

УДК 550.34

Ю.Ф. Копничев¹, И.Н. Соколова²¹ Институт физики Земли РАН, г. Москва, Россия² ФИЦ Единая геофизическая служба РАН, г. Обнинск, Россия

КОЛЬЦЕВАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ В ОБЛАСТИ МРАМОРНОГО МОРЯ: ВОЗМОЖНАЯ ПОДГОТОВКА СИЛЬНОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ К ЮГУ ОТ СТАМБУЛА

Аннотация. Рассматриваются некоторые характеристики сейсмичности в районе западной Турции. Использована методика, основанная на выделении кольцевых структур сейсмичности. Определены неглубокие кольцевые структуры в районе Мраморного моря, где не было землетрясений с $M_w \geq 7.0$ по крайней мере с 1900 г. 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: $M_w = 6.7 \pm 0.3$. Формирование кольцевых структур связывается с процессами самоорганизации геологических систем, в результате которых осуществляется миграция глубинных флюидов.

Ключевые слова: сейсмичность, кольцевые структуры, глубинные флюиды, прогноз землетрясений.

МРАМОР ДЕҢИЗ АЙМАГЫНДАГЫ СЕЙСМИКАЛЫК ШАКЕКЧЕ: СТАМБУЛДУН ТҮШТҮГҮНДӨГҮ КҮЧТҮҮ ЖЕР ТИТИРӨӨГӨ МҮМКҮН БОЛГОН ДАЯРДАЛЫШЫ

Кыскача мазмуну. Батыш Түркия аймагындагы сейсмикалык мүнөздөмөлөр изилденет. Сейсмикалык шакекче түзүлүштөрүн аныктоого негизделген методология колдонулат. Мрамор деңизинин аймагында тайыз шакекче түзүлүштөрү аныкталган, ал жерде 1900-жылдан бери $M_w \geq 7.0$ болгон жер титирөөлөр болгон эмес. Мурда алынган корреляциялардын негизинде, жылыш механизмдери бар континент ичиндеги жер титирөөлөр үчүн сейсмикалык шакекче параметрлери менен негизги окуялардын энергиясынын ортосундагы корреляциялардын негизинде, шакекче түзүлүшүнүн аймагында өнүгүп жаткан күчтүү окуянын чоңдугу $M_w = 6.7 \pm 0.3$ деп бааланат. Шакекче түзүлүштөрүнүн пайда болушу геологиялык системалардагы өзүн-өзү уюштуруу процесстери менен байланыштуу, бул терең суюктуктардын миграциясына алып келет.

Негизги сөздөр: сейсмикалык, шакекче түзүлүштөрү, терең суюктуктар, жер титирөөнү алдын ала айтуу

RING-SHAPED SEISMICITY IN THE AREA OF MARMARA SEA: POSSIBLE PREPARATION FOR LARGE EARTHQUAKE TO THE SOUTH OF ISTANBUL CITY

Abstract. We have been studying some seismicity characteristics in the region of western Turkey. A method based on the ring-shaped seismicity structures apportionment was used. Shallow ring-shaped seismicity structures were picked out in the area of Marmara sea, where no earthquakes with $M_w \sim > 7.0$ were recorded since at least 1900. Earlier we obtained correlation dependences of seismicity ring parameters on the energy of main events with mechanisms of strike-slip type. Using these dependences, we estimated magnitude of the large event, which can be prepared in the area of the ring structure: $M_w = 6.7 \pm 0.3$. Ring-shaped structures formation is supposed to be connected with processes of geological system self-organization, which leading to deep-seated fluids migration.

Keywords: seismicity, ring-shaped structures, deep-seated fluids, earthquake prediction

Введение. За последние 15-20-летние исследования авторами было показано, что перед многими сильными землетрясениями, как правило, в течение нескольких десятилетий формируются кольцевые структуры (кольца) сейсмичности, оконтуривающие области относительного сейсмического затишья [1-12]. В отличие от ранних работ китайских и японских авторов, упомянутых в монографии Г.А. Соболева [13], при выделении таких структур мы отбирали события с магнитудами $M \geq M_p$, где M_p – пороговые значения, которые закономерно растут с увеличением энергии главных землетрясений. Это позволило для ряда зон субдукции получить корреляционные зависимости $L(M_w)$ и $M_p(M_w)$, где L – длины больших осей колец сейсмичности, M_w – магнитуды соответствующих им сильных событий [1, 9]. Аналогичные зависимости получены также для сильных землетрясений с различными механизмами очагов во внутриконтинентальных районах [5]. Использование этих данных позволяет прогнозировать места и магнитуды готовящихся сильных событий по характеристикам кольцевых структур [1, 5, 8-10].

В настоящей работе такие исследования проводятся для района, включающего Мраморное море и его близкие окрестности. Следует отметить, что этот район с высокоразвитой промышленностью включает мегаполис Стамбул с многомиллионным населением. Предварительные результаты исследований были опубликованы в работе [10].

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 Евразийской и Анатолийской плитами. Разломная зона длиной около 1500 км простирается в субширотном направлении от восточной Турции через север страны до Эгейского моря, при этом её северная ветвь проходит через Мраморное море всего лишь в 20 км к югу от Стамбула (рисунок 1). На севере Эгейского моря разломная зона поворачивает на юго-запад. Анатолийская плита смещается относительно Евразийской на запад со средней скоростью около 25 мм/год [14-17].

Из рисунка 1 следует, что в области Мраморного моря выделяется сейсмическая брешь, в которой более 100 лет не было землетрясений с $M_w \geq 7.0$. Более детальный анализ, проведённый в работе [15], показывает, что после 1766 г. очаговые зоны сильных землетрясений с $M \geq 7.0$ располагались в областях к западу от 27.6° Е и к востоку от 28.8° 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 [14-16].

Таблица 1- Сильные землетрясения в области Мраморного моря и его близких окрестностях.

Дата	φ° N	λ° E	M_w	h, км
09.08.1912	40.50	27.00	7.6	-
18.03.1953	40.00	27.30	7.2	-
26.05.1957	40.67	31.04	7.2	17
22.07.1967	40.63	30.74	7.4	4
17.08.1999	40.75	29.94	7.6	17
12.11.1999	40.78	31.23	7.2	5

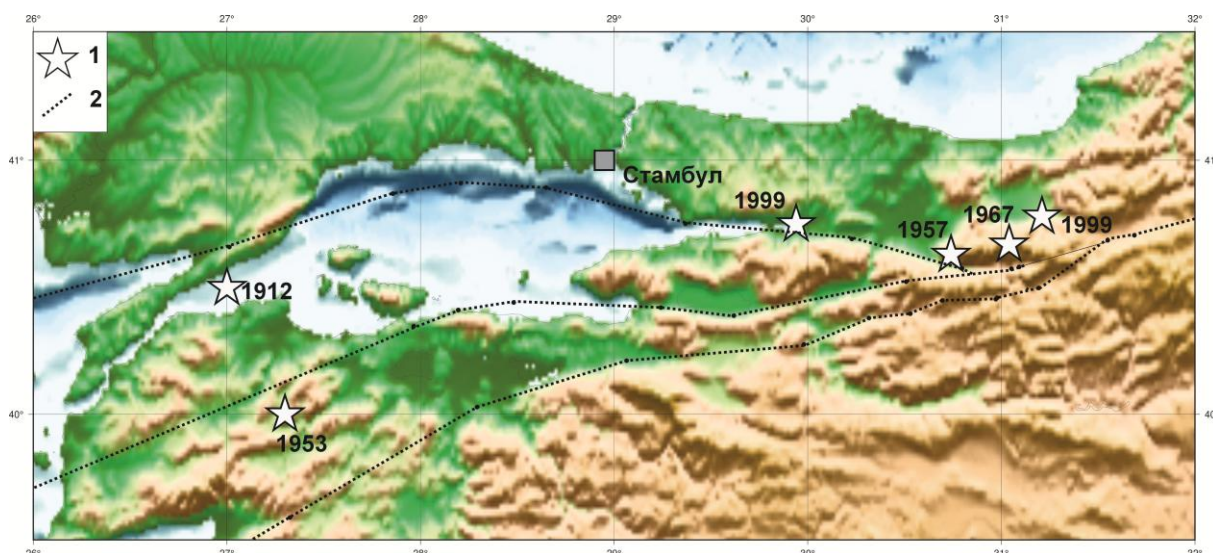


Рисунок 1. Карта района исследований: 1- эпицентры землетрясений с $M \geq 7.0$, начиная с 1900 г. (указаны годы этих событий). 2 – Северо-Анатолийский разлом.

Использованные данные и методика исследований

Использовались каталоги NEIC (National Earthquake Information Center) Геологической службы США (USGS - United States Geological Survey), начиная с 1973 г. С этого времени точность определения координат эпицентров землетрясений существенно улучшилась в связи с началом работы всемирной сети станций WWSSN. Методика выделения кольцевых структур подробно описана авторами ранее [5, 9]. Здесь мы только заметим, что рассматриваются события в диапазоне глубин 0-33 км; при этом нами вводится понятие порогового значения магнитуды M_p , с помощью которого отфильтровываются сравнительно слабые события. Кроме того, кольцевые структуры характеризуются длинами больших осей (L). Было показано, что параметры M_p и L закономерно растут с магнитудой главных землетрясений M_w , перед которыми формируются кольцевые структуры [5, 9].

Анализ данных

На рисунке 2 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 запад-северо-западном направлении ($L \sim 120$ км). 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. ($M_w=7.6$ (рисунок 1)). Структура образовалась в 1978-2017 гг. (рисунок 3) и наибольшая магнитуда в её 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.

Рассмотрим теперь, как изменились характеристики сейсмичности в рассматриваемом районе после 2017 г. Из рисунка 4 следует, что здесь сформировалась более чётко выраженная кольцевая структура ($M_p=4.3$, $L \sim 100$ км), ориентированная в широтном направлении. Большую роль в формировании структуры сыграло достаточно сильное землетрясение 23.04.2025 г. ($M=6.2$) со своими афтершоками. Рисунок 5 показывает, что энергия событий, формирующих кольцевую структуру, существенно уменьшалась с 1988 по 2018 гг. и резко выросла с 2019 по 2025 гг. Сопоставление

рисунков 2 и 4, а также 3 и 5 показывает, что к 2025 г. резко выросла энергия событий, формирующих кольцевую структуру.

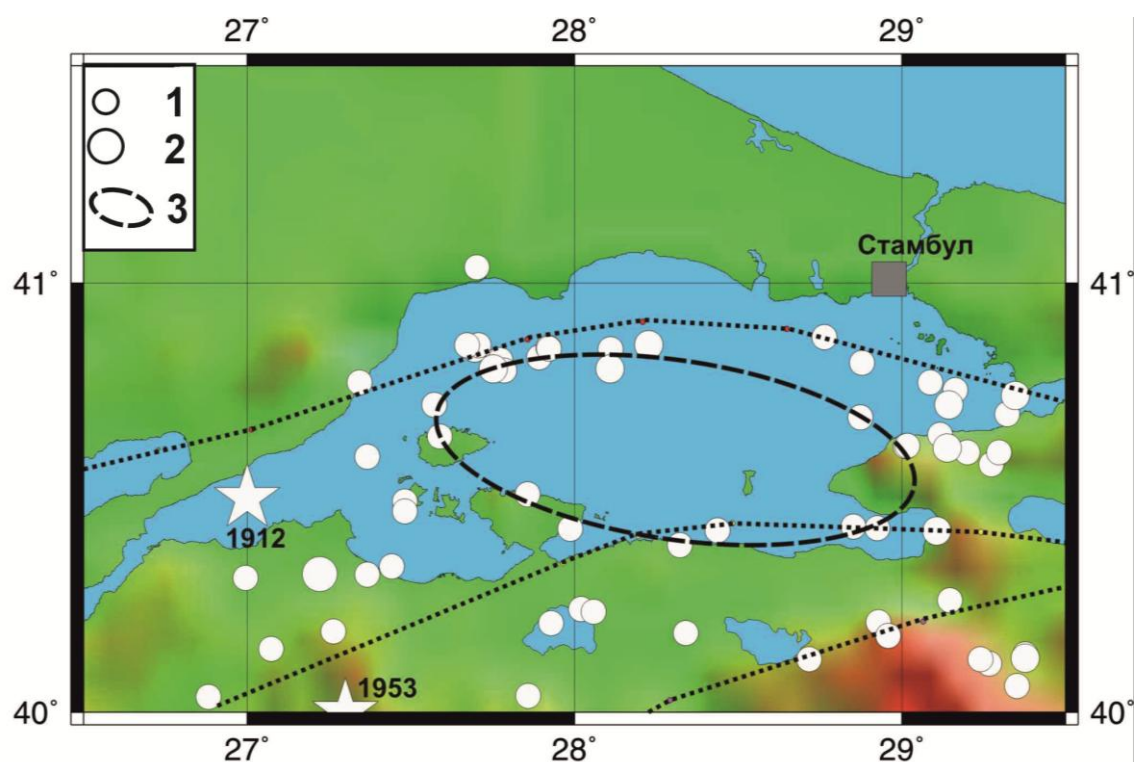


Рисунок 2. Элементы неглубокой сейсмичности в области Мраморного моря (с 01.01.1973 по 01.06.2018 гг., $h=0-33$ км). Магнитуды событий: 1- $M = 4.3-4.9$, 2 – $M=5.0-5.9$, 3 – неглубокая кольцевая структура. Остальные обозначения представлены на рисунке 1.

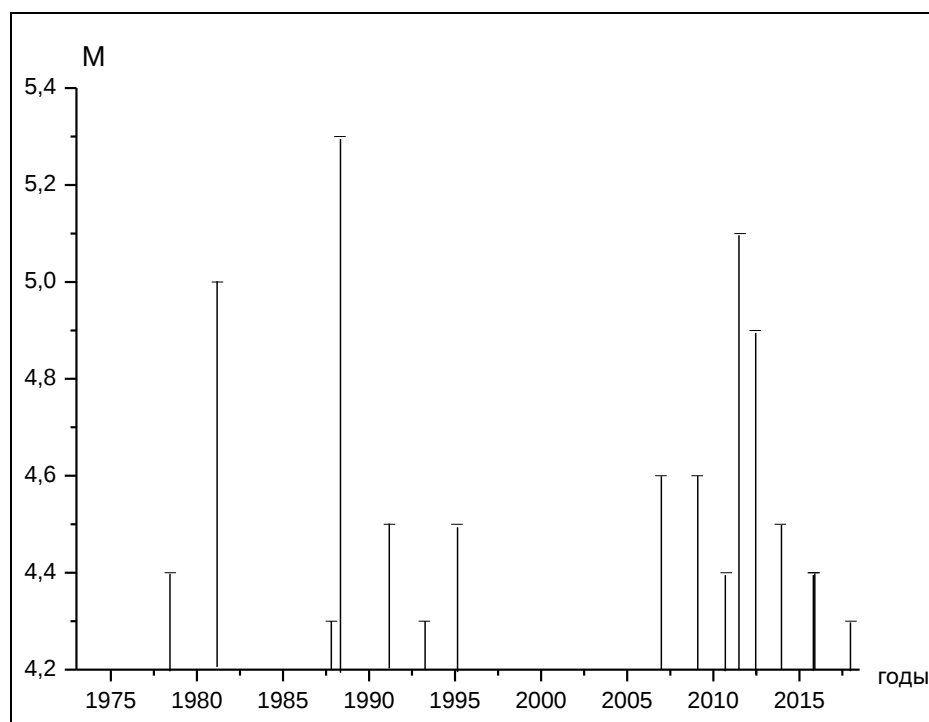


Рисунок 3. Зависимость $M(T)$ для кольцевой структуры, представленной на рисунке 2.

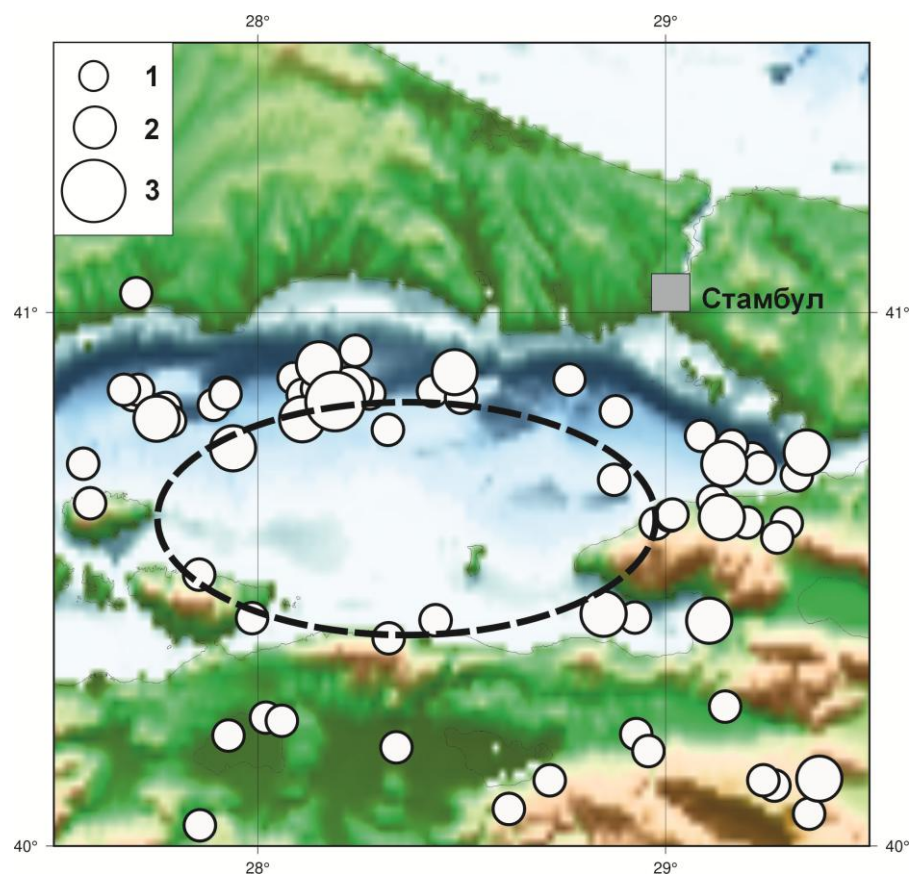


Рисунок 4. Кольцевая структура сейсмичности, сформировавшаяся до 01.11.2025 г. Магнитуды событий: 1 – $M = 4.3 - 4.9$, 2 – $5.0 - 5.9$, 3 – $M = 6.0 - 6.9$. Остальные обозначения представлены на рисунках 1 и 2.

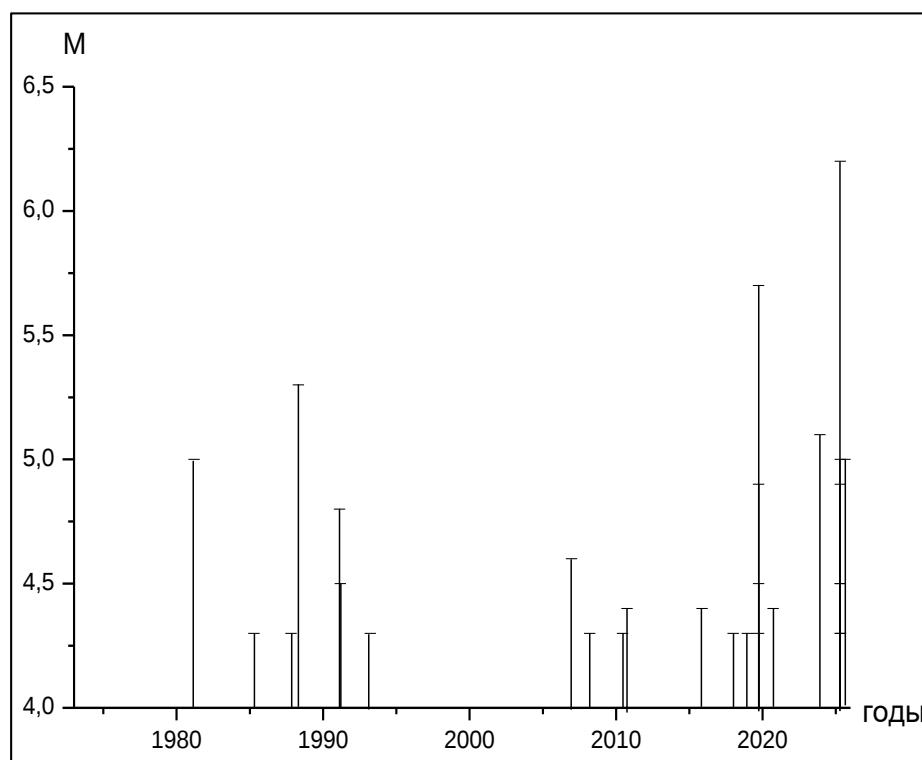


Рисунок 5. Зависимость $M(T)$ для кольцевой структуры, представленной на рисунке 4.

Оценка магнитуды землетрясения, которое может соответствовать кольцевой структуре в области Мраморного моря. В работе [5] получены корреляционные зависимости $L(M_w)$ и $M_p(M_w)$ для сильных землетрясений с различными механизмами очагов, произошедших во внутриконтинентальных районах. Для землетрясений с механизмами типа сдвига, которые доминируют в рассматриваемом районе, получены следующие зависимости:

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

$$M_p = -0.17 + 0.64 M_w, r=0.67, \quad (2)$$

где r - коэффициент корреляции.

Мы использовали эти зависимости для оценки магнитуды сильного землетрясения, которое может готовиться в области Мраморного моря. Подставляя полученные выше величины L и M_p (рисунок 4), находим: $M_w(L) \sim 6.4$, $M_w(M_p) \sim 7.0$, а в среднем $M_w = 6.7 \pm 0.3$. Таким образом, исходя из параметров кольцевой структуры, представленной на рисунке 4, можно заключить, что в области Мраморного моря может готовиться достаточно сильное землетрясение.

Обсуждение

Полученные ранее данные свидетельствуют о том, что на востоке Эгейского моря и в западной Турции, так же, как и во многих внутриконтинентальных районах [4, 5, 7, 8, 10], а также в зонах субдукции [1-3, 6, 9, 11] перед сильными землетрясениями формируются неглубокие кольцевые структуры сейсмичности. В указанных работах отмечено, что образование кольцевых структур связано с процессами самоорганизации геологических систем [18], проявляющимися в миграции глубинных флюидов в земной коре и верхах мантии. Вследствие малой плотности флюидов эти процессы в конечном счёте ведут к уменьшению потенциальной энергии Земли. Важно отметить, что при формировании связанной сети флюидов на кровле слоя двухфазного материала наблюдается концентрация напряжений, причём уровень избыточных напряжений пропорционален мощности слоя [19, 20]. Концентрация напряжений и может инициировать подвижку при сильном землетрясении [5, 9].

В работах [5, 9] выдвинута гипотеза о пропорциональности энергии сильных землетрясений в межплитных областях потенциальной энергии флюидов, высвобождаемой при подготовке и реализации таких событий. Приведённые выше, а также в работе [10] данные свидетельствуют о том, что величины $L(M_w)$ для колец сейсмичности на востоке Эгейского моря и в западной Турции существенно занижены относительно большинства внутриконтинентальных 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 работе [8] 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 $L(M_w)$ при переходе от границ континентов к внутриконтинентальным районам, что должно соответствовать уменьшению содержания флюидов в литосфере. Отметим, что это заключение согласуется с закономерным уменьшением поглощения короткопериодных S -волн от зон субдукции к центральным районам континентов [21].

Особый интерес представляют данные о кольцевой структуре в области Мраморного моря, где достаточно давно не было сильных землетрясений. **Из приведённых выше оценок следует, что в области к югу от мегаполиса Стамбул, возможно, готовится землетрясение с $M_w \sim 7$. Такое событие может привести к человеческим жертвам и**

большим разрушениям на территории с очень высокой плотностью населения. При этом более вероятным выглядит положение будущего эпицентра на севере, поскольку здесь он будет располагаться ближе к зоне высокой скорости накопления деформаций, выделенной по данным GPS, которая находится около северо-восточной границы кольцевой структуры [14]. Исходя из данных, полученных в работе [14], можно ожидать, что очаг готовящегося землетрясения с максимальным размером $L_0 \sim 100$ км будет находиться в области между указанными выше долготами (27.6° Е и 28.8° Е), которые ограничивают зону относительного сейсмического затишья, выделяемую после 1766 г.

Отметим, что во многих случаях наблюдается резкое увеличение скорости сейсмотектонической деформации (СТД) в областях кольцевых структур за периоды времени не более 8-16 лет до сильных и сильнейших землетрясений, с которыми связано формирование этих структур [12]. В связи с этим, существует большая вероятность реализации в ближайшие несколько лет сильного землетрясения в области кольца сейсмичности, где в 2019-2025 гг. произошло 5 событий с $M=5.0 - 6.2$. Это позволяет значительно уменьшить длительность временного интервала, в котором следует ожидать в рассматриваемом районе 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 [15]. По нашему мнению, здесь необходимо активизировать геофизические и геохимические исследования с целью возможного среднесрочного прогноза сильного землетрясения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Характеристики кольцевой сейсмичности в разных диапазонах глубин перед сильными и сильнейшими землетрясениями в районе Суматры // Докл. РАН. 2009. Т. 429. № 1. С.106-109.
2. 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.
3. 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.
4. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Неоднородности поля поглощения S-волн и кольцевые структуры сейсмичности в районе Байкальской // Вестник НЯЦ РК. 2012. Вып. 4. С. 33 – 41.
5. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности, формирующиеся в континентальных районах перед сильными землетрясениями с различными механизмами очагов // Геофизические исследования, 2013. Т. 14, № 1. С. 5 – 15.
6. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности, сформировавшиеся в районе Аляски: оправдавшийся прогноз места и магнитуды Симеоновского землетрясения 22 июля 2020 г. ($M_w=7.8$) // Российский сейсмологический журнал. 2021. Т. 3, № 3. С. 50–60. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.03>
7. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Аномалии высокого поглощения S-волн и кольцевые структуры сейсмичности в литосфере Алтая; возможная подготовка сильных землетрясений // Геофизические процессы и биосфера. 2016. № 1. С. 68-83.
8. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности в районе южной Калифорнии: возможная подготовка сильного землетрясения в окрестностях Лос-Анжелеса // Геофизические процессы и биосфера. 2017. Т.16. №1. С.42-54.

9. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности, формирующиеся перед сильными и сильнейшими землетрясениями на западе и востоке Тихого океана // Геофизические процессы и биосфера. 2018. Т. 17. № 1. С. 109-124.
10. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевая сейсмичность на востоке Эгейского моря и в западной Турции: возможная подготовка сильного землетрясения к югу от Стамбула // Вестник НЯЦ РК. 2020. № 3. С. 142-149.
11. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Кольцевые структуры сейсмичности в районе Юго-Западной Аляски: оправдавшийся прогноз места и магнитуды Чигникского землетрясения 29.07.2021 г. (Mw=8.2) // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т.21. № 1. С. 80-91. DOI: 10.21455/GPB2022.1-5.
12. Копничев Ю.Ф., Соколова И.Н. Некоторые характеристики кольцевых структур сейсмичности, формирующихся перед сильными и сильнейшими землетрясениями // Российский сейсмологический журнал. 2025. Т. 7, № 2. С. 41–48. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2025.2.03>. – EDN: KGDQDE.
13. Соболев, Г.А. Основы прогноза землетрясений. // М.: Наука. 1993. 313 с.
14. Le Pichon X., Rangin N., Chamot-Rooke C., Sengör A. The North Anatolian Fault in the Sea of Marmara // J. Geophys. Res. 2003. V. 108(B4). doi:10.1029/2002JB001862.
15. Parsons T. Recalculated probability of M 7 earthquakes beneath the Sea of Marmara, Turkey // J. Geophys. Res. 2004. V.109. B05304. doi:10.1029/2003JB002667.
16. Ergintav S., Reilinger R., Çakmak R., Floyd M., Cakir Z., Doğan U., King R., McClusky S., Özener H. Istanbul's earthquake hot spots: geodetic constraints on strain accumulation along faults in the Marmara seismic gap / // Geophys. Res. Lett. 2014. doi: 10.1002/2014GL060985.
17. Sengör A., Tuys O., Imren C., Sakıncı M., Eyidogan H., Gor N., Le Pichon X., Rangin C. The North Anatolian fault: a new look // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2005. P. 37–112. doi: 10.1146/annurev.earth.32.101802.120415 2004.
18. Летников Ф.А. Синергетика геологических систем. // Новосибирск: Наука. 1992. 229 с.
19. Каракин А.В., Лобковский Л.И. Гидродинамика и структура двухфазной астеносферы // ДАН СССР. 1982. Т.268. № 2. С.324-329.
20. Gold T., Soter S. Fluid ascent through the solid lithosphere and its relation to earthquakes / T. Gold, // Pure Appl. Geophys. 1984/1985. V. 122. P. 492-530.
21. Щукин Ю.К., Рябой В.З., ред. Глубинное строение слабосейсмичных регионов СССР // М.: Наука. 1987. 238 с.

Рецензент: к. ф.-м.н. Фролова А.Г.