Особенности механизмов очага сильнейших землетрясений Средиземноморья

Е.В. Воронина^а

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра физики Земли. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Поступила в редакцию 25.06.2019, после доработки 26.11.2019, принята к публикации 10.12.2019.

Рассматриваются механизмы очага землетрясений Средиземноморского региона, не соответствующие модели очага в виде двойного диполя и описывающие сложное разрывообразование в области источника. Анализ проводится путем разложения наблюдаемого тензора сейсмического момента наиболее сильных землетрясений на составляющие в виде: изотропной части (ISO), двойного диполя (DC) и компенсированного линейного векторного диполя (CLVD). По наблюдениям за период 2000–2019 гг. в регионе произошло 121 землетрясение с магнитудой более 5.5, из них 57 событий не соответствуют модели двойного диполя. Для этих землетрясений были получены параметры CLVD и предложена физическая интерпретация результатов разложения тензора сейсмического момента. Подобный анализ проведен впервые. На основании полученых результатов были сделаны выводы об особенностях наблюдаемых процессов разрушения и строения среды в очаговых зонах.

Ключевые слова: тензор сейсмического момента, механизм очага землетрясения, динамическое вспарывание, компенсированный линейный векторный диполь. УДК: 550.347.2 PACS: 91.30. Рх

введение

Количественный анализ механизмов очагов землетрясений в настоящий момент преимущественно основан на представлениях, что источник соответствует силовой модели двойного диполя, излучение сейсмических волн обладает свойством квадрантного распределения полярности первого вступления, и в построениях механизмов очага имеет место ортогональная система плоскостей, разделяющих области сжатия и растяжения [1, 2]. Однако развитие сетей наблюдений и накопление все большего количества данных свидетельствует о том, что сейсмические источники обладают существенным разнообразием и часто вызваны силами, отличными от модели двойного диполя [3-9]. Развитие аналитических методов анализа таких событий является актуальной задачей как для детального изучения процесса разрушения в реальной среде, так и для уточнения характеристик самой среды вблизи очаговых зон.

1. ТЕКТОНИКА РЕГИОНА И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Средиземноморский регион является одним из наиболее сейсмически активных регионов Земли. Средиземное море — остаток древнего океана Тетис. Динамика региона определяется конвергенцией Африканской плиты на юге с Евразией. Давление Африки на Европу осуществляется в направлении на север со скоростью 4–10 мм/год вдоль сложной границы, проходящей по зонам субдукции: Эллинской дуге в восточной части и Калабрийской в центральной и западной частях Средиземноморья. Активной является и система трансформного Северо-Анатолийского разлома, определяющая сейсмичность Эгейского моря и западной Турции [10, 11].

В работе использовались данные наблюдений из Мирового каталога землетрясений американской геологической службы USGS [12]. Были собраны данные о землетрясениях с $M_W \ge 5.5$, произошедших в регионе с координатами: $30^\circ - 50^\circ$ с.ш., $-10^\circ - 40^\circ$ в.д. Всего за период 2000–2019 гг. в регионе произошло 121 событие, 57 из которых, по данным о механизмах очага, не соответствовали модели двойного диполя. На рис. 1 приводятся эпицентры этих землетрясений. Распределение событий по магнитудам показано на рис. 2.

Анализ волновых форм первого вступления на сейсмограммах показывает, что волновая картина излучения этих землетрясений не в полной мере соответствует модели «двойного диполя», отвечающей подвижке по единственной плоскости разрыва [3].

2. РАЗЛОЖЕНИЕ ПОЛНОГО ТЕНЗОРА СЕЙСМИЧЕСКОГО МОМЕНТА

2.1. Типы сейсмических источников

Для интерпретации наблюдаемых волновых полей привлекается более сложная модель очага, отличающаяся от общепринятой двойной пары сил без момента и получившая название non-DC источника («недвойной диполь» — non double couple) [6]. Для уяснения механизмов non-DC источников используются представления о сложном характере разрывообразования в очагах отдельных землетрясений, при которых разрушения реализуются по двум или более направлениям, не параллельным друг другу [13–15]. При этом возникает усложненный характер подвижек в очаге, когда скольжение происходит не по одной плоскости разрыва, а по нескольким плоскостям практически одновременно [16].

Тензор сейсмического момента описывает эквивалентные силы, действующие на сейсмический источник, и является базовой величиной, оцениваемой для землетрясений всех масштабов: от микроземлетрясений в образцах горных пород, изучаемых по данным об акустической эмиссии [15, 17], до крупных разрушительных землетрясений [6]. Чтобы определить, какой тип сейсмического источника

^{*a*} E-mail: voronina@physics.msu.ru



Рис. 1. Эпицентры исследуемых землетрясений. Желтым цветом показаны землетрясения с $5.5 \leqslant M_W \leqslant 5.9$; оранжевым $-6.0 \leqslant M_W \leqslant 6.4$; красным $-M_W \geqslant 6.5$



Рис. 2. Число всех землетрясений (синий) и землетрясений, не соответствующих модели двойного диполя (красный)

физически представлен найденным тензором сейсмического момента, предложено разложить данный тензор на три элементарные части: изотропную (ISO), двойной диполь (DC) и компенсированный линейный векторный диполь (CLVD) [8]. Подобное разложение тензора сейсмического момента является инструментом для классификации и физической интерпретации сейсмических источников [16, 18]. Интерпретация разложения полного тензора сейсмического момента представлена на рис. 3.

Изотропная составляющая тензора сейсмического момента (ISO) играет существенную роль в вулканических землетрясениях, в областях гидротермальных источников и фазовых переходов глубокофокусных землетрясений, при взрывах [5–7]. В исследуемом регионе, по проведенным результатам разложения тензора сейсмического момента, ISO-компонента почти во всех случаях оказалась равной нулю. Поэтому основное внимание уделено девиатору тензора, представляющего собой сумму (DC)+(CLVD) компонент и (CLVD) составляющей как наименее изученной.

Первоначально механизм компенсированного линейного векторного диполя (CLVD) был использован для описания процессов в очагах глубокофокусных землетрясений [8]. Причиной возникновения данного механизма являлись различного рода фазовые пре-



Рис. 3. а — Системы эквивалентных сил в координатах главных осей; б — функция направленности излучения Р волн; в — механизмы очага землетрясений для изотропного источника, двойного диполя и компенсированного линейного векторного диполя [5]

вращения вещества в мантии. Для поверхностных землетрясений механизм CLVD компенсированного линейного векторного диполя может быть объяснен влиянием флюидов [7, 15, 19, 20], а также анизотропией среды [15]. Проникновение жидкости в трещины под большим давлением приводит к раскрытию последних и последующему сдвигу с поворотом площадки разрыва [15].

2.2. Метод разложения тензора сейсмического момента

Возможны различные методы разложения тензора сейсмического момента на составляющие [3, 5, 8, 18, 20] и др. В работе применяется разложение, предложенное [18–20]. Тензор сейсмического момента может быть представлен в виде:

$$\mathbf{M}_{ij} = \mathbf{M}_{\text{ISO}} + \mathbf{M}_{\text{DC}} + \mathbf{M}_{\text{CLVD}} =$$

= $M_1 \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1 + M_2 \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_2 + M_3 \mathbf{e}_3 \mathbf{e}_3, \quad (1)$

где
$$\mathbf{M}_{ij} = egin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix}, \ M_1 \geqslant M_2 \geqslant M_3 \quad -$$

собственные значения тензора, \mathbf{M}_{ij} — полный тензор сейсмического момента (i, j = 1, 2, 3), $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3$ векторы ориентации оси растяжения T, промежуточной оси N и оси сжатия P в механизме очага. \mathbf{M}_{ISO} , \mathbf{M}_{DC} , \mathbf{M}_{CLVD} — значения тензора сейсмического момента для изотропного источника для двойного диполя и для компенсированного линейного векторного диполя соответственно.

Значения $\mathbf{M}_{ISO}, \ \mathbf{M}_{DC}, \ \mathbf{M}_{CLVD}$ определяются как [18]

$$\mathbf{M}_{\rm ISO} = \frac{1}{3} \left(M_1 + M_2 + M_3 \right), \tag{2}$$

$$\mathbf{M}_{\text{CLVD}} = \frac{2}{3} \left(M_1 + M_3 - 2M_2 \right), \tag{3}$$

$$\mathbf{M}_{\rm DC} = \frac{1}{2} \big(M_1 - M_3 - |M_1 + M_3 - 2M_2| \big).$$
(4)

На первом этапе разложения по формуле (1) изотропная составляющая $\mathbf{M}_{\rm ISO}$ извлекается из тензора главных значений сейсмического момента \mathbf{M}_{ij} и вычисляется след матрицы $tr(\mathbf{M}_{ij})$, который показывает изменение объема из-за взрыва или имплозии (2). Следуя [20], имеем

$$\begin{split} \mathbf{M} &= \mathbf{M}_{\text{ISO}} + \mathbf{M}_{\text{DEV}} = \\ &= \begin{bmatrix} \frac{1}{3} \operatorname{tr}(\mathbf{M}_{ij}) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3} \operatorname{tr}(\mathbf{M}_{ij}) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3} \operatorname{tr}(\mathbf{M}_{ij}) \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} M_1 - \frac{1}{3} \operatorname{tr}(\mathbf{M}_{ij}) & 0 & 0 \\ 0 & M_2 - \frac{1}{3} \operatorname{tr}(\mathbf{M}_{ij}) & 0 \\ 0 & 0 & M_3 - \frac{1}{3} \operatorname{tr}(\mathbf{M}_{ij}) \end{bmatrix}. \end{split}$$

Далее член \mathbf{M}_{DEV} , отвечающий за девиаторную часть тензора сейсмических моментов и определяющий тензор сдвига, раскладывается на двойной диполь \mathbf{M}_{DC} (4) и компенсированный линейный векторный диполь \mathbf{M}_{CLVD} (3):

$$\mathbf{M}_{ ext{DEV}} = egin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \ 0 & m_2 & 0 \ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{ ext{DC}} + \mathbf{M}_{ ext{CLVD}},$$

где $m_i = M_i - \frac{1}{3} \operatorname{tr} (\mathbf{M}_{ij}), i = 1, 2, 3$ — собственные значения тензора сдвига \mathbf{M}_{DEV} .

Следовательно, получаем

$$\begin{split} \mathbf{M}_{\mathrm{DEV}} &= m_3 \left(1-2F\right) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \\ &+ m_3 F \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}, \end{split}$$

где $F = \frac{m_1}{m_3}$

Первый член в этой формуле описывает двойной диполь (DC), второй — компенсированный линейный векторный диполь (CLVD) [5].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

3.1. Дополнительный параметр в механизмах очага сложных землетрясений

Классический механизм двойного диполя (DC) характеризуется тремя геометрическими параметрами: углом простирания φ , углом падения плоскости подвижки δ и углом ориентации сдвига в плоскости подвижки λ [1]. В механизме компенсированного линейного векторного диполя (CLVD) добавляется еще один геометрический параметр — угол α наклона площадки разрыва в процессе динамического вспарывания [13].

Определение угла наклона площадки разрыва α было одной из задач в данной работе. Согласно [5, 18]

s

$$\sin \alpha = \frac{M_1 + M_3 - 2M_2}{M_1 - M_3}.$$
(5)

Численно эта величина равна углу вида напряженного состояния среды, определяемого коэффициентом Лоде—Надаи. На рис. 4 приведены рассчитанные по формуле (5) изменения угла наклона площадки разрыва.

Отрицательные значения угла соответствуют очагам, расположенным в областях горизонтального сжатия, положительные — очагам в областях горизонтального растяжения (верхний рисунок). Незначительно преобладает число событий в областях сжатия, о чем свидетельствует и распределение событий по глубине (нижний рисунок). Причем на больших глубинах (200–250 км) оно становится преимущественным.

3.2. Пример изменения угла наклона площадки разрыва в процессе разрывообразования

Изменение угла наклона площадки разрыва в процессе динамического вспарывания можно проиллюстрировать, сравнив механизмы очага землетрясения



Рис. 4. Изменение угла наклона площадки разрыва в процессе динамического вспарывания



Рис. 5. а — Карта эпицентров землетрясения 25.10.2018 и его афтершоков, б — механизмы землетрясений во время основного события (слева) и афтершока (справа)

во время основного толчка и последовавшего за ним сильнейшего афтершока.

Рассмотрим событие 25 октября 2018 года $M_W = 6.8$ в западной части Греции с эпицентром в Ионическом море. Главный толчок произошел в 22 часа 54 минуты, крупнейший афтершок $M_W = 5.1$ был зарегистрирован 26 октября в 5 часов 48 минут. На рис. 5, *а*, *б* представлены карта эпицентров и механизмы очага [12]. Механизмы очага этих событий одинаковы и представляют собой взброс с элементами сдвига. Угол $\alpha = -10.8^{\circ}$, что свидетельствует о том, что очаг находится в области горизонтального сжатия. Поворот ориентации оси сжатия $P_{AZ} = 217^{\circ} - 228^{\circ} = -11^{\circ}$, что хорошо согласуется с расчетом.

3.3. Анализ режима нагружения в области очага землетрясения

Определение знака компоненты M_{CLVD} для каждого отобранного землетрясения, соответствует режиму нагружения среды в области очага или локальным областям горизонтального сжатия и растяжения [13, 21].

$$M_{\rm CLVD}^+$$
 при $(M_1 + M_3 - 2M_2) \ge 0$, (6)

$$M_{\text{CLVD}}^-$$
 при $(M_1 + M_3 - 2M_2) < 0.$ (7)

Посчитанные по формулам (6) и (7) значения составляющей компенсированного линейного векторного диполя приводятся на рис. 6 в виде распределения по значениям величины $M_{\rm CLVD}$.

Отрицательные значения $M_{\rm CLVD} < 0$ соответствуют областям сжатия при захлопывании трещин в процессе динамического вспарывания, положительные значения $M_{\rm CLVD} > 0$ соответствуют областям растяжения и раскрытия трещин.

3.4. Сравнение с результатами сейсмической томографии региона

Результаты анализа режима нагружения сравнивались с результатами новейшей сейсмической томографии литосферы центральной и южной Европы



Рис. 6. Гистограмма распределения событий в зависимости от величины M_{CLVD} . Красным цветом обозначены события в областях сжатия, синим — в областях растяжения

и Средиземноморья [21]. Новая трехмерная скоростная модель до глубин 150 км была получена по данным инверсии поперечных SV и поверхностных рэлеевских волн, зарегистрированных широкополосными сейсмическими станциями Европы и окружающих регионов [10, 21]. Высокоточные методы анализа позволили разделить отдельные тектонические структуры вблизи земной поверхности и выделить астеносферный слой в верхней мантии. С близостью астеносферного слоя к поверхности связывают как проявления вулканизма, так и сейсмическую активность.

На рис. 7 представлена томографическая карта поверхности исследуемого региона. Повышенные скорости сейсмических волн обозначены голубым тоном, пониженные — красным. Эпицентры землетрясений, соответствующие режимам нагружения среды, определены по составляющей компенсированного векторного диполя: красным — $M_{\rm CLVD} \leqslant 0$ (сжатие), синим — $M_{\rm CLVD} > 0$ (растяжение). Землетрясения в состоянии горизонтального сжатия расположены в основном в структурах Калабрийской и Эллинской зон субдукции, а состояние горизонтального растяжения наблюдается в северной части Эгейского моря, западной Турции и юго-западной части Эллинской дуги.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование механизмов очага наиболее сильных землетрясений Средиземноморского региона за последние 20 лет показало, что почти половина из них относится к событиям, отличающимся от модели двойного диполя. Количественный анализ проводился методом разложения полного тензора сейсмического момента на составляющие, представляющие собой изотропную часть (ISO), двойной диполь (DC) и компенсированный векторный линейный диполь (CLVD). Были определены параметры составляющей CLVD, соотношения между составляющими и проведена интерпретация полученных результатов.

Детальное исследование соотношений компонент полного тензора сейсмического момента позволяет определить изменение ориентации площадки разрыва в процессе динамического вспарывания и режим нагружения в очаговых зонах. Все результаты, полученные в данной работе для исследуемых землетрясений, новые.



Рис. 7. Карта томографии литосферы центральной части Европы и Средиземноморья по наблюдениям SV-и R-волн с очагами землетрясений, соответствующих различным режимам нагружения среды. Очаги землетрясений в областях горизонтального сжатия — красные круги, очаги в областях горизонтального растяжения — синие круги, треугольники — сейсмические станции, зеленые линии — границы тектонических структур

На основании полученных результатов можно сформулировать следующие выводы:

- Землетрясения, не соответствующие модели двойного диполя, наблюдаются во всем диапазоне наблюдений как по магнитудам, так и по глубинам.
- Механизм очага сложных землетрясений, в отличие от модели двойного диполя, определяется четырьмя угловыми параметрами: φ, δ, λ и α.
- 3. По параметрам девиатора тензора сейсмического момента было определено, что число землетрясений Средиземноморского региона, произошедших в областях доминирующего горизонтального сжатия, несколько больше, чем в областях растяжения, и с увеличением глубины число событий в режиме сжатия возрастает.
- Режим нагружения среды по модели компенсированного линейного векторного диполя согласуется с результатами сейсмической томографии литосферы Средиземноморского региона.

Изучение очагов землетрясений, не соответствующих модели двойного диполя, важно для более полного понимания физических явлений в областях гидротермальных источников, вулканической активности, при изучении глубокофокусных землетрясений и особенностей свойств горных пород в сейсмически активных регионах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология. М: МИР, 1983.
- Воронина Е. В. Механика очага землетрясения. Спецкурс. М.: Физический факультет МГУ, 2004.
- 3. Лутиков А.И., Юнга С. Л., Кучай М. С. // Геофизические исследования. 2010. **11**, № 3. С. 11.

- Лутиков А. И., Рогожин Е. А., Донцова Г. Ю., Кучай М. С. // Физика Земли. 2018. № 2. С. 45.
- Foulger G. R., Julian B. R. // Encyclopedia of Earthquake Engineering, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2015, P. 1.
- 6. *Frohlich C.* // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1995. **91**, N 4. P. 213.
- Julian B. R., Miller A. D., Foulger G. R. // Reviews of Geophysics. 1998. 36, N 4. P. 525.
- Randall M. J., Knopoff L. // J. Geophys. Res. 1970. 75. P. 4957.
- Yunga S., Lutikov A., Molchanov O. // Natural Hazards and Earth System Science, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union. 2005. 5, N 1. P. 11.
- Herman M. W., Hayes G. P., Smoczyk G. M. et al. // U.S. Geological Survey Open-File Report 2010–1083-Q, 2015. scale 1:10,000,000.
- 11. Pino et al. // Scientific Reports. 2019. 9, N 1. 2005.
- 12. https://earthquake.usgs.gov/search
- Vavryčuk V. // J. Geophys. Res. 2001. 106, N 16. P. 339.
- Vavryčuk V. // Geophysical Prospecting. 2007. 55, N 3. P. 381.
- 15. Vavryčuk V. // Tectonophysics. 2008. 456. P. 74.
- Vavryčuk V. // Journal of Seismology. 2015. 19, N 1. P. 231.
- 17. Stierle E. // Geowissenschaftlichen Fakultät der Freien Universität, Berlin. Berlin, 2015. P. 1.
- 18. Vavryuuk V. // J. Geophys. Res. 2011. 116. B12320.
- Fischer T., Guest A. // Geophysics. Res. Lett. 2011. 38. L05307.
- Panza G. F., Saraò A. // Geophysical Journal International. 2000. 143, N 2. P. 353.
- Legendre T., Meier S., Lebedev W., Friederich L. // Geophysical Journal International. 2012. 191, N 1. P. 282.

Features of the Focal Mechanisms of the Strongest Mediterranean Earthquakes

E.V. Voronina

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia. E-mail: voronina@physics.msu.ru.

The focal mechanisms of earthquakes in the Mediterranean region that do not match the double couple focal model and that describe the complex source rupture are considered. Analysis is performed by decomposition of the observed seismic moment tensor of the strongest earthquakes into isotropic (ISO), double couple (DC), and compensated linear vector dipole (CLVD) components. There were 121 earthquakes with magnitudes over 5.5 in the region according to the observations for 2000–2019. Of these, 57 events do not match the double couple model. The CLVD parameters are obtained for these earthquakes, and the physical interpretation of the results of the seismic moment tensor decomposition are proposed. This is the first time such an analysis is conducted. Conclusions about the features of the observed destruction processes and the structure of the medium in the focal zones are made based on the results.

Keywords: seismic moment tensor, earthquake focal mechanism, dynamic rupture, compensated linear vector dipole.

PACS: 91.30. Px. Received 25 June 2019.

English version: Moscow University Physics Bulletin. 2020. 75, No. 1. Pp. 95-101.

Сведения об авторе

Воронина Елена Викториновна — канд. физ.-мат. наук, доцент; e-mail: voronina@physics.msu.ru.