

УДК 550.34

КОЛЬЦЕВАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ НА ВОСТОКЕ ЭГЕЙСКОГО МОРЯ И В ЗАПАДНОЙ ТУРЦИИ: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ К ЮГУ ОТ СТАМБУЛА

¹⁾ Копничев Ю.Ф., ²⁾ Соколова И.Н.

¹⁾ Институт физики Земли Российской Академии наук, Москва, Россия

²⁾ Институт геофизических исследований, Курчатов, Казахстан

Рассматриваются некоторые характеристики сейсмичности на востоке Эгейского моря и в западной Турции. Использована методика, основанная на выделении кольцевых структур сейсмичности. Установлено, что перед пятью сильными землетрясениями с $Mw=6,4\text{--}7,6$, произошедшими в 1995–2017 гг., в течение нескольких десятков лет сформировались неглубокие кольцевые структуры ($h=0\text{--}33$ км) с пороговыми значениями магнитуд Mn в диапазоне 3,8–4,5. Размеры этих структур в несколько раз меньше, чем для внутриконтинентальных событий с механизмами типа сдвига и сброса, имеющих соответствующие магнитуды. Кроме того, здесь проявились глубокие ($h=34\text{--}70$ км) полосы сейсмичности. Показано, что эпицентры сильных землетрясений нередко находятся вблизи областей пересечения или наибольшего сближения мелких колец и глубоких полос сейсмичности. Выделена неглубокая кольцевая структура ($Mn=4,3$) в районе Мраморного моря, где не было землетрясений с $Mw\geq 7,0$ по крайней мере с 1900 г. Кроме того, в данном районе также проявились глубокие полосы сейсмичности. На основании полученных ранее корреляционных зависимостей параметров колец сейсмичности от энергии главных событий для внутриконтинентальных землетрясений с механизмами типа сдвига оценена магнитуда сильного события, которое может готовиться в области кольцевой структуры: $Mw=7,3\pm 0,1$. Формирование кольцевых структур и глубоких полос сейсмичности связывается с процессами самоорганизации геологических систем, в результате которых осуществляется миграция глубинных флюидов.

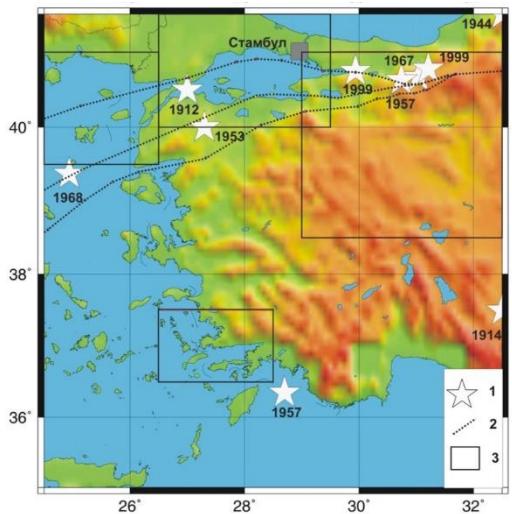
ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие авторами было показано, что перед многими сильными землетрясениями, как правило, в течение нескольких десятилетий формируются кольцевые структуры (кольца) сейсмичности, оконтуривающие области относительного сейсмического затишья [1–14]. В отличие от ранних работ китайских и японских авторов, упомянутых в монографии Г.А. Соболева [15], при выделении таких структур мы отбирали события с магнитудами $M\geq Mn$, где Mn – пороговые значения, которые закономерно растут с увеличением энергии главных землетрясений. Это позволило для ряда зон субдукции получить корреляционные зависимости $L(Mw)$ и $Mn(Mw)$, где L – длины больших осей колец сейсмичности, Mw – магнитуды соответствующих им сильных событий [2, 14]. Аналогичные зависимости получены также для сильных землетрясений с различными механизмами очагов во внутриконтинентальных районах [7]. Использование этих зависимостей обеспечивает возможность прогноза мест и магнитуд готовящихся сильных событий по характеристикам кольцевых структур [4, 6, 8–12, 14]. Вместе с тем выяснилось, что в некоторых континентальных районах зависимости $L(Mw)$ и $Mn(Mw)$ могут существенно отличаться от средних зависимостей, приведенных в [7]. В связи с этим для уточнения прогнозов магнитуд готовящихся сильных землетрясений необходимо учитывать местные особенности (вводить поправки за величины L и Mn [11, 12, 14]). В настоящей статье приведены результаты таких исследований для района, включающего восточную часть Эгейского моря и западную Турцию.

КРАТКАЯ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Тектоника рассматриваемого района в значительной степени определяется Северо-Анатолийской разломной зоной, представляющей активный правосторонний сдвиг, который проходит по трансформной границе между Евразиатской и Анатолийской плитами (рисунок 1). Разломная зона длиной около 1500 км простирается в субширотном направлении от восточной Турции через север страны до Эгейского моря, при этом ее северная ветвь проходит через Мраморное море всего лишь в 20 км к югу от мегаполиса Стамбул. На севере Эгейского моря разломная зона поворачивает на юго-запад. Анатолийская плита смещается относительно Евразиатской на запад со средней скоростью около 25 мм/год [16]. Район характеризуется достаточно высокой сейсмичностью. Начиная с 1900 г. здесь между $24,5^\circ$ и $32,5^\circ$ Е произошло 10 сильных землетрясений с $Mw\geq 7,0$, в том числе 4 – на севере Эгейского и поблизости от Мраморного моря (таблица 1). Из рисунка 1 следует, что в области Мраморного моря выделяется сейсмическая брешь, в которой более 100 лет не было землетрясений с $Mw\geq 7,0$. Более детальный анализ, проведенный в [17], показывает, что после 1766 г. очаговые зоны сильных землетрясений с $M\geq 7,0$ располагались в областях к западу от $27,6^\circ$ Е и к востоку от $28,8^\circ$ Е (последние события такого рода произошли соответственно в 1912 и 1999 гг.). Исходя из совокупности геофизических данных, ряд авторов считает, что в области Мраморного моря велика вероятность реализации нового сильного сейсмического события в ближайшие несколько десятилетий [17–19].

КОЛЬЦЕВАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ НА ВОСТОКЕ ЭГЕЙСКОГО МОРЯ И В ЗАПАДНОЙ ТУРЦИИ: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ К ЮГУ ОТ СТАМБУЛА



1 – эпицентры землетрясений с $M \geq 7,0$ начиная с 1900 г (указаны годы этих событий); 2 – Северо-Анатолийский разлом; 3 – области, в которых выделены кольцевые структуры, представленные на рисунках 2–5

Рисунок 1. Карта района исследований

Таблица 1. Сильные землетрясения на востоке Эгейского моря и в западной Турции

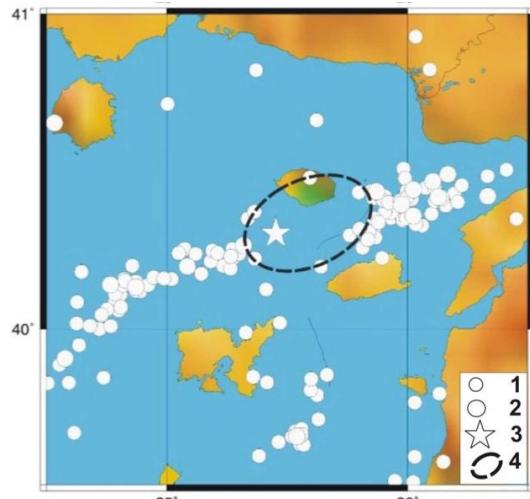
Дата	°N	°E	M_w	h, км
09.08.1912	40,50	27,00	7,6	—
03.10.1914	37,50	32,50	7,1	—
01.02.1944	41,50	32,50	7,2	—
18.03.1953	40,00	27,30	7,2	—
25.04.1957	36,35	28,70	7,1	35
26.05.1957	40,67	31,04	7,2	17
22.07.1967	40,63	30,74	7,4	4
19.02.1968	39,37	24,94	7,2	9
17.08.1999	40,75	29,94	7,6	17
12.11.1999	40,78	31,21	7,2	10

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Использовались каталоги NEIC (National Earthquake Information Center) Геологической службы США (USGS – United States Geological Survey), начиная с 1964 г. С этого времени точность определения координат эпицентров землетрясений существенно улучшилась в связи с началом работы всемирной сети станций WWSSN (World-Wide Standard Seismographic Network). Методика выделения кольцевых структур подробно описана авторами ранее [11, 12, 14]. Здесь только следует заметить, что рассматриваются события в двух диапазонах глубин (0–33 и 34–70 км); при этом вводится понятие порогового значения магнитуды M_n , с помощью которого отфильтровываются сравнительно слабые события. Кроме того, кольцевые структуры характеризуются длинами больших осей (L). Было показано, что параметры M_n и L закономерно растут с магнитудой главных землетрясений M_w , перед которыми формируются кольцевые структуры [2, 7, 14].

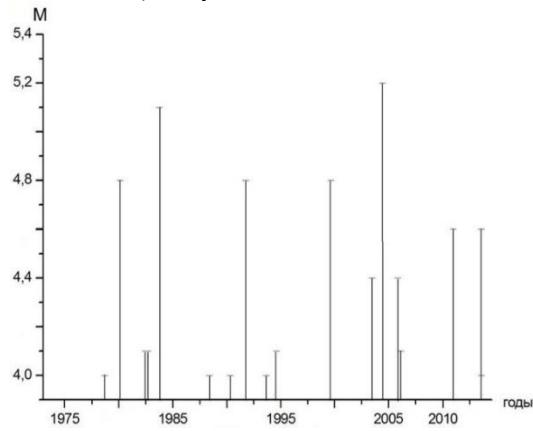
АНАЛИЗ ДАННЫХ

24.05.2014 г. на северо-востоке Эгейского моря произошло довольно сильное Самотракийское землетрясение ($M_w=6,9$), которое имело сдвиговый тип ме-

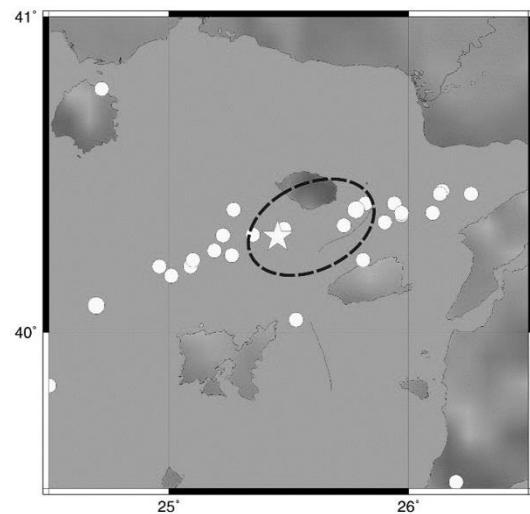


Эпицентры событий: 1 – $M=4,0–4,9$, 2 – $M=5,0–6,0$,
3 – главного землетрясения; 4 – кольцо сейсмичности

а) неглубокая сейсмичность



б) зависимость M (T) для кольцевой структуры



○ – $M=3,2–4,9$. Другие обозначения – на рисунке 2-а

в) глубокая сейсмичность

Рисунок 2. Элементы сейсмичности перед землетрясением 24.05.2014 г.

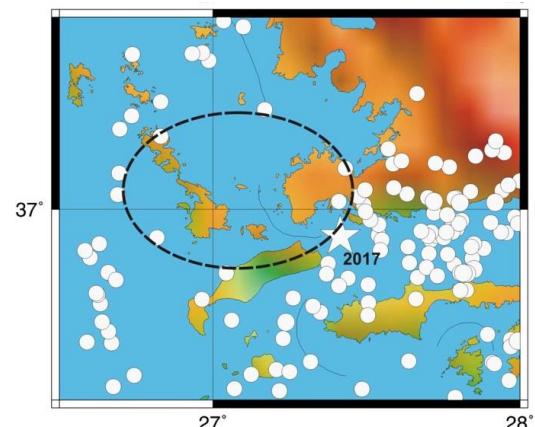
ханизма. Из рисунка 2-а следует, что перед этим событием сформировалась небольшая кольцевая струк-

тура сейсмичности ($Mn=4,0$; $L\sim 50$ км), ориентированная в восток-северо-восточном направлении. На рисунке 2-б видно, что структура образовалась в 1978–2013 гг., при этом наиболее сильное землетрясение в ее области произошло в 2004 г. ($M=5,2$). Зависимость $M(T)$ в данном случае имеет U-образную форму. Заметим, что сумма магнитуд событий в единицу времени может служить грубой оценкой скорости сейсмотектонической деформации (СТД). Из рисунка 2-б следует, что наибольшие скорости СТД имели место в 1978–1983 и 2003–2013 гг.

На рисунке 2-в представлены элементы относительно глубокофокусной сейсмичности в указанном районе. Здесь четко выделяется линейная полоса эпицентров ($M=3,2$ – $5,2$), вытянутая в субширотном направлении, которая сформировалась в 1975–2008 гг. Полоса пересекает кольцевую структуру вдоль ее большой оси. Важно отметить, что эпицентр Самотракийского землетрясения находится на расстоянии всего лишь около 10 км от области пересечения кольца и полосы сейсмичности.

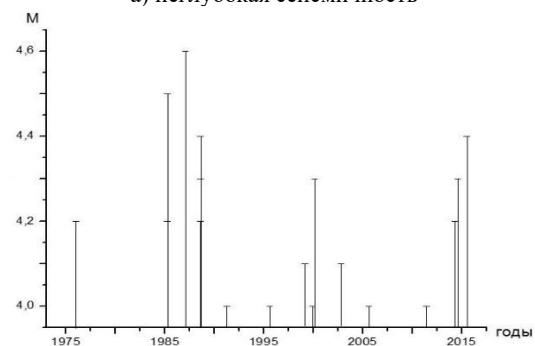
20.07.2017 г. на границе между Грецией и Турцией зарегистрировано Бодрум-Косское землетрясение с $Mw=6,6$. Это событие имело сбросовый тип механизма, оно сопровождалось небольшим цунами. Рисунок 3-а иллюстрирует характеристики неглубокой сейсмичности, проявившейся перед данным землетрясением за период 01.01.1973–19.07.2017 гг. ($Mn=4,0$). Видно, что на восточной окраине Эгейского моря сформировалась небольшая кольцевая структура ($L\sim 65$ км), ориентированная в субширотном направлении. Эпицентр главного землетрясения попадает на юго-восточную границу кольца сейсмичности. Структура проявилась в 1976–2015 гг., наибольшая магнитуда ($M=4,6$) соответствует событию 1987 г. (рисунок 3-б). На рисунке 3-в представлены элементы глубокофокусной сейсмичности. Здесь выделяется субширотная полоса эпицентров ($M=3,4$ – $5,1$), практически касающаяся мелкой кольцевой структуры поблизости от эпицентра Бодрум-Косского землетрясения.

На рисунке 4-а представлены эпицентры неглубоких событий, зарегистрированных в области, ограниченной координатами $38,5$ – $41,0^\circ$ N, $29,0$ – $32,5^\circ$ E, за период 01.01.1964–16.08.1999 гг. Видно, что перед сильнейшим ($Mw=7,6$) Измитским землетрясением 17.08.1999 г. сформировалась крупная кольцевая структура ($Mn=4,5$, $L\sim 280$ км), вытянутая в восток-северо-восточном направлении. Структура образовалась в 1967–1993 гг. (рисунок 4-б), наибольшая магнитуда соответствует сильному землетрясению ($Mw=7,4$), произошедшему в долине Мудурну 22.07.1967 г. Эпицентр главного события находится вблизи северной границы кольца сейсмичности. Поблизости от эпицентра Измитского землетрясения не зарегистрировано относительно глубокофокусных событий ($M\geq 3,0$), так что здесь заведомо не проявилось полос сейсмичности на глубинах 34–70 км.

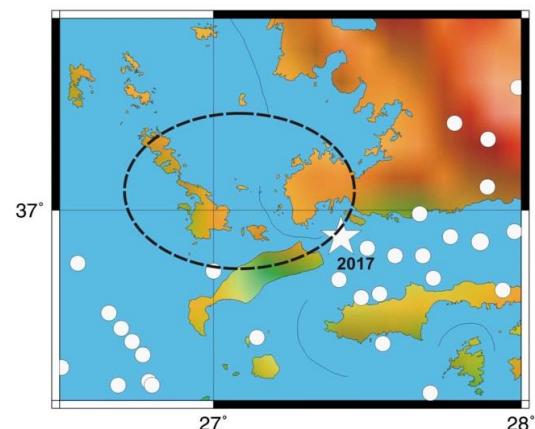


○ – $M=4,0$ – $4,9$. Другие обозначения – на рисунке 2-а

а) неглубокая сейсмичность



б) зависимость $M(T)$ для кольцевой структуры



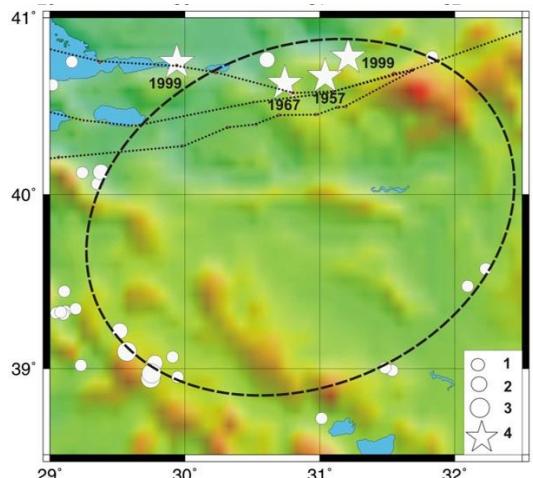
○ – $M=3,4$ – $4,9$. Другие обозначения – на рисунке 3-а

в) глубокая сейсмичность

Рисунок 3. Элементы сейсмичности перед Бодрум-Косским землетрясением

Всего были рассмотрены характеристики сейсмичности в областях, в которых произошли 5 сильных и сильнейших землетрясений (два с механизмами типа сдвига и три – сброса). В таблице 2 приведены параметры кольцевых структур, сформировавшихся перед этими событиями. Отметим, что в четырех случаях эпицентры главных событий располагались вблизи областей пересечения или наибольшего сближения мелких колец и глубоких полос сейсмичности.

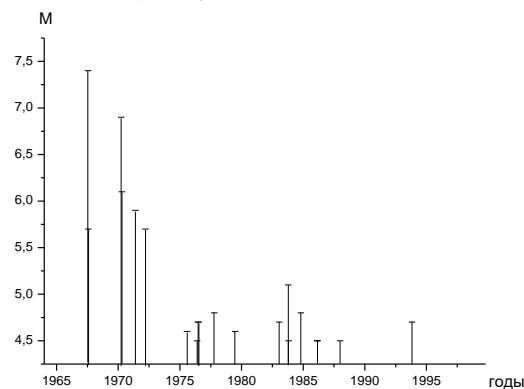
КОЛЬЦЕВАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ НА ВОСТОКЕ ЭГЕЙСКОГО МОРЯ И В ЗАПАДНОЙ ТУРЦИИ:
ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ К ЮГУ ОТ СТАМБУЛА



1 – $M=4,5\text{--}4,9$, 2 – $M=5,0\text{--}5,9$, 3 – $M=6,0\text{--}6,9$, 4 – $M=7,1\text{--}7,6$.

Другие обозначения – на рисунках 1 и 2-а

а) неглубокая сейсмичность



б) зависимость $M(T)$ для кольцевой структуры

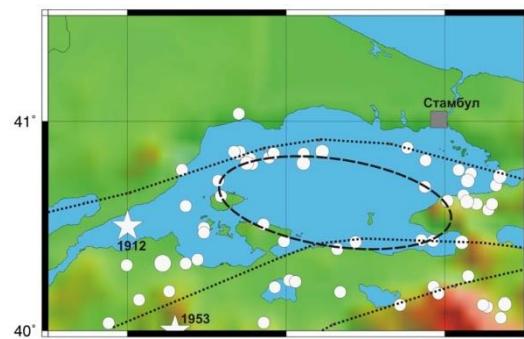
Рисунок 4. Характеристики сейсмичности перед Измитским землетрясением

Таблица 2. Параметры кольцевых структур, сформировавшихся перед сильными землетрясениями на востоке Эгейского моря и в западной Турции

Дата	Mw	$^{\circ}N$	$^{\circ}E$	$L, \text{км}$	M_p	C1	C2	Механизм
01.10.1995	6,4	38,06	30,13	75	3,8	-0,39	-0,11	брос
17.08.1999	7,6	40,75	29,94	280	4,5	-0,15	-0,19	сдвиг
03.02.2002	6,5	38,57	31,27	70	4,0	-0,37	0,03	брос
24.05.2014	6,9	40,29	25,39	50	4,0	-0,56	-0,25	сдвиг
20.07.2017	6,6	36,93	27,41	65	4,0	-0,44	-0,03	брос

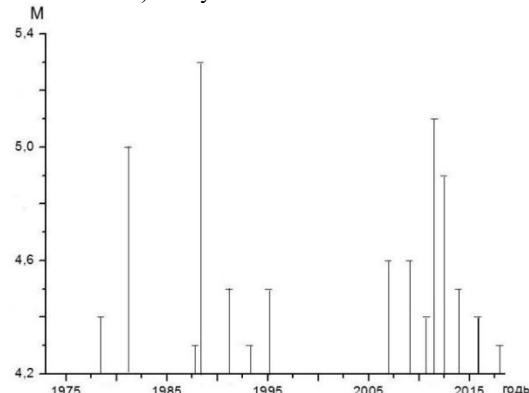
Рассмотрим теперь характеристики сейсмичности в одной области западной Турции, где достаточно давно не было сильных событий ($M \geq 7,0$). Рассматриваемая область расположена в Мраморном море, где разными авторами прогнозируется такое землетрясение в ближайшие десятилетия [17, 18, 19]. Ниже описываются некоторые данные, полученные за период 01.01.1973–01.06.2018 гг.

На рисунке 5-а показаны эпицентры неглубоких землетрясений с $M \geq 4,3$, зарегистрированных в указанной области. Из рисунка следует, что здесь сформировалась довольно крупная кольцевая структура, ориентированная в субширотном направлении ($L \sim 120 \text{ км}$).

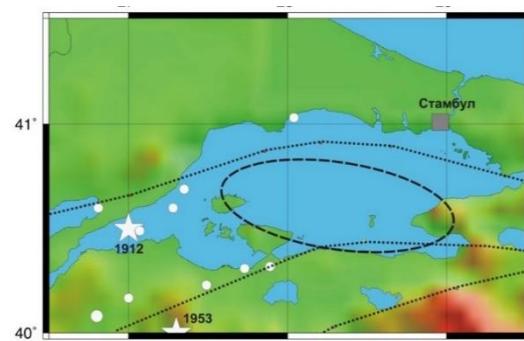


○ – $M=4,3\text{--}4,9$. Другие обозначения – на рисунках 1 и 2-а

а) неглубокая сейсмичность



б) зависимость $M(T)$ для кольцевой структуры



$M=3,1\text{--}3,7$. Другие обозначения – на рисунках 1 и 5-а

в) глубокая сейсмичность

Рисунок 5. Элементы сейсмичности в области Мраморного моря с 01.01.1973 по 01.06.2018 гг.

К югу от нее расположена очаговая зона сильного землетрясения 1953 г. ($M_w=7,2$), а к западу – зона очага землетрясения 1912 г. ($M_w=7,6$). К востоку от структуры лежит очаговая зона сильнейшего землетрясения 1999 г. ($M_w=7,6$, см. рисунок 1). Структура образовалась в 1978–2017 гг. (рисунок 5-б), наибольшая магнитуда в ее области соответствует событию 1988 г. ($M=5,3$). График $M(T)$ имеет ярко выраженную U-образную форму; после эпизода относительного затишья в 1989–2005 гг. наблюдалась резкая активизация сейсмичности в 2006–2017 гг.

На рисунке 5-в представлены элементы сейсмичности на глубинах 34–70 км. Здесь намечаются две

полосы эпицентров, вытянутых в северо-восточном (на севере) и восток-северо-восточном направлениях. Северная полоса ($M=3,5-3,7$), менее четко выраженная из-за большого пробела между эпицентрами на северо-востоке, проходит рядом с северо-западным краем кольцевой структуры, а южная ($M=3,1-3,6$) почти касается ее южной границы.

Оценка магнитуды землетрясения, которое может соответствовать кольцевой структуре в области Мраморного моря. В [7] получены корреляционные зависимости $L(Mw)$ и $Mn(Mw)$ для сильных землетрясений с различными механизмами очагов, произошедших во внутренних континентальных районах. На рисунках 6 и 7 представлены такие зависимости для механизмов типа сдвига и сброса (сбросо-сдвига), соответственно.

Для землетрясений с механизмами типа сдвига получены следующие зависимости (рисунки 6-а, б):

$$\lg L (\text{км}) = -1,12 + 0,49 Mw, r=0,94, \quad (1)$$

$$Mn = -0,17 + 0,64 Mw, r=0,67, \quad (2)$$

где r – коэффициент корреляции.

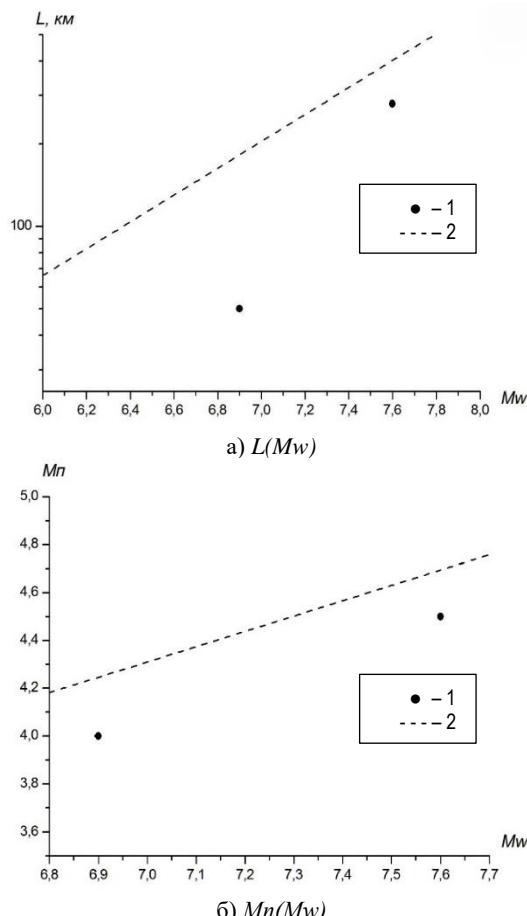


Рисунок 6. Величины $L(Mw)$, $Mn(Mw)$ для кольцевых структур на востоке Эгейского моря и в западной Турции (1), сформировавшихся перед землетрясениями с механизмами типа сдвига, по отношению к корреляционным зависимостям, полученным для внутренних континентальных районов (2)

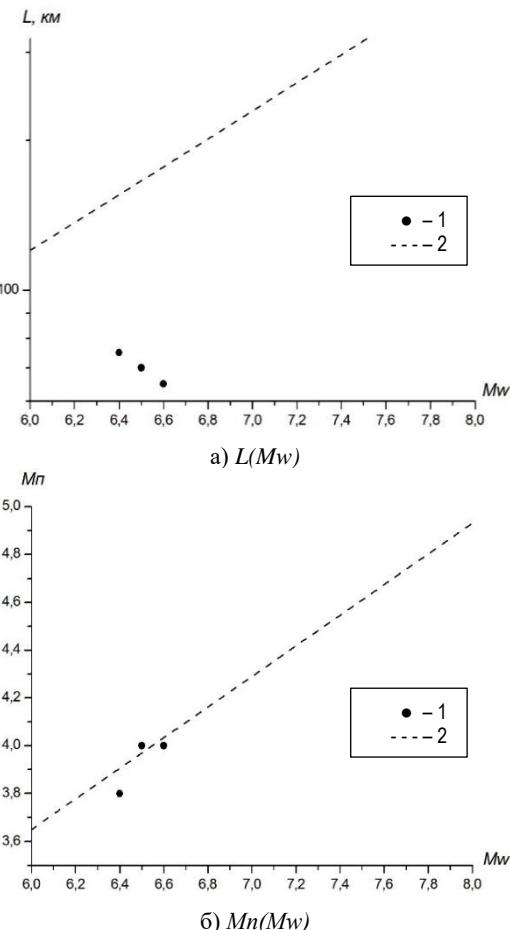


Рисунок 7. Величины $L(Mw)$ и $Mn(Mw)$ для кольцевых структур на востоке Эгейского моря и в западной Турции (1), сформировавшихся перед землетрясениями с механизмами типа сброса, по отношению к корреляционным зависимостям, полученным для внутренних континентальных районов (2)

Событиям с механизмами типа сброса соответствуют иные зависимости (рисунок 7-а, б):

$$\lg L (\text{км}) = 0,40 + 0,28 Mw, r=0,73, \quad (3)$$

$$Mn = -0,19 + 0,64 Mw, r=0,55. \quad (4)$$

Мы использовали эти зависимости для оценки магнитуды сильного землетрясения, которое может готовиться в области Мраморного моря. С этой целью рассмотрены данные о кольцевой сейсмичности, проявившейся перед пятью сильными землетрясениями с $Mw=6,4-7,6$, которые произошли в рассматриваемом районе (таблица 2). Из рисунков 6 и 7 следует, что величины Mn и особенно L для событий на востоке Эгейского моря и в западной Турции существенно занижены для данной Mw по сравнению со средними величинами, полученными для внутренних континентальных районов. Мы предположили, что наклоны графиков $\lg L(Mw)$ и $Mn(Mw)$ для рассматриваемого района отвечают зависимостям (1, 2) и (3, 4) для механизмов типа сдвига и сброса, соответственно, а уровни графиков смешены относительно них на

величины $C1=\text{const}$ и $C2=\text{const}$:

$$\lg L (\text{км}) = -1,12 + C1 + 0,49 Mw, \quad (5)$$

$$Mn = -0,17 + C2 + 0,64 Mw, \quad (6)$$

$$\lg L (\text{км}) = 0,40 + C1 + 0,28 Mw, \quad (7)$$

$$Mn = -0,19 + C2 + 0,64 Mw. \quad (8)$$

С использованием данных, полученных для пяти событий (таблица 2), найдены средние величины $C1$ и $C2$ (соответственно $-0,38 \pm 0,14$ и $-0,11 \pm 0,10$). Отметим, что среднее значение параметра $C1$ значительно выше аналогичной величины, полученной для района южной Калифорнии ($C1=-0,66$ [11]). По формулам (5) и (6) для данных значений $C1$ и $C2$ оценена средняя величина Mw , которая может соответствовать кольцевой структуре, представленной на рисунке 5-а: $Mw=7,3 \pm 0,1$ (для механизма типа сдвига, который должно иметь сильное землетрясение в зоне Северо-Анатолийского разлома). Существенно, что неучтенный только одного параметра $C1$ при использовании выражения (5) может привести к весьма большой погрешности в оценке магнитуды ($\sim 0,8$). Конечно, указанную величину Mw следует рассматривать лишь в качестве первого приближения.

Обсуждение

Полученные данные свидетельствуют о том, что на востоке Эгейского моря и в западной Турции, также, как и во многих внутренних континентальных районах [3, 6, 7, 13], а также в зонах субдукции [1, 2, 4, 5, 8, 10, 14] перед сильными землетрясениями формируются неглубокие кольцевые структуры сейсмичности. В указанных работах отмечено, что образование кольцевых структур связано с процессами самоорганизации геологических систем [20], проявляющимися в миграции глубинных флюидов в земной коре и верхах мантии. Вследствие малой плотности флюидов эти процессы в конечном счете ведут к уменьшению потенциальной энергии Земли.

В рассматриваемом районе, как и в некоторых других континентальных районах, а также в зонах субдукции [10, 13] помимо неглубоких колец формируются также глубокие полосы сейсмичности (на глубинах 34–70 км). В [10, 13] показано, что эпицентры большинства сильных и сильнейших землетрясений в таких районах находятся вблизи областей пересечения или наибольшего сближения мелких колец и глубоких полос. Имеющиеся данные свидетельствуют о том, что на границах мелких колец происходит подъем глубинных флюидов [3]. Есть большие основания полагать, что в зонах глубоких полос сейсмичности происходят аналогичные процессы, которые связаны, в первую очередь, с дегидратацией пород нижней коры и верхов мантии на глубинах более 30 км [21–23]. Существенно, что при дегидратации выделяется свободная вода, которая служит одним из главных компонентов флюидов. Кроме того, при этом происходит охрупчивание дегидратированных пород, которое может приводить к генерации относи-

тельно сильных землетрясений. Глубокофокусные события, связанные с дегидратацией, облегчают подъем флюидов. В этом случае в областях пересечения или наибольшего сближения мелких колец и глубоких полос сейсмичности достигается наибольшая мощность двухфазного слоя с присутствием заметной доли флюидов. Важно отметить, что при формировании связной сети флюидов на кровле такого слоя наблюдается концентрация напряжений, причем уровень избыточных напряжений пропорционален мощности слоя [24, 25]. Вероятность образования двухфазного слоя достаточно большой мощности возрастает при наличии глубокой полосы сейсмичности. Концентрация напряжений и может инициировать подвижку при сильном землетрясении [2–5, 7–9, 11, 12, 14].

В [7, 14] выдвинута гипотеза о пропорциональности энергии сильных землетрясений в межплитных областях потенциальной энергии флюидов, высвобождаемой при подготовке и реализации таких событий. Приведенные выше данные свидетельствуют о том, что величины $L(Mw)$ для колец сейсмичности на востоке Эгейского моря и в западной Турции существенно занижены относительно большинства внутренних континентальных районов. Это может свидетельствовать о сравнительно высоком удельном содержании флюидов в земной коре рассматриваемого района, что компенсирует уменьшение размеров кольцевых структур. Ранее такой же вывод сделан в [11] для района южной Калифорнии. Отметим, что в обоих случаях кольцевые структуры находятся вблизи границ областей с континентальным и океаническим типами земной коры. Таким образом, существует тенденция к увеличению значений $L(Mw)$ при переходе от границ континентов к внутренним районам, что должно соответствовать уменьшению содержания флюидов в литеосфере. Отметим, что это заключение согласуется с закономерным уменьшением поглощения короткопериодных S -волн от зон субдукции к центральным районам континентов [26].

Особый интерес представляют данные о кольцевой структуре в области Мраморного моря, где достаточно давно не было сильных землетрясений. Из приведенных выше оценок следует, что в области к югу от мегаполиса Стамбул, возможно, готовится землетрясение с $Mw > 7,0$. Такое событие может привести к человеческим жертвам и большим разрушениям на территории с очень высокой плотностью населения. Судя по имеющимся данным, эпицентр такого землетрясения может находиться около одной из областей, где полосы глубокофокусной сейсмичности ближе всего подходят к кольцевой структуре (рисунок 5-в). При этом более вероятным представляется положение будущего эпицентра на севере, ближе к зоне высокой скорости накопления деформаций, выделенной по данным GPS, которая находится около северо-восточной границы кольцевой структуры [18]. Исходя из данных, полученных в [17], можно

ожидать, что очаг готовящегося землетрясения с максимальным размером $L_0 \sim 100$ км будет находиться в области между указанными выше долготами ($27,6^\circ$ E и $28,8^\circ$ E), ограничивающими зону относительного сейсмического затишья, выделяемую после 1766 г.

Ранее [27] была получена корреляционная зависимость размеров очагов сильных землетрясений (L_0) с механизмами типа сдвига от магнитуды:

$$\lg L_0 (\text{км}) = 0,62 M - 2,65. \quad (9)$$

По формуле (9) для $L_0=100$ км получаем соответствующую данному размеру максимальную магнитуду готовящегося землетрясения ($M_{\max}=7,5$), что хорошо согласуется с оценкой, полученной по параметрам кольца сейсмичности. Отметим, что во многих случаях наблюдается резкое увеличение скорости СТД в областях кольцевых структур за периоды вре-

мени не более 10–15 лет до сильных и сильнейших землетрясений, с которыми связано формирование этих структур [3, 8, 9, 11, 12], что видно также и на рисунках 2-б и 3-б. В связи с этим существует большая вероятность реализации в ближайшие несколько лет сильного землетрясения в области кольца сейсмичности, где в 2006–2017 гг. произошло 8 событий с $M=4,3$ – $5,1$. Это позволяет значительно уменьшить длительность временного интервала, в котором следует ожидать сильное сейсмическое событие по сравнению с оценками, полученными чисто статистическими методами и основанными на величине среднего периода повторяемости землетрясений с $M \sim >7$ в данном районе [17]. По нашему мнению, здесь необходимо активизировать геофизические и геохимические исследования с целью возможного среднесрочного прогноза сильного землетрясения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копничев, Ю.Ф. Кольцевая сейсмичность в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в зонах субдукции / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН. – 2009. – Т. 425, № 4. – С. 539–542.
2. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН. – 2009. – Т. 429, № 1. – С. 106–109.
3. Копничев, Ю.Ф. О корреляции характеристик сейсмичности и поля поглощения S-волн в районах кольцевых структур, формирующихся перед сильными землетрясениями / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вулканология и сейсмология. – 2010. – № 6. – С. 34–51.
4. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности и землетрясение 11.03.2011 г. ($M_w=9.0$) в районе северо-восточной Японии / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Докл. РАН. – 2011. – Т. 440, № 2. – С. 246–249.
5. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения короткопериодных S-волн в районе очага землетрясения Мауле (Чили, 27.02.2010, $M_w=8.8$) и их связь с сейсмичностью и вулканизмом / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические исследования. – 2011. – Т. 12, № 3. – С. 22–33.
6. Копничев, Ю.Ф. Неоднородности поля поглощения S-волн и кольцевые структуры сейсмичности в районе Байкальской рифтовой зоны / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК. – 2012. – Вып. 4. – С. 33–41.
7. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности, формирующиеся в континентальных районах перед сильными землетрясениями с различными механизмами очагов / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические исследования. – 2013. – Т. 14, № 1. – С. 5–15.
8. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в районе северного Чили и успешный прогноз места и магнитуды землетрясения Икике 01.04.2014 г. ($M_w=8.2$) / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК. – 2015. – Вып. 4. – С. 153–159.
9. Копничев, Ю.Ф. Аномалии высокого поглощения S-волн и кольцевые структуры сейсмичности в литосфере Алтая; возможная подготовка сильных землетрясений / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические процессы и биосфера. – 2016. – № 1. – С. 68–83.
10. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в районе южной Мексики: возможная подготовка сильного землетрясения / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник НЯЦ РК. – 2016. – Вып. 4. – С. 24–29.
11. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в районе южной Калифорнии: возможная подготовка сильного землетрясения в окрестностях Лос-Анжелеса / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические процессы и биосфера. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 42–54.
12. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности в зоне субдукции Каскадия: возможная подготовка сильных землетрясений / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические процессы и биосфера. – 2017. – Т. 16, № 4. – С. 92–102.
13. Копничев, Ю.Ф. Характеристики кольцевой сейсмичности в районе северной Греции: возможная подготовка сильных землетрясений / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Вестник КазНИИСА. – 2017. – № 4(68). – С. 31–46.
14. Копничев, Ю.Ф. Кольцевые структуры сейсмичности, формирующиеся перед сильными и сильнейшими землетрясениями на западе и востоке Тихого океана / Ю.Ф. Копничев, И.Н. Соколова // Геофизические процессы и биосфера. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 109–124.
15. Соболев, Г.А. Основы прогноза землетрясений / Г.А. Соболев. – М.: Наука. – 1993. – 313 с.
16. Le Pichon, X. The North Anatolian Fault in the Sea of Marmara / X. Le Pichon, N. Rangin, C. Chamot-Rooke, A. Sengör // J. Geophys. Res. – 2003. – V. 108(B4). – doi:10.1029/2002JB001862.
17. Parsons, T. Recalculated probability of M 7 earthquakes beneath the Sea of Marmara, Turkey / T. Parsons // J. Geophys. Res. – 2004. – V. 109. – B05304. doi:10.1029/2003JB002667.
18. Ergintav, S. Istanbul's earthquake hot spots: geodetic constraints on strain accumulation along faults in the Marmara seismic gap / S. Ergintav, R. Reilinger, R. Çakmak, M. Floyd, Z. Cakir, U. Doğan, R. King, S. McClusky, H. Özener // Geophys. Res. Lett. – 2014. – doi: 10.1002/2014GL060985.