

УДК 550.34

КОЛЬЦЕВЫЕ СТРУКТУРЫ СЕЙСМИЧНОСТИ В РАЙОНЕ ЮЖНОЙ КАЛИФОРНИИ: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ОКРЕСТНОСТЯХ г. ЛОС-АНДЖЕЛЕС

© 2017 г. Ю.Ф. Копничев¹, И.Н. Соколова²

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

² Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан,
г. Алма-Ата, Казахстан

Рассматриваются некоторые характеристики сейсмичности в районе Южной Калифорнии. Установлено, что перед тремя сильными землетрясениями с $M > 7.0$, произошедшими в 1992, 1999 и 2010 годах, сформировались кольцевые структуры сейсмичности с пороговыми значениями магнитуд M_p равными 4.1, 4.1 и 3.8 соответственно. Показано, что размеры этих структур в несколько раз меньше, чем для внутриконтинентальных событий с механизмами типа сдвига, имеющих соответствующие магнитуды. Выделены две кольцевые структуры в областях к востоку от г. Лос-Анджелес, где не было достаточно сильных землетрясений по меньшей мере 150 лет. На основании полученной ранее корреляционной зависимости размеров колец сейсмичности от энергии главных событий для землетрясений с механизмами типа сдвига оценены магнитуды сильных событий, которые могут готовиться в областях этих структур: $M_w = 6.9 \pm 0.2$ к востоку от г. Лос-Анджелес и $M_w = 8.6 \pm 0.2$ в области, где произошло сильнейшее землетрясение 1857 г. (Форт Техон, $M_w = 7.9$). Предполагается, что формирование кольцевых структур, так же как и в других районах, связано с процессами миграции глубинных флюидов.

Ключевые слова: земная кора, кольцевые структуры сейсмичности, сильные землетрясения, глубинные флюиды.

PACS 91.30.-f

Введение

В последние годы установлено, что перед многими сильными землетрясениями в течение нескольких десятилетий формируются кольцевые структуры (кольца) сейсмичности, оконтуривающие области относительного сейсмического затишья [Копничев,

Соколова, 2009а, б, 2010, 2011а, б, 2012, 2013а, б, 2015]. Эти структуры образованы эпицентрами событий с магнитудами $M \geq M_p$, где M_p – пороговые значения, которые растут с увеличением энергии главных землетрясений. Для ряда зон субдукции получены корреляционные зависимости $L(M_w)$ и $M_p(M_w)$, где L – длины больших осей колец сейсмичности, M_w – магнитуды соответствующих им сильных событий [Копничев, Соколова, 2009б, 2011а, 2013б]. Аналогичные зависимости получены также для сильных землетрясений с различными механизмами очагов во внутриконтинентальных районах [Копничев, Соколова, 2011б, 2013а]. Использование этих зависимостей позволяет прогнозировать места и энергию готовящихся сильных событий по характеристикам кольцевых структур [Копничев, Соколова, 2011а, б, 2012, 2013б, 2015]. В настоящей работе такие исследования проводятся для района Южной Калифорнии.

Краткая геолого-геофизическая характеристика района исследований

Тектоника рассматриваемого района определяется смещением Тихоокеанской плиты на север относительно Северо-Американской плиты со средней скоростью ~ 38 мм/год [Powell, Weldon, 1992]. Смещение происходит по крупнейшему на земном шаре правостороннему сдвигу – разлому Сан-Андреас (рис. 1). С этим разломом связано сильнейшее землетрясение, известное под названием Форт Техон (Fort Tejon, $M_w = 7.9$), которое произошло в Южной Калифорнии в 1857 г. (рис. 1, табл. 1). Землетрясение названо по населенному пункту, в котором зафиксированы наибольшие разрушения: длина разрыва на поверхности составляла почти 350 км, а максимальное смещение – около 9 м [Sieh, 1978]. Палеосейсмические данные показывают, что такие события происходили

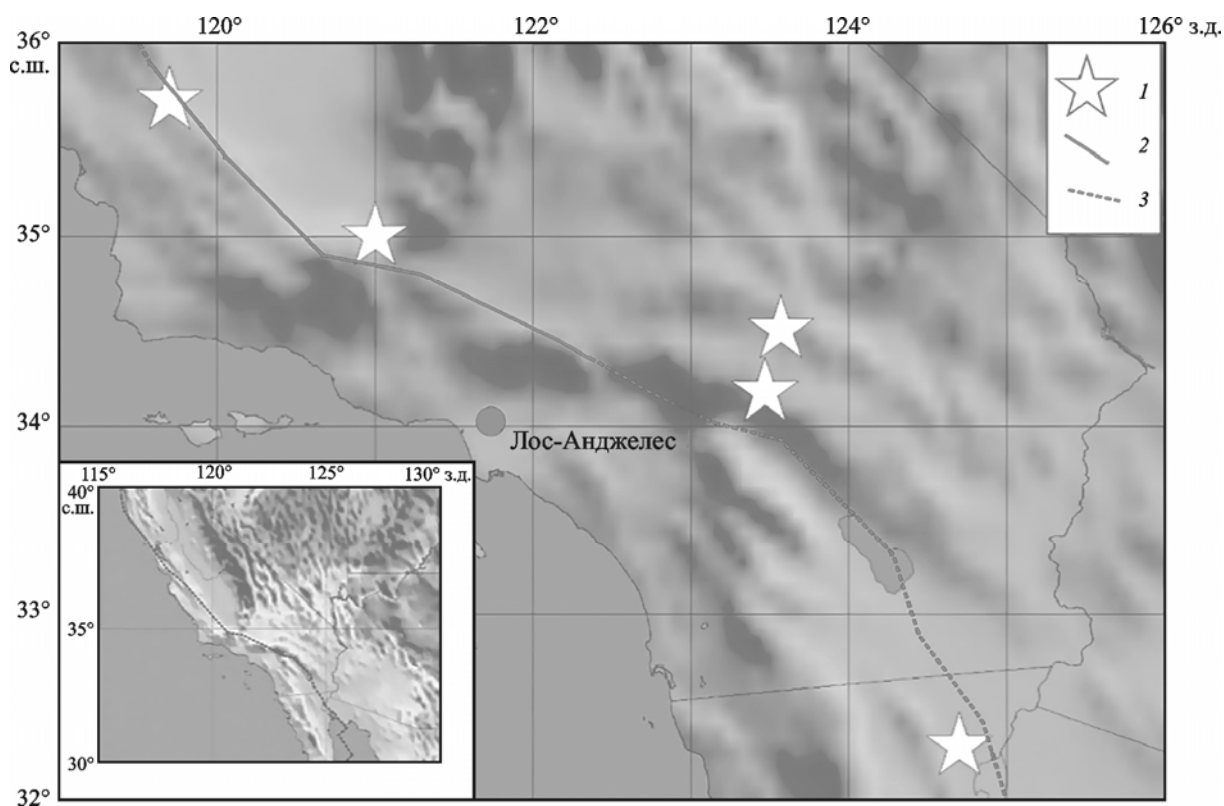


Рис. 1. Карта района исследований

1 – эпицентры землетрясений с $M \geq 7.0$ начиная с 1850 г.; 2 – разрыв при землетрясении 1857 г.; 3 – участок разлома Сан-Андреас. На врезке – разлом Сан-Андреас (показан целиком)

Таблица 1. Сильные землетрясения в районе Южной Калифорнии

Дата	Координаты, град.		M_w	h , км
	с.ш.	з.д.		
09.01.1857 г.	35.7	120.3	7.9	<10
21.07.1952 г.	35.00	119.00	7.3	
28.06.1992 г.	34.18	116.53	7.3	11
16.10.1999 г.	34.51	116.43	7.2	5
04.04.2010 г.	32.29	115.30	7.2	10

в районе Южной Калифорнии регулярно в течение примерно 3000 лет [Scharer et al., 2010]. После землетрясения 1857 г. прошло более 150 лет, что больше среднего периода повторяемости подобных землетрясений в данном районе; в связи с этим некоторые авторы предполагают, что в ближайшее время здесь может произойти новое событие с $M \sim 8.0$ [Scharer et al., 2010]. Кроме того, в рассматриваемом районе начиная с 1900 г. зарегистрированы четыре землетрясения с $M_w = 7.1-7.5$ (в 1952, 1992, 1999 и 2010 годах). Следует отметить, что подавляющее большинство землетрясений в районе Калифорнии происходит на небольших глубинах (до 15 км) [Richards-Dinger, Shearer, 2000].

Использованные данные и методика исследований

Использовались каталоги NEIC (National Earthquake Information Center) Геологической службы США (USGS – United States Geological Survey) начиная с 1945 г. Методика выделения кольцевых структур в большинстве континентальных районов состоит в следующем.

1. Длительность периода, в течение которого исследуются характеристики сейсмичности, может варьировать в зависимости от района исследований; в подавляющем большинстве случаев она не превышает 60 лет (обычно – не более 40).

2. В рассматриваемом районе анализируются параметры сейсмичности в диапазоне глубин 0–33 км, в котором могут формироваться кольцевые структуры. Отбираются события, магнитуда которых не меньше пороговой (M_p), причем эти величины обычно на 2–3 единицы меньше, чем магнитуда главного землетрясения.

3. Производится перебор пороговых величин магнитуд M_p с целью определения оптимальных значений, при которых кольцевые структуры выделяются наиболее четко.

4. Кольцевые структуры аппроксимируются, как правило, эллипсами. Кольца сейсмичности строятся таким образом, чтобы по обе стороны контуров эллипсов находилось примерно равное количество относительно слабых событий. Считается, что кольцо сейсмичности сформировалось, если максимальная ширина полосы формирующих его эпицентров (сумма наибольших отклонений эпицентров, расположенных соответственно внутри и вне эллипса, от его контура) не превышает $1/4$ длины малой оси эллипса (критерий качества кольцевой структуры).

5. Выбирается кольцевая структура с наибольшим возможным пороговым значением M_p . При прочих равных условиях выбирается кольцо сейсмичности с максимальной длиной большой оси эллипса.

6. Регулярно (не реже, чем раз в полгода) необходимо контролировать параметры сейсмичности, поскольку известны случаи, когда за 1–2 года проявляются новые кольцевые структуры с гораздо большими величинами M_p , как это было, например, перед Великим землетрясением Тохоку 11.03.2011 г. [Копничев, Соколова, 2011а].

Анализ данных

28.06.1992 г. в Южной Калифорнии к востоку от разлома Сан-Андреас произошло сильное землетрясение (Ландерс, $M_w = 7.3$). Механизм этого события представлял сдвиг с небольшой компонентой сброса. На рис. 2, а показаны характеристики сейсмичности в окрестностях очаговой зоны за период 01.01.1964 г.–27.06.1992 г. Видно, что перед землетрясением 28.06.1992 г. сформировалась кольцевая структура сейсмичности ($M_{\text{п}} = 4.1$, $L \sim 70$ км), вытянутая в северо-западном направлении. Структура образовалась в 1968–1992 гг., самое сильное событие ($M = 6.1$) в области кольца сейсмичности

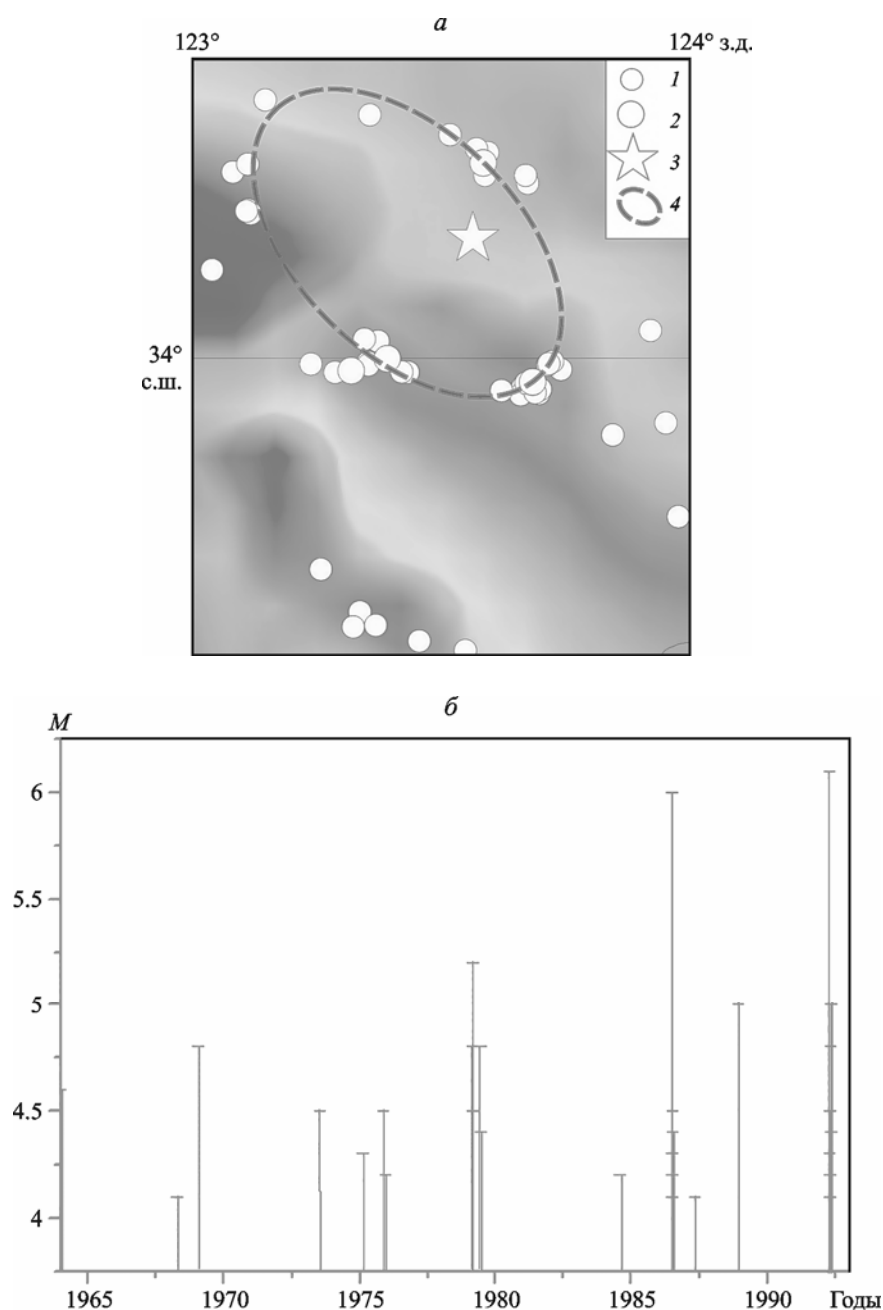


Рис. 2. Элементы сейсмичности перед землетрясением 28.06.1992 г. (а) и зависимость $M(T)$ для кольцевой структуры (б)

Эпицентры землетрясений: 1 – $M = 4.1-4.9$; 2 – $5.0 \leq M < 7.0$; 3 – главного события. 4 – кольцо сейсмичности

произошло в 1992 г. (см. рис. 2, б). Обращает на себя внимание резкий рост скорости сейсмотектонической деформации (СТД) в 1986–1992 гг. Эпицентр землетрясения Ландерс находился внутри кольцевой структуры, поблизости от ее восточной границы.

К северу от очага этого землетрясения 16.10.1999 г. произошло еще одно сильное событие, известное под названием Гектор Майн (Hector Mine), с $M_w = 7.1$. Землетрясение имело механизм типа почти чистого сдвига. На карте, приведенной на рис. 3, а, видно, что перед этим событием сформировалась узкая кольцевая структура сейсмичности ($M_n = 4.1$, $L \sim 55$ км), ориентированная в восток–северо-восточном направлении.

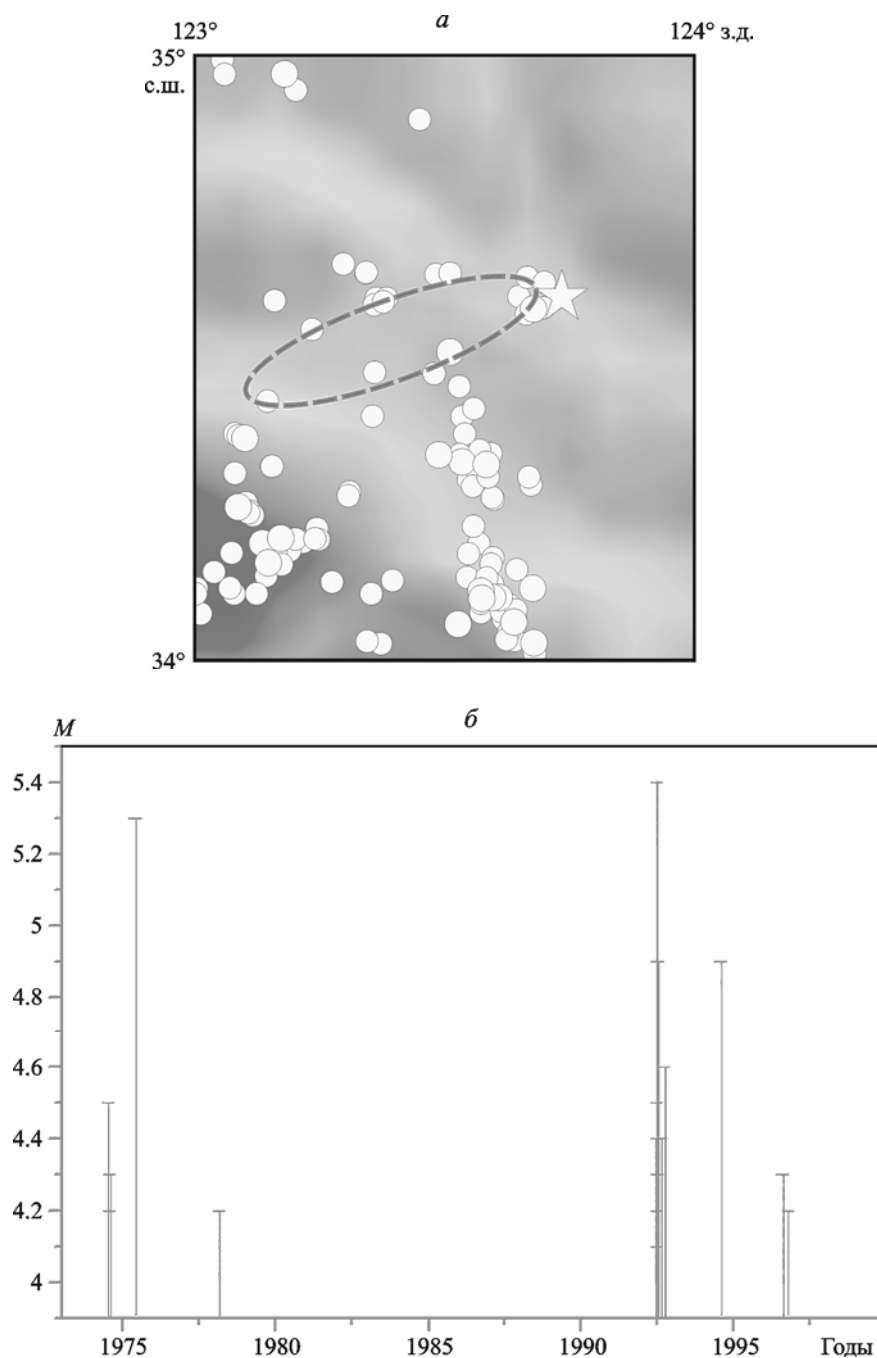


Рис. 3. Элементы сейсмичности перед землетрясением 16.10.1999 г. (а) и зависимость $M(T)$ для кольцевой структуры (б)

Усл. обозн. см. на рис. 2, а

Из данных, приведенных на рис. 3, б, следует, что структура образовалась в 1973–1996 гг., при этом наиболее сильное землетрясение в ее области произошло в 1992 г. ($M=5.4$). В данном случае наблюдался резкий рост скорости СТД в 1992–1996 гг. Эпицентр землетрясения Гектор Майн находился на восточном краю кольцевой структуры. Интересно, что оба рассмотренных нами кольца сейсмичности касаются друг друга на широте $\sim 34.4^\circ$ с.ш.

04.04.2010 г. в районе Южной Калифорнии произошло землетрясение с $M_w = 7.2$, известное под названием Истер (Easter). Очаг этого события приурочен к активному разлому Лагуна Салада, механизм землетрясения представлял практически чистый сдвиг. На рис. 4, а показаны характеристики сейсмичности в области очага и ее окрестностях.

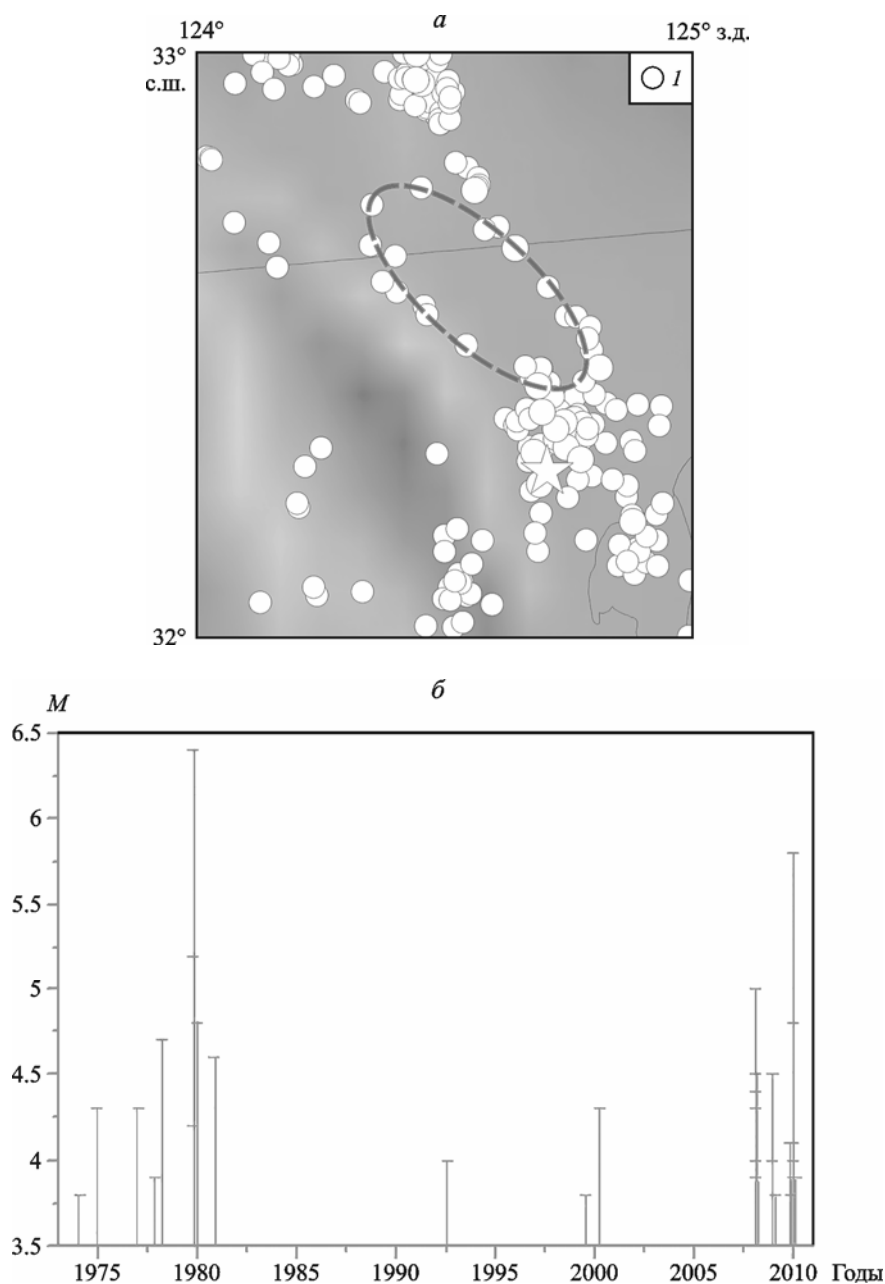


Рис. 4. Элементы сейсмичности перед землетрясением 04.04.2010 г. (а) и зависимость $M(T)$ для кольцевой структуры (б)

I – эпицентры землетрясений с $M = 3.8$ – 4.9 . Остальные обозн. см. на рис. 2, а

Видно, что перед землетрясением Истер проявилось кольцо сейсмичности ($M_{\text{п}} = 3.8$, $L \sim 55$ км), вытянутое в северо-западном направлении. Из данных, приведенных на рис. 4, б, следует, что структура сформировалась в 1974–2010 гг., самое сильное событие в ее области зарегистрировано в 1979 г. ($M = 6.4$). Зависимость магнитуд землетрясений от времени в области структуры имеет U-образную форму, наибольшие скорости СТД отмечены в 1979–1980 и 2008–2010 гг. Эпицентр землетрясения Истер находился на расстоянии около 10 км к югу от кольца сейсмичности.

Рассмотрим теперь характеристики сейсмичности в тех областях, где относительно давно не было достаточно сильных ($M \geq 7.0$) землетрясений. На рис. 5, а показаны эпицентры землетрясений с $M \geq 4.7$ в области к востоку от г. Лос-Анджелес начиная

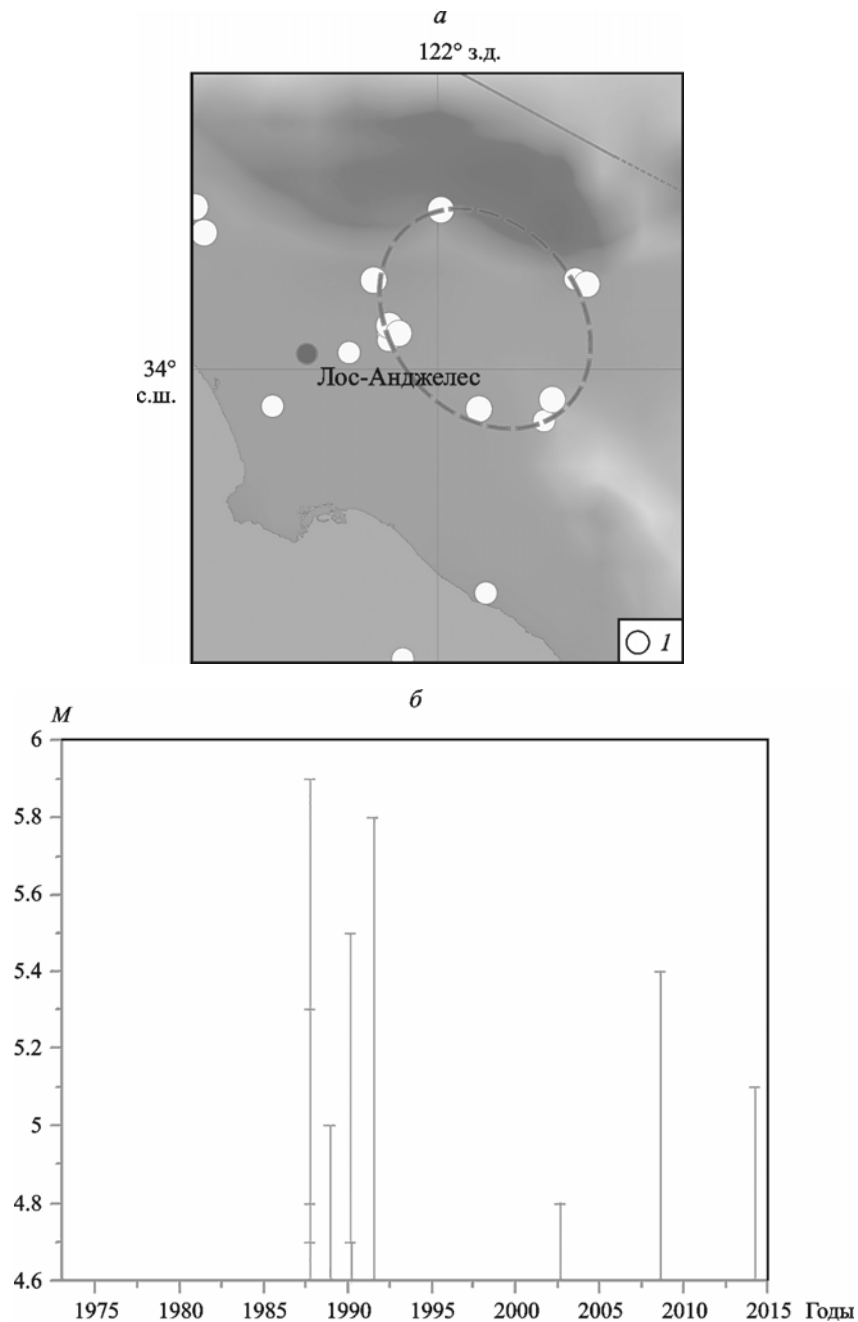


Рис. 5. Элементы сейсмичности в районе г. Лос-Анджелес с 01.01.1973 г. по 01.05.2016 г. (а) и зависимость $M(T)$ для кольцевой структуры (б)

1 – эпицентры землетрясений с $M = 4.7$ – 4.9 . Остальные обозн. см. на рис. 2, а

с 1973 г. Из данных, представленных на рисунке, следует, что здесь сформировалась малая кольцевая структура с большой осью, ориентированной в северо-западном направлении ($L \sim 45$ км). Структура образовалась в 1987–2014 гг. (рис. 5, б), наибольшая магнитуда в ее области соответствует событию 1987 г. ($M = 5.9$). После эпизода относительного затишья в 1991–2007 гг. наблюдалась активизация сейсмичности в 2008–2014 гг.

Рис. 6, а иллюстрирует характеристики сейсмичности в области, ограниченной координатами 33° – 36° с.ш., 115° – 120° з.д., начиная с 1945 г. В данном случае проявилась

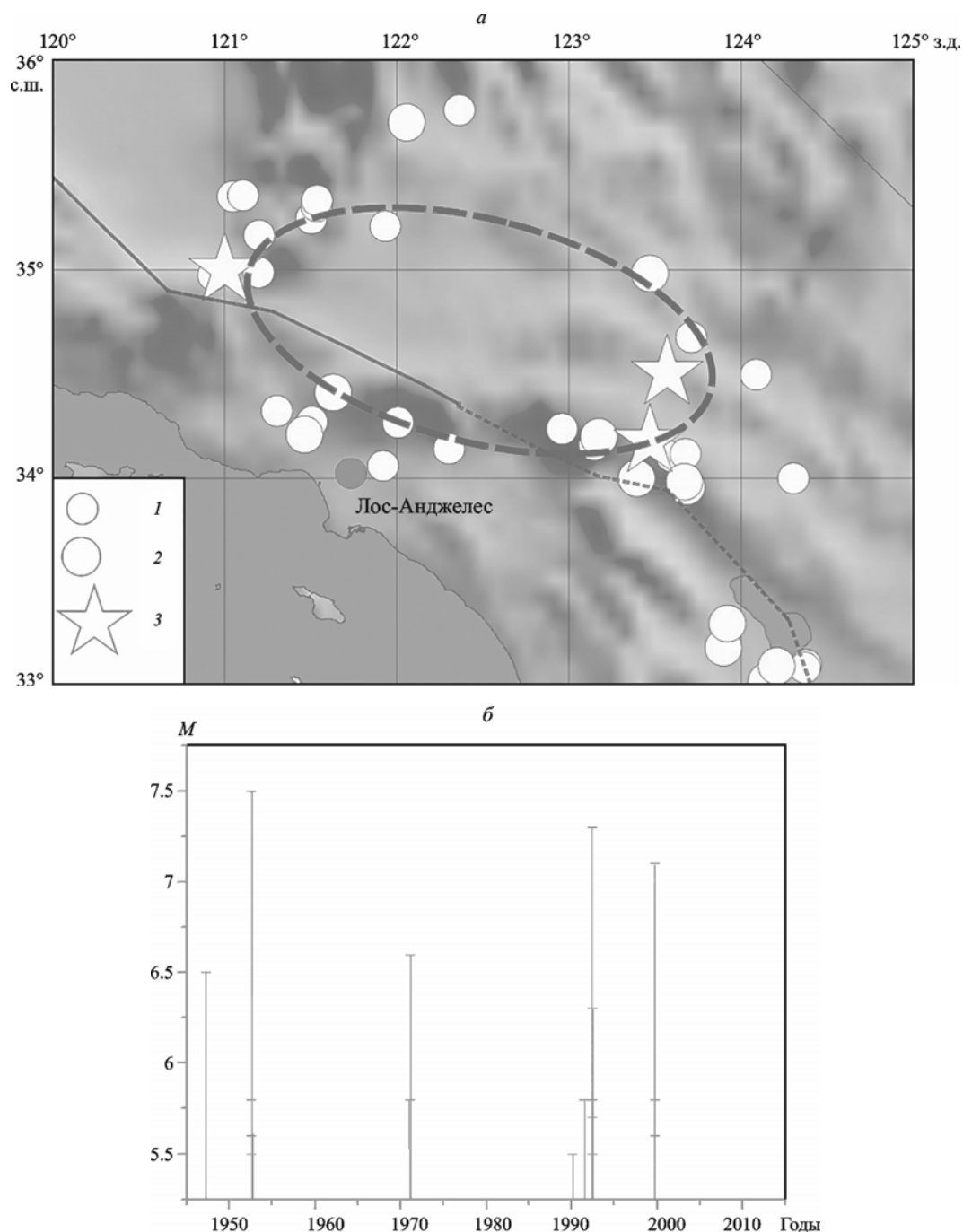


Рис. 6. Элементы сейсмичности в районе Южной Калифорнии с 01.01.1945 г. по 01.05.2016 г. (а) и зависимость $M(T)$ для кольцевой структуры (б)

Эпицентры землетрясений: 1 – $M = 5.5$ – 5.9 ; 2 – $6.0 \leq M < 7.0$; 3 – $M \geq 7.0$. Остальные обозн. см. на рис. 1 и рис. 2, а

крупная кольцевая структура, вытянутая в субширотном направлении ($M_{\text{п}} = 5.5$, $L \sim 250$ км). Через структуру проходит отрезок разлома Сан-Андреас, с которым связано сильнейшее землетрясение 1857 г. К границе кольца сейсмичности приурочены эпицентры сильных ($M > 7.0$) событий 1952, 1992 и 1999 годов. Кольцевая структура образовалась в 1947–1999 гг. (рис. 6, б). Интересно, что два кольца сейсмичности, представленные на рис. 5, а и 6, а, практически касаются друг друга на долготе $\sim 122^\circ$ з.д.

Оценка магнитуд землетрясений, соответствующих кольцевым структурам в районе Южной Калифорнии

В работе [Копничев, Соколова, 2013а] получены корреляционные зависимости магнитуд сильных землетрясений с различными механизмами очагов, произошедших во внутриконтинентальных районах, от размеров кольцевых структур, формировавшихся перед этими событиями. Для событий с механизмами типа сдвига получена следующая зависимость (рис. 7):

$$\lg L \text{ (км)} = -1.12 + 0.49M_w, r = 0.94, \quad (1)$$

где r – коэффициент корреляции.

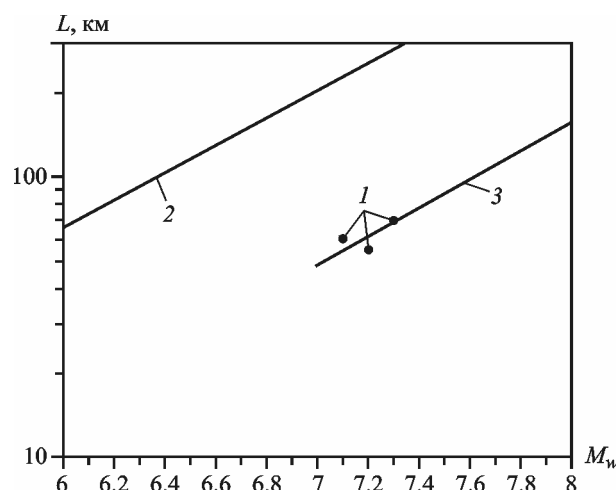


Рис. 7. Величины $L(M_w)$ для трех кольцевых структур в районе Южной Калифорнии (1) по отношению к корреляционной зависимости (1), полученной для внутриконтинентальных районов (2), и аналогичная зависимость для района о. Суматра (3)

Этой зависимости соответствует очень высокая величина r , поэтому авторы использовали ее в качестве первого приближения для оценки магнитуд сильных землетрясений, которые могут произойти в областях выделенных кольцевых структур. Из представленных на рис. 7 данных следует, что величины L в районе Южной Калифорнии существенно занижены для данной M_w по сравнению со средними величинами, полученными для внутриконтинентальных районов. Интересно, что данные для трех рассмотренных выше кольцевых структур близки к корреляционной зависимости, найденной для района о. Суматра [Копничев, Соколова, 2009б]. Мы предположили, что наклон графика $\lg L(M_w)$ для района Южной Калифорнии соответствует зависимости (1), а уровень графика смещен относительно нее на величину $C = \text{const}$:

$$\lg L \text{ (км)} = -1.12 + C + 0.49 M_w. \quad (2)$$

Используя данные, полученные для трех событий (см. рис. 2–4), находим среднюю величину $C = -0.66 \pm 0.11$. По формуле (2) для данной величины C оценены средние величины M_w , которые могут соответствовать кольцевым структурам, представленным на рис. 5, а и 6, а. Из приведенных в табл. 2 сведений следует, что в области малого кольца может готовиться событие с $M_w = 6.9 \pm 0.2$, а в области крупного – с $M_w = 8.6 \pm 0.2$. Конечно, эти величины следует рассматривать только в качестве первого приближения.

Таблица 2. Параметры кольцевых структур в областях возможной подготовки сильных землетрясений в Южной Калифорнии

Координаты, град.		L , км	M_p	M_w (прогноз)
с.ш.	з.д.			
33.5–34.5	117.5–118.5	45	4.7	6.9 ± 0.2
34.0–35.5	115.5–119.5	280	5.5	8.6 ± 0.2

Обсуждение результатов

Полученные в предыдущих разделах данные свидетельствуют о том, что в районе Южной Калифорнии, так же как и во многих внутриконтинентальных районах [Копничев, Соколова, 2010, 2012, 2013а], а также в зонах субдукции [Копничев, Соколова, 2009а, б, 2010, 2011а, б, 2013б, 2015], перед большинством сильных землетрясений формируются кольцевые структуры сейсмичности. В работах [Копничев, Соколова, 2010, 2011а, б, 2012, 2013а, б, 2015] отмечено, что образование кольцевых структур связано с процессами самоорганизации геологических систем [Летников, 1992], проявляющимися в миграции глубинных флюидов в земной коре и верхах мантии. Эти процессы в конечном счете ведут к уменьшению потенциальной энергии нашей планеты.

Миграция флюидов осуществляется различными способами в зависимости от их содержания и проницаемости горных пород. На начальном этапе флюиды находятся в виде изолированных пузырьков, сосредоточенных в углах зерен породы [Родкин, 1993]. Под действием сдвиговых напряжений флюиды начинают медленно формировать связанную сеть, выстраиваясь вдоль граней зерен [Hier-Majumder, Kohlstedt, 2006]. На кровле двухфазного слоя со связанной сетью флюидов, заполняющих поры и трещины, из-за разности плотностей флюида и вмещающей породы наблюдается концентрация напряжений [Gold, Soter, 1984/1985]. При достаточной мощности такого слоя происходит гидроразрыв кровли, в результате чего часть флюидов относительно быстро поднимается вверх, и этот процесс может повторяться многократно [Gold, Soter, 1984/1985]. По всей вероятности, землетрясения являются одним из главных механизмов, обеспечивающих быструю миграцию флюидов в вертикальном направлении [Sibson et al., 1975].

В работе [Копничев, Соколова, 2013б] выдвинута гипотеза о пропорциональности энергии сильных землетрясений в межплитных областях потенциальной энергии флюидов, высвобождаемой при подготовке и реализации таких событий. Принятие этой гипотезы позволяет объяснить, в частности, очень низкие величины L для кольцевых структур, формирующихся в зонах субдукции, по сравнению с внутриконтинентальными областями [Копничев, Соколова, 2009а, б, 2010, 2011а, б, 2012, 2013а, б, 2015]. Можно полагать, что этот эффект связан с относительно низким содержанием флюидов в литосфере континентов [Глубинное..., 1987]. Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что величины L существенно занижены и в районе Южной Калифорнии. Это может быть показателем о достаточно высокого содержания флюидов

по крайней мере в земной коре рассматриваемого района. В то же время отсутствие относительно глубокофокусных землетрясений может быть свидетельством низкого содержания флюидов в верхах мантии. Для проверки этих заключений авторы настоящей статьи планируют исследовать характеристики поля поглощения короткопериодных S -волн в земной коре и верхах мантии района Калифорнии.

Следует отметить, что об активной миграции глубинных флюидов в области разлома Сан-Андреас и в его окрестностях свидетельствуют также данные о высоком отношении содержания изотопов гелия $^3\text{He}/^4\text{He}$ в водах гидротермальных источников [Kennedy et al., 1997], что является показателем подъема мантийного гелия в верхнюю часть земной коры.

Особый интерес представляют данные о кольцевых структурах в областях, где достаточно давно не было сильных землетрясений. Из приведенных выше оценок следует, что в области, прилегающей с востока к мегаполису Лос-Анджелес, возможно, готовится землетрясение с $M_w \sim 7$, а в области разлома Сан-Андреас – с $M_w \sim 8.5$. Оба таких события могут привести к человеческим жертвам и большим разрушениям в районе с высокой плотностью населения и высокоразвитой промышленностью. Отметим, что во многих случаях наблюдается увеличение скорости сеймотектонической деформации в областях кольцевых структур за несколько лет до сильных и сильнейших землетрясений, с которыми связано формирование этих структур [Копничев, Соколова, 2010, 2011а, б, 2012, 2013а, б, 2015] (это также видно и на рис. 2–4). В то же время в области крупного кольца сейсмичности не зарегистрировано событий с $M \geq 5.5$ после 1999 г. В связи с этим в ближайшие годы более вероятна реализация сильного землетрясения в области малого кольца сейсмичности (к востоку от г. Лос-Анджелес), где в 2008–2014 гг. произошло два события с $M > 5.0$. По нашему мнению, здесь необходимо активизировать геофизические и геохимические исследования с целью возможного среднесрочного прогноза сильного сейсмического события.

Резюме

В работе рассмотрены некоторые характеристики сейсмичности в районе Южной Калифорнии, ограниченном координатами 32° – 36° с.ш. Использована методика, основанная на выделении кольцевых структур сейсмичности. Установлено, что перед тремя сильными землетрясениями с $M > 7.0$, произошедшими в 1992, 1999 и 2010 годах, в течение нескольких десятков лет сформировались кольцевые структуры с пороговыми значениями магнитуд M_p равными 4.1, 4.1 и 3.8 соответственно. Существенно, что размеры этих структур в несколько раз меньше, чем для внутриконтинентальных событий с механизмами типа сдвига, имеющих соответствующие магнитуды. Выделены две кольцевые структуры (малая и большая) в областях к востоку от г. Лос-Анджелес, где не было достаточно сильных землетрясений по меньшей мере 150 лет. Малая структура начала формироваться в 1987 г., а большая – в 1947 г. На основании полученной ранее корреляционной зависимости размеров колец сейсмичности от энергии главных событий для внутриконтинентальных землетрясений с механизмами типа сдвига оценены магнитуды сильных событий, которые могут готовиться в областях этих структур: $M_w = 6.9 \pm 0.2$ к востоку от г. Лос-Анджелес и $M_w = 8.6 \pm 0.2$ в области, где произошло сильнейшее землетрясение 1857 г. Предполагается, что формирование кольцевых структур связано с процессами самоорганизации геологических систем, в результате которых осуществляется миграция глубинных флюидов, в конечном счете приводящая к уменьшению потенциальной энергии нашей планеты. Полученные в настоящей статье и ранее данные свидетельствуют о перспективности применения использованной методики для определения мест и магнитуд готовящихся сильных землетрясений в различных районах земного шара.

Литература

- Глубинное строение слабосейсмичных регионов СССР / Отв. ред. Ю.К. Щукин, В.З. Рябой. М.: Наука, 1987. 238 с.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевая сейсмичность в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции // Докл. РАН. 2009а. Т. 425, № 4. С. 539–542.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры // Докл. РАН. 2009б. Т. 429, № 1. С. 106–109.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. О корреляции характеристик сейсмичности и поля поглощения S -волн в районах кольцевых структур, формирующихся перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2010. № 6. С. 34–51.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности и землетрясение 11.03.2011 г. ($M_w = 9.0$) в районе Северо-Восточной Японии // Докл. РАН. 2011а. Т. 440, № 2. С. 246–249.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S -волн в районе очага землетрясения Мауле (Чили, 27.02.2010 г., $M_w = 8.8$) и их связь с сейсмичностью и вулканизмом // Геофизические исследования. 2011б. Т. 12, № 3. С. 22–33.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения S -волн и кольцевые структуры сейсмичности в районе Байкальской рифтовой зоны // Вестн. НЯЦ РК. 2012. Вып. 4. С. 33–41.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности, формирующиеся в континентальных районах перед сильными землетрясениями с различными механизмами очагов // Геофизические исследования. 2013а. Т. 14, № 1. С. 5–15.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности, формирующиеся перед сильными и сильнейшими землетрясениями на северо-западе и востоке Тихого океана // Вестн. НЯЦ РК. 2013б. Вып. 2. С. 131–140.
- Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности в районе Северного Чили и успешный прогноз места и магнитуды землетрясения Икике 01.04.2014 г. ($M_w = 8.2$) // Вестн. НЯЦ РК. 2015. Вып. 4. С. 153–159.
- Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 1992. 229 с.
- Родкин М.В. Роль глубинного флюидного режима в геодинамике и сейсмотектонике. М., 1993. 192 с.
- Gold T., Soter S. Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes // Pure Appl. Geophys. 1984/1985. V. 122. P. 492–530.
- Hier-Majumder S., Kohlstedt D. Role of dynamic grain boundary wetting in fluid circulation beneath volcanic arcs // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L08305.
- Kennedy B., Kharaka Y., Ewans W. et al. Mantle fluids in the San Andreas fault system, California // Science. 1997. V. 278. P. 1278–1281.
- Powell R., Weldon R. Evolution of the San Andreas fault // Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 1992. V. 20. P. 431–468.
- Richards-Dinger K., Shearer P. Earthquake locations in Southern California obtained using source specific station terms // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. P. 10939–10960.
- Scharer K., Biasi G., Weldon II R., Fumal T. Quasi-periodic recurrence of large earthquakes on the Southern San Andreas fault // Geology. 2010. V. 38, N 6. P. 555–558. DOI 10.1130/G30746.1.
- Sibson R., Moore J., Rankin A. Seismic pumping – a hydrothermal fluid transport mechanism // J. Geol. Soc. 1975. V. 131. P. 653–659.
- Sieh K. Slip along the San Andreas fault associated with the great 1857 earthquake // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1978. V. 68, N 5. P. 1421–1448.

Сведения об авторах

КОПНИЧЕВ Юрий Федорович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. Россия, 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (7272) 956-350. E-mail: yufk777@mail.ru

KOPNICHYEV Yuri F. – dr. of ph. & math., professor, chief research scientist, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia. Tel.: +7 (7272) 956-350. E-mail: yufk777@mail.ru

СОКОЛОВА Инна Николаевна – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт геофизических исследований Министерства энергетики Республики Казахстан. Республика Казахстан, 050020, г. Алма-Ата, ул. Чайкиной, д. 4. Тел.: +7 (7272) 631-330. E-mail: sokolova.inessa@mail.ru

SOKOLOVA Inna N. – dr. of ph. & math., senior scientist, Institute of Geophysical Research of Ministry of Energy of Republic Kazakhstan. Almaty, Kazakhstan. Tel.: +7 (7272) 631-330. E-mail: sokolova.inessa@mail.ru

**RING-SHAPED SEISMICITY STRUCTURES
IN SOUTHERN CALIFORNIA:
POSSIBLE LARGE EARTHQUAKE NUCLEATION
IN THE LOS ANGELES BASIN**

Yu.F. Kopnichev¹, I.N. Sokolova²

¹ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

² Institute of Geophysical Research of Ministry of Energy of Republic Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

Abstract. Some seismicity characteristics in Southern California were studied. It was established that ring-shaped seismicity structures with threshold magnitude M_t of 4.1, 4.1 and 3.8 respectively were formed prior to three large earthquakes ($M_w > 7.0$) of 1992, 1999 and 2010. The sizes of these structures are several times less than for intracontinental strike-slip events of corresponding magnitudes. Two ring-shaped structures were identified in the areas to the east of the City of Los Angeles, where relatively large earthquakes did not occur for at least 150 years. The magnitudes of large events which can occur in the areas of these structures were estimated on the basis of the previously obtained correlation dependence of the ring sizes on the magnitudes of the main strike-slip earthquakes. Large events with magnitudes of $M_w = 6.9 \pm 0.2$ and $M_w = 8.6 \pm 0.2$ can occur in the area to the east of the City of Los Angeles and in the rupture zone of the great Fort Tejon earthquake of 1857 correspondingly. We believe that ring structures formation, similarly to the other regions, is connected with deep fluid migration.

Keywords: earth's crust, ring-shaped seismicity structures, large earthquakes, deep-seated fluids.