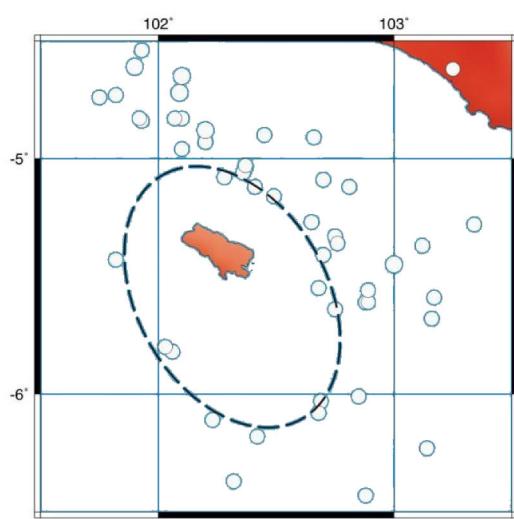
Кружки: малый –  $(5.3 \leq M < 6.5)$ , большой –  $M \geq 6.5$   
**a** – (0 – 33) км

Остальные обозначения – на рисунке 1.



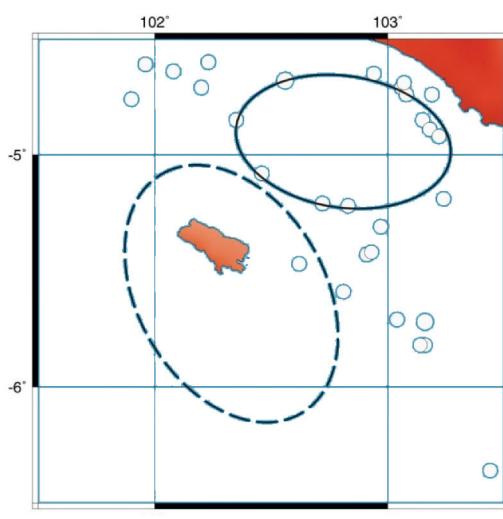
Кружки: малый –  $(5.1 \leq M < 6.5)$ , большой –  $M \geq 6.5$   
**б** – (34 – 70) км

*Рисунок 7. Сейсмическая брешь в районе центральной Суматры Кольцевая сейсмичность на различных глубинах*



Кружки: малый –  $5.5 \leq M < 6.5$ , большой –  $M \geq 6.5$   
**а** – (0 – 33) км

Остальные обозначения – на рисунке 1.



Кружки: малый –  $5.5 \leq M < 6.5$ , большой –  $M \geq 6.5$   
**б** – (34 – 70) км

*Рисунок 8. Сейсмическая брешь в районе южной Суматры Кольцевая сейсмичность на различных глубинах*