

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ФИЗИКИ ЗЕМЛИ

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

**«МЕХАНИЗМЫ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ
СРЕДИЗЕМНОМОРСКОГО РЕГИОНА»**

Выполнил студент
429 группы
Воскунов Денис Александрович

Научный руководитель:
кандидат физ.-мат. наук
доцент Воронина Е.В.

Допущена к защите ____ мая 2019 г.

Заведующий кафедрой профессор Лапшин В.Б.

Москва

2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
Введение.....	3
Глава 1. Литературный обзор.....	5
1.1. Тектоника Средиземноморского региона.....	5
1.2. Очаги землетрясений, не соответствующие модели двойного диполя.....	8
1.3. Физическая интерпретация компонентов тензора сейсмического момента очага землетрясения.....	9
Глава 2. Постановка задачи и методика расчётов.....	12
2.1. Постановка задачи.....	12
2.2. Используемые данные.....	14
2.3. Методика расчётов.....	15
Глава 3. Полученные результаты и их интерпретация.....	20
3.1. Количественное распределение землетрясений по магнитудам и глубинам.....	20
3.2. Определение роли каждой из составляющих тензора сейсмического момента в процессе вспарывания.....	23
3.3. Определение угла поворота площадки разрыва α в процессе динамического вспарывания.....	24
3.4. Изучение режима нагружения среды Средиземноморского региона.....	26
3.5. Изучение аномалии среды вблизи очаговых зон землетрясений.....	28
Заключение.....	30
Литература.....	32

ВВЕДЕНИЕ

Целью данной бакалаврской работы является изучение механизмов очагов землетрясений на примере событий, произошедших в Средиземноморском регионе в период с октября 2000 года по октябрь 2018 года.

Исторически сложилось так, что большинство количественных сейсмологических анализов основывалось на предположении, что землетрясения вызваны сдвиговым разрывом, для которого эквивалентная система сил в изотропной среде представляет собой пару ортогональных диполей без крутящего момента (так называемый «двойной диполь» или «double couple» DC). Тем не менее, с улучшением качества и увеличением количества сейсмических данных становится очевидным, что сейсмические источники обладают большим разнообразием и часто вызваны силами, не соответствующими модели «двойного диполя». Это отражается в значениях компонент тензора сейсмического момента, определяемых по наблюдениям на сейсмических станциях. Анализу главных значений тензора сейсмического момента посвящена настоящая работа.

Чтобы определить, какой тип сейсмического источника представлен найденным тензором момента, применяется разложение тензора момента на три элементарные части: изотропную (ISO), двойной диполь (DC) и компенсированную линейную векторный диполь (CLVD).

Актуальность работы заключается в том, что изучение механизмов очага землетрясений, отклоняющихся от модели двойного диполя, важно как для детального изучения процесса разрушения, так и для выявления процессов, возникающих в среде при сложных землетрясениях. Результаты данных исследований могут быть полезны для изучения вулканической активности, эксплуатации геотермальных источников, анизотропии среды и процессов глубокофокусных землетрясений [13]. Понимание этих физических явлений до сих пор очень неполное.

Работа состоит из введения, трех глав и заключения; она содержит 34 страницы текста, 16 рисунков, 1 таблицу и список литературы из 22 наименований. В теоретической части говорится о тектонике Средиземноморского региона и о природе возникновения компоненты не двойного диполя (non-DC) в очагах землетрясений. В расчетной части будут изучены физические параметры очагов землетрясений, отобранных для обработки. Для выбранных землетрясений подобный анализ проводится впервые. В заключении работы формулируются основные выводы.

Глава 1. Литературный обзор.

1.1. Тектоника Средиземноморского региона.

Для правильного и точного изучения механизмов очагов землетрясений в Средиземноморском регионе необходимо понять тектонику региона.

Средиземноморский регион сейсмически активен благодаря сближению Африканской плиты с Евразийской плитой. Современная скорость относительного движения данных плит колеблется от ~ 4 мм/год (в направлении северо-запад – юго-восток) в западном Средиземноморье до ~ 10 мм/год (в направлении север – юг) в восточном Средиземноморье [9]. Наибольшая активность наблюдается вдоль Эллинской и Калабрийской зон субдукции, в зоне Эгейского и Мраморного морей и западной Турции. Границы литосферных плит, скорости их движения и основные разломы Средиземноморского региона показаны на Рисунке 1.



Рисунок 1 – Карта Средиземноморского региона с нанесенными на неё границами литосферных плит и скоростями их движения [9].

В западной части Средиземного моря столкновение между Африкой и Евразией сопровождается правосторонним продольным сдвиговым разломом вдоль Азорско-Гибралтарской сейсмической зоны и в Кадисском заливе. В регионе между Испанией и Марокко, слабые землетрясения характеризуются широким спектром механизмов разрушения, однако большая их часть является механизмами сдвига. Считается, что сейсмичность на глубине более 600 км под югом Испании является свидетельством остаточной субдукции, которая все еще влияет на современную тектонику [9].

Вдоль побережья Северной Африки землетрясения образуют узкую сейсмоактивную полосу, являющуюся западной частью Калабрийской дуги. На ее территории происходят средние и сильные землетрясения с той же ориентацией разлома с запада на восток, что и на границе плиты между Африкой и Евразией, а также сдвиговые землетрясения, направленные под углом к границе плит [9].

Под северо-восточной Сицилией и южной Италией субдукция происходит под Тирренским морем на Калабрийской дуге. В этом регионе 28 декабря 1908 года произошло Мессинское землетрясение с магнитудой $M 7,1$, разрушившее 93% зданий и унесшее около 150000 жизней – одно из самых разрушительных исторических землетрясений в Европе [20]. Однако основная сейсмичность в Италии расположена в горной цепи Апеннин, простирающейся с северо-запада на юго-восток от южной части бассейна реки По на севере до залива Таранто на юге [9].

Восточная сторона Апеннинской цепи является областью сжатия, в то время как на западной стороне Апеннин находится область растяжения в направлении запад – восток с соответствующими землетрясениями с механизмами сдвига и сброса [4]. Согласно этим авторам в области центральной Италии наступает фаза сейсмической активации. Данный вывод можно сделать на основании произошедшей на территории Апеннинского полуострова серии

сильных землетрясений ($6,1 \leq M_w \leq 6,6$) в 2016 г. На Рисунке 2 можно наблюдать карту сейсмической последовательности данной серии землетрясений за период с 24 августа (момент первого сильного толчка, форшока $M_w = 6,2$) по 30 октября (момент самого сильного землетрясения, $M_w = 6,5$).

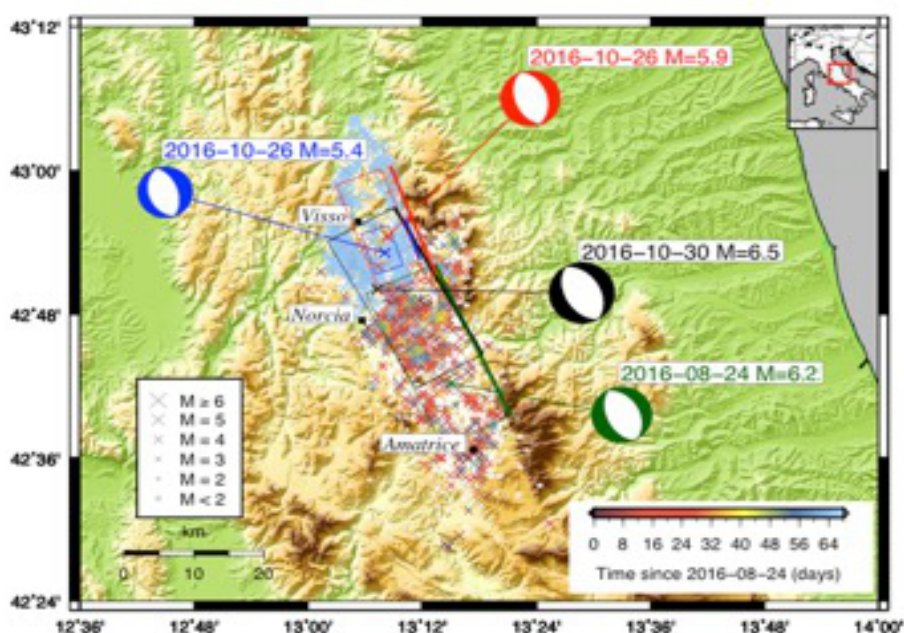


Рисунок 2 – Карта сейсмической последовательности землетрясений в центральной Италии 2016 [12].

Каждое из этих событий сопровождалось серией афтершоков с магнитудами меньше основных толчков, в результате которых высвободилось значительное количество энергии [4].

Африканская плита погружается под Грецию и Эгейское море вдоль Эллинской дуги со скоростью почти 40 мм/год. В этом регионе часто встречаются землетрясения с малой глубиной гипоцентра (< 50 км), и большинство землетрясений к северо-западу от острова Крит имеют механизмы взброса или сдвига, характерные для сходящегося движения в зоне субдукции. К северо-востоку от острова Крит средние и сильные землетрясения возникают в

результате растяжения, связанного с региональным вспучиванием коры, находящейся над субдуцирующей средиземноморской океанической плитой.

Мраморное море, находящееся у западного побережья Турции, является переходной зоной между вспученной частью коры Эллинской системы субдукции под Эгейским морем на западе и Восточно-Анатолийским разломом на востоке. Северо-Анатолийский трансформный разлом обеспечивает большую часть правостороннего сдвигового движения между Анатолийским блоком и Евразийской платформой [9].

На южной окраине Анатолийского блока с запада на восток простирается Кипрская дуга, для которой характерен умеренный уровень сейсмичности. Кипрская дуга представляет собой сходящуюся границу между Анатолийским блоком на севере и Африканской платформой на юге.

1.2. Очаги землетрясений, не соответствующие модели двойного диполя.

Современные сейсмологические наблюдения устанавливают, что волновая картина от некоторых землетрясений не в полной мере соответствует модели «двойного диполя», отвечающей подвижке по единственной плоскости разрыва [3].

Для интерпретации наблюдаемых волновых полей привлекается более сложная модель очага, отличающаяся от общепринятой двойной пары сил без момента и получившая название non-DC-источника («не двойной диполь» - non double couple) [7].

Для уяснения природы non-DC-источников используются представления о сложном характере разрывообразования в очагах отдельных землетрясений, при которых разрушения реализуются по двум или более удобным направлениям, не параллельным друг другу. По существующим представлениям non-DC-источники обязаны своим возникновением усложненным характером подвижек в очаге, когда скольжение происходит не по одной единственной плоскости

разрыва, а по нескольким плоскостям практически одновременно [19].

Очаг каждого землетрясения характеризуется своим тензором сейсмического момента. Тензор сейсмического момента описывает эквивалентные силы, характеризующие сейсмический точечный источник, и является базовой величиной, оцениваемой для землетрясений всех масштабов: от микроземлетрясений в образцах горных пород, изучаемых по данным об акустической эмиссии, до крупных разрушительных землетрясений. Чтобы определить, какой тип сейсмического источника физически представлен найденным тензором сейсмического момента, [13] предложили разложить данный тензор на три элементарные части: изотропную (ISO), двойной диполь (DC) и компенсированный линейный векторный диполь (CLVD). Подобное разложение тензора сейсмического момента является инструментом для классификации и физической интерпретации сейсмических источников [18].

1.3. Физическая интерпретация компонентов тензора сейсмического момента очага землетрясения.

Как известно, тензор сейсмического момента раскладывается на компоненту двойного диполя (DC) и на компоненту, представляющую собой совокупность диполя и одиночной силы (non-DC). Эта компонента, в свою очередь, раскладывается на изотропную составляющую (ISO) и компенсированный линейный векторный диполь (CLVD) [13].

В то время как компонента двойного диполя (DC) связана с механизмом чистого сдвига, происхождение изотропной компоненты (ISO) и компоненты компенсированного линейного векторного диполя (CLVD) не является столь очевидным.

Изотропная составляющая физически связана с объемными изменениями в источнике. На ее возникновение могут влиять такие факторы, как геотермическая или вулканическая активность, проникновение флюидов, взрывы, обвалы в

шахтах и т.д [18]. Например, чистый изотропный тензор сейсмического момента с положительным знаком эквивалентен образцу взрыва (Рисунок 3) [14].

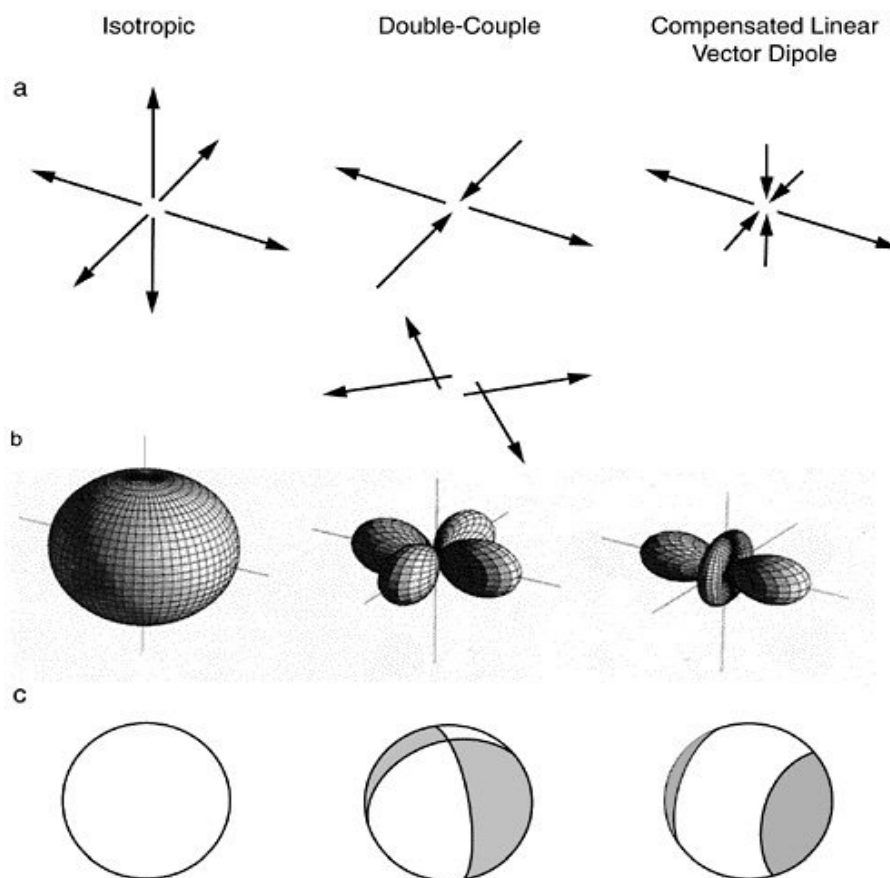


Рисунок 3 – а) системы эквивалентных сил в координатах главных осей; б) функция направленности излучения Р волн; с) механизмы очага землетрясений для изотропного источника, двойного диполя и компенсированного линейного векторного диполя [6].

Согласно [10] первоначально механизм компенсированного линейного векторного диполя (CLVD) был создан для описания процессов в очагах глубокофокусных землетрясений. Причиной возникновения данного механизма являлись различного рода фазовые превращения вещества в мантии. Для коровых землетрясений механизм компенсированного линейного векторного диполя (CLVD) может быть объяснен анизотропией среды [16], а также влиянием

флюидов [10,11,17]. Проникновение жидкости в трещины под большим давлением приводит к раскрытию последних и последующему сдвигу с поворотом площадки разрыва [17].

Глава 2. Постановка задачи и методика расчётов.

2.1. Постановка задачи.

В работе ставилось задачей изучить механизмы очага наиболее сильных землетрясений средиземноморского региона последних лет с целью анализа параметров, не соответствующих силовой модели очага типа двойного диполя. Для этого необходимо было произвести разложение наблюдаемых тензоров сейсмического момента на составляющие и определить роль каждой из составляющих в процессе вспарывания путем определения процентной доли каждой составляющей в механизме очага землетрясения. Возможны различные методы разложения тензора сейсмического момента на составляющие [3,5,6,10,13,18 и др.]. В данной работе применяется разложение, предложенное [5, 18], которое выглядит следующим образом:

$$\mathbf{M}_{ij} = \mathbf{M}_{ISO} + \mathbf{M}_{DC} + \mathbf{M}_{CLVD} = M_1 \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_1 + M_2 \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_2 + M_3 \mathbf{e}_3 \mathbf{e}_3 \quad (1)$$

$$\mathbf{M}_{ij} = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$M_1 \geq M_2 \geq M_3$ – 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 Т, промежуточной оси N и оси сжатия Р 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.

Классический механизм двойного диполя (DC) характеризуется тремя геометрическими параметрами: углом простираения ϕ и углом падения плоскости подвижки δ и углом ориентации сдвига в плоскости подвижки λ [1]. К механизму

компенсированного линейного векторного диполя (CLVD) добавляется еще один геометрический параметр – угол α поворота площадки разрыва в процессе динамического вспарывания [15]. Определение угла поворота площадки разрыва α являлось еще одной задачей в данной работе [5].

$$\sin \alpha = \frac{M_1 + M_3 - 2M_2}{M_1 - M_3} \quad (3)$$

Далее ставилась задача определения знака компоненты M_{CLVD} для каждого отобранного землетрясения, определения областей сжатия и растяжения в данном регионе и сравнение полученных результатов с сейсмической томографией Средиземноморского региона [18].

$$M_{CLVD}^+ \text{ при } (M_1 + M_3 - 2M_2) \geq 0 \quad (4)$$

$$M_{CLVD}^- \text{ при } (M_1 + M_3 - 2M_2) < 0 \quad (5)$$

Отрицательные значения $M_{CLVD} < 0$ соответствуют областям сжатия (области захлопывания трещин в процессе динамического вспарывания), положительные значения $M_{CLVD} > 0$ соответствуют областям растяжения (области открытия трещин в процессе динамического вспарывания).

Последним пунктом в данной работе стал поиск аномалий среды вблизи очаговых зон землетрясений и попытка их физической интерпретации путем оценки отношения скоростей Р-волн и S-волн [18]:

$$\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}} = \sqrt{1 + \frac{M_1 + M_3}{M_1 + M_3 - 2M_2}} \quad (6)$$

где λ и μ – параметры Ламе. При $\frac{V_P}{V_S} \rightarrow \infty$ среда переходит в жидкое состояние.

2.2. Используемые данные.

В данной работе использовались данные из мирового каталога землетрясений Американской геологической службы USGS [21]. Данные Гарвардского каталога (www.globalcmt.org) и европейского (www.emsc-csem.org) не использовались, поскольку они не определяют процентное содержание компоненты двойного диполя в механизмах очага.

Для обработки были выбраны события, произошедшие в период с октября 2000 года по октябрь 2018 года в регионе со следующими координатами: $(30 \div 50)^\circ$ с.ш., $(-10 \div 40)^\circ$ в.д. Изучались землетрясения с магнитудой $M_w > 5,5$ и процентной долей двойного диполя $DC\% < 90\%$. Всего было отобрано 57 событий. На Рисунке 4 изображена карта исследуемого региона с нанесенными на нее эпицентрами землетрясений, включенных в обработку.

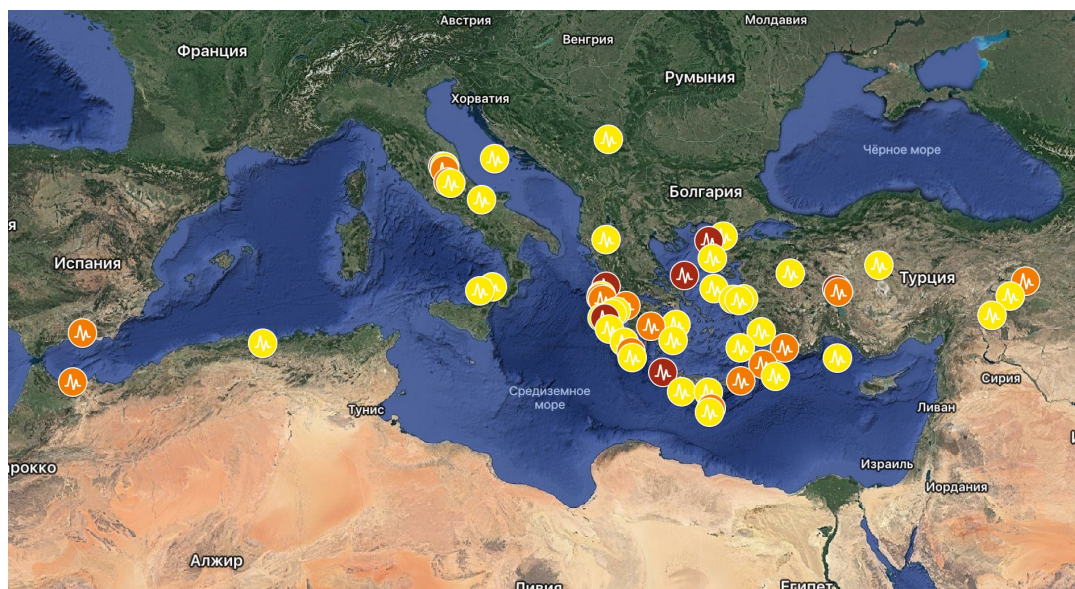


Рисунок 4 – Карта исследуемого региона с нанесенными на нее обозначениями эпицентров землетрясений, включенных в обработку. Желтым цветом показаны эпицентры землетрясений с магнитудами 5,5 – 5,9; оранжевым цветом показаны эпицентры землетрясений с магнитудами 6,0 – 6,4; красным цветом показаны эпицентры землетрясений с магнитудами более 6,5 [22].

Данные включали в себя: магнитуду землетрясения, дату, координаты эпицентра, глубину гипоцентра, главные значения тензора напряжений по осям сжатия, промежуточной и растяжения.

2.3. Методика расчётов.

В данной работе в качестве метода изучения очагов землетрясений в Средиземноморском регионе предлагается разложение тензоров моментов землетрясений на изотропную часть (ISO), двойной диполь (DC) и компенсированный линейный векторный диполь (CLVD). Тензор сейсмического момента может быть представлен в описанном выше виде, по формулам (1), (2) [5,18].

Значения M_{ISO} , M_{DC} , M_{CLVD} определяются как:

$$M_{ISO} = \frac{1}{3}(M_1 + M_2 + M_3) \quad (7)$$

$$M_{CLVD} = \frac{2}{3}(M_1 + M_3 - 2M_2) \quad (8)$$

$$M_{DC} = \frac{1}{2}(M_1 - M_3 - |M_1 + M_3 - 2M_2|) \quad (9)$$

На первом этапе изотропная составляющая M_{ISO} извлекается из диагонализированного тензора сейсмических моментов M_{ij} , и вычисляется след матрицы $tr(M_{ij})$. Это показывает изменение объема из-за взрыва или имплозии. [5]:

$$M = M_{ISO} + M_{Deviatoric} =$$

$$\begin{aligned}
&= \begin{bmatrix} \frac{1}{3}tr(\mathbf{M}_{ij}) & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{3}tr(\mathbf{M}_{ij}) & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{3}tr(\mathbf{M}_{ij}) \end{bmatrix} + \\
&+ \begin{bmatrix} M_1 - \frac{1}{3}tr(\mathbf{M}_{ij}) & 0 & 0 \\ 0 & M_2 - \frac{1}{3}tr(\mathbf{M}_{ij}) & 0 \\ 0 & 0 & M_3 - \frac{1}{3}tr(\mathbf{M}_{ij}) \end{bmatrix} \quad (10)
\end{aligned}$$

Далее член $\mathbf{M}_{\text{Deviatoric}}$, отвечающий за девиаторную часть тензора сейсмических моментов и определяющий девиаторный тензор, раскладывается на двойной диполь M_{DC} и компенсированный линейный векторный диполь M_{CLVD} :

$$\mathbf{M}_{\text{Deviatoric}} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\text{DC}} + \mathbf{M}_{\text{CLVD}} \quad (11)$$

где $m_i = M_i - \frac{1}{3}tr(\mathbf{M}_{ij})$, $i=1,2,3$ – собственные значения $\mathbf{M}_{\text{Deviatoric}}$.

Следовательно, получаем:

$$\mathbf{M}_{\text{Deviatoric}} = m_3(1 - 2F) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + m_3F \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

где

$$F = \frac{m_1}{M_3}$$

Для измерения долей составляющих изучаемых механизмов может быть рассчитано процентное содержание каждого компонента тензора сейсмического момента с помощью следующих формул [5]:

$$\%ISO = \frac{100tr(\mathbf{M}_{ij})}{|tr(\mathbf{M}_{ij})| + \sum_{i=1}^3 |m_i|}$$

$$\%DC = \frac{m_3(1 - 2F)}{|m_3(1 - 2F)| + |2m_3F|} (100 - \%ISO)$$

$$\%CLVD = \frac{2m_3F}{|m_3(1 - 2F)| + |2m_3F|} (100 - \%ISO) \quad (13)$$

Результаты разложения сравнивались со значениями составляющей двойного диполя, взятыми из каталога землетрясений Американской геологической службы USGS.

Результаты определения знака CLVD составляющей по формулам (4) и (5) сопоставлялись с томографической картой литосферы средиземноморского региона, что позволило наглядно определить области сжатия и растяжения, а также, – понять причину их возникновения.

Для изучения аномалии среды вблизи очаговых зон землетрясений, в предположении, что среда упругая и изотропная, для каждого события были посчитаны отношения скоростей Р-волн и S-волн с помощью формулы (6). Полученные значения сравнивались с предельным значением [18]:

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,1547; \quad \lambda = -\frac{2}{3}\mu; \quad \mu \geq 0$$

Аномально низкие значения могут указывать на анизотропию среды за счёт высокой раздробленности горных пород [2].

Все необходимые расчёты в данной работе проводились с помощью программы Microsoft Office Excel, карты были составлены с помощью сервиса

Google Maps, наложение отметок эпицентров землетрясений на томографическую карту Средиземноморского региона было выполнено в программе Adobe Photoshop.

[illegible]

На втором этапе с помощью формулы (3) были рассчитаны углы поворота площадки разрыва в процессе динамического испарывания для компоненты компенсированного линейного векторного диполя (CLVD) всех землетрясений.

На третьем этапе с помощью формул (4), (5) были рассчитаны значения M_{CLVD} для каждого землетрясения с целью определения областей сжатия и растяжения в данном регионе. Отрицательные значения $M_{CLVD} < 0$ соответствуют областям сжатия, положительные значения $M_{CLVD} > 0$ соответствуют областям растяжения.

На четвертом этапе с помощью формулы (6) были посчитаны отношения скоростей Р-волн и S-волн для изучения аномалии среды вблизи очаговых зон землетрясений.

Глава 3. Полученные результаты и их интерпретация.

3.1. Количественное распределение землетрясений по магнитудам и глубинам.

Согласно мировому каталогу землетрясений американской геологической службы USGS в Средиземноморском регионе за период с октября 2000 г. по октябрь 2018 г. произошло 117 событий с моментной магнитудой $M_w \geq 5,5$, из них 57 отклоняются от модели двойного диполя ($DC\% \leq 90\%$).

По имеющимся данным были построены распределения всех событий по магнитуде и глубине (Рисунок 6, 7).

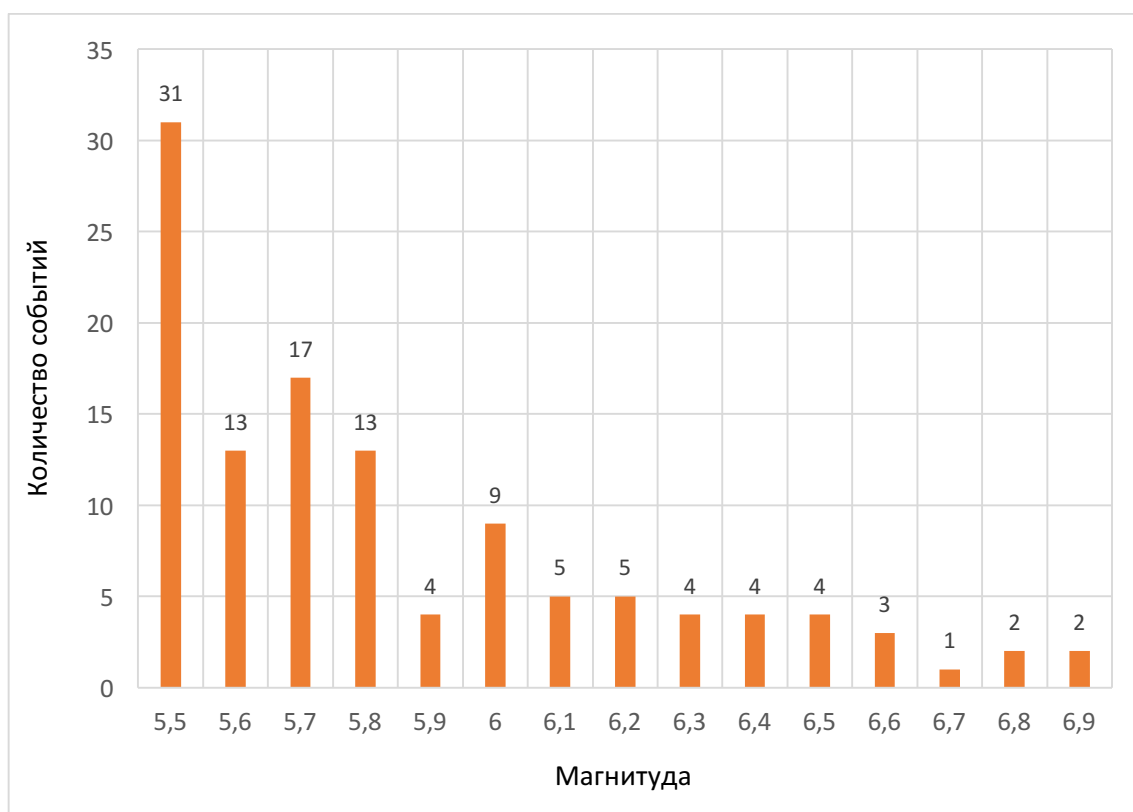


Рисунок 6 – Количественное распределение всех землетрясений за выбранный период по магнитудам.



Рисунок 7 – Количественное распределение всех землетрясений за выбранный период по глубинам гипоцентра.

Исходя из полученных распределений, можно сделать вывод о том, что большинство землетрясений в данном регионе являются средними по своей силе с моментными магнитудами $M_w \leq 6,0$, реже случаются события с большими магнитудами (Рисунок 6).

Подавляющее большинство землетрясений являются поверхностными, они происходят на глубине первых 40 – 50 км (Рисунок 7). Однако за выбранный период произошёл ряд событий на больших глубинах. Данные землетрясения произошли в зонах субдукции и физические процессы в них связаны с процессами погружающейся океанической плиты.

Аналогичные распределения были построены для событий, не соответствующих модели двойного диполя (non-DC) (Рисунок 8, 9).

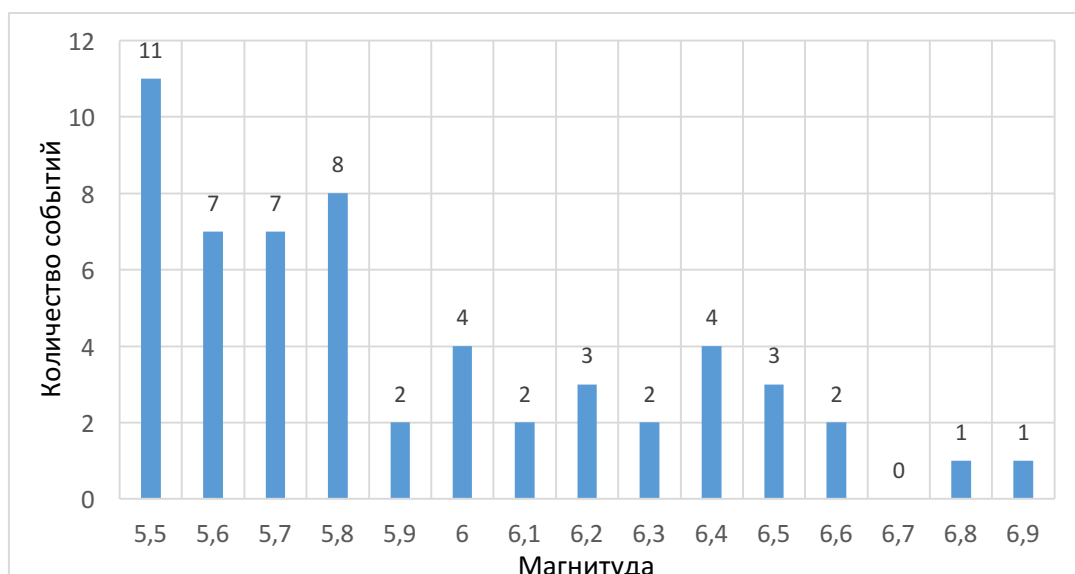


Рисунок 8 – Количественное распределение non-DC землетрясений за выбранный период по магнитудам.



Рисунок 9 – Количественное распределение non-DC землетрясений за выбранный период по глубинам гипоцентра.

Стоит отметить, что non-DC землетрясения распределены во всем диапазоне магнитуд и глубин (Рисунок 8,9). Причем, здесь не рассматриваются афтершоки, в которых доля CLVD компоненты, как правило, оказывается более значительной, чем при главном событии.

3.2. Определение роли каждой из составляющих тензора сейсмического момента в процессе вспарывания.

В первую очередь необходимо было проверить применимость выбранного метода разложения тензора сейсмического момента. Для этого с помощью данного метода была произведена оценка процентной доли составляющей двойного диполя (DC) исследуемых событий. После данной операции полученные результаты сопоставлялись с данными, взятыми из мирового каталога землетрясений Американской геологической службы USGS. График соответствия расчётных данных и данных USGS представлен на Рисунке 10.

Два ряда значений хорошо коррелируют друг с другом, из чего можно сделать вывод, что выбранный в данной работе метод разложения и расчёт процентных долей составляющих тензора сейсмического момента – верный и достаточно точный, в связи с чем он может быть использован для описания очагов землетрясений не только в данном регионе, но и по всему земному шару.

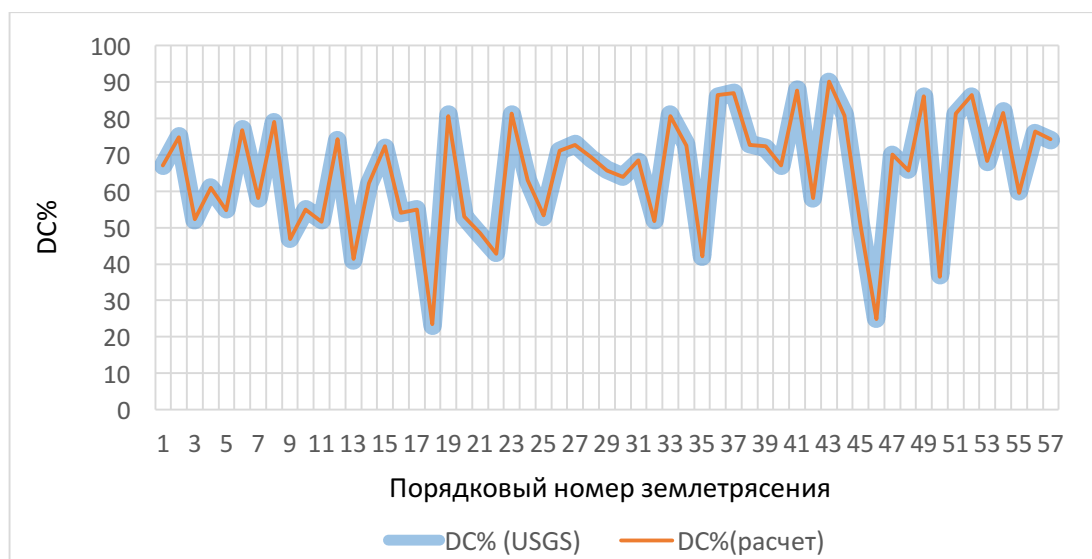


Рисунок 10 – График соответствия расчётных и полученных из каталога землетрясений данных по величине процентной доли DC для отобранных событий. Красная ломаная линия соответствует расчётным данным, синяя ломаная линия соответствует данным, взятым из каталога землетрясений Американской геологической службы USGS.

Далее этот метод был применен относительно всех составляющих тензора сейсмического момента исследуемых событий. Результаты представлены на Рисунке 11.

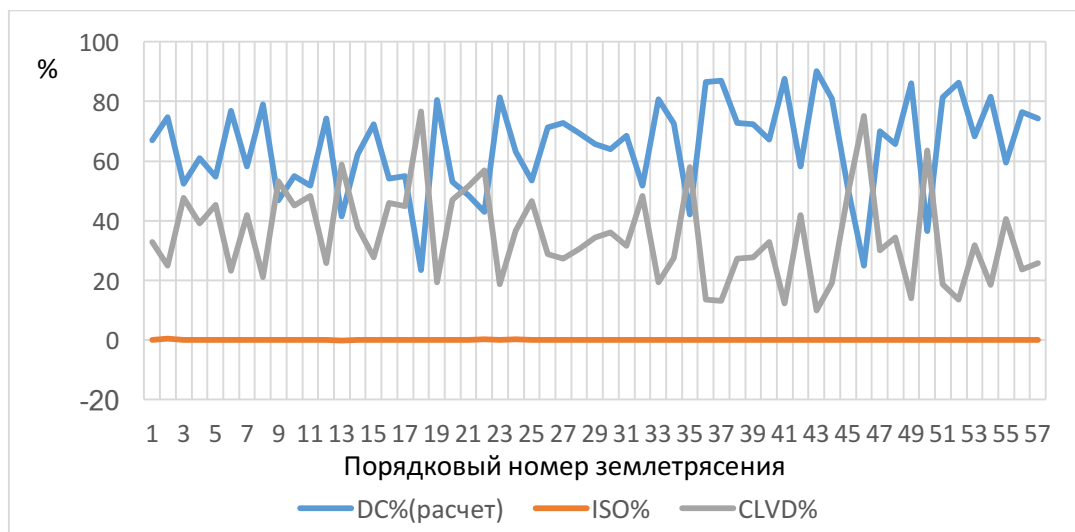


Рисунок 11 – Соотношение составляющих тензора сейсмического момента для исследуемых событий.

Очевидно, что практически для всех событий изотропная составляющая (ISO) близка к нулю. Возможным объяснением таких результатов может быть то, что за данный период не было зафиксировано сильной вулканической и геотермальной активности, являющейся основной причиной возникновения изотропной компоненты в тензоре сейсмического момента. Происхождение компоненты компенсированного линейного векторного диполя можно объяснить влиянием флюидов или анизотропией среды в области источника [18].

3.3. Определение угла поворота площадки разрыва α в процессе динамического вспарывания.

Как известно, механизм компенсированного линейного векторного диполя (CLVD) характеризуется дополнительным угловым параметром – углом поворота площадки разрыва α в процессе динамического вспарывания. В данной

части работы были определены значения угла α для исследуемых событий. Гистограмма значений угла α изображена на Рисунке 12.

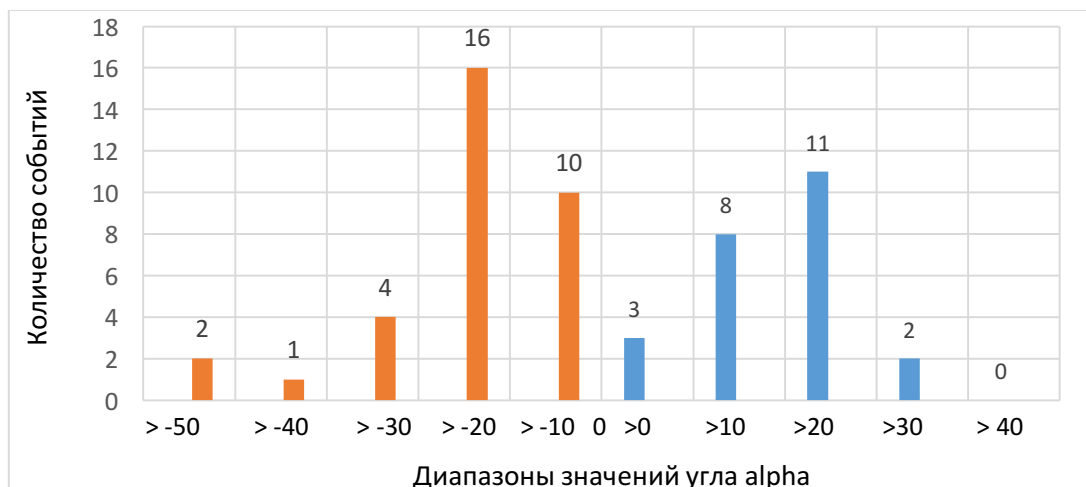


Рисунок 12 – Гистограмма распределения значений угла поворота площадки разрыва α в механизмах CLVD. Красный цвет соответствует отрицательным углам для областей захлопывания трещин, синий цвет соответствует положительным углам для областей раскрытия трещин.

Число землетрясений, произошедших в областях доминирующего сжатия, несколько больше, чем в областях растяжения.

Распределение значений угла α с глубиной показано на Рисунке 13.

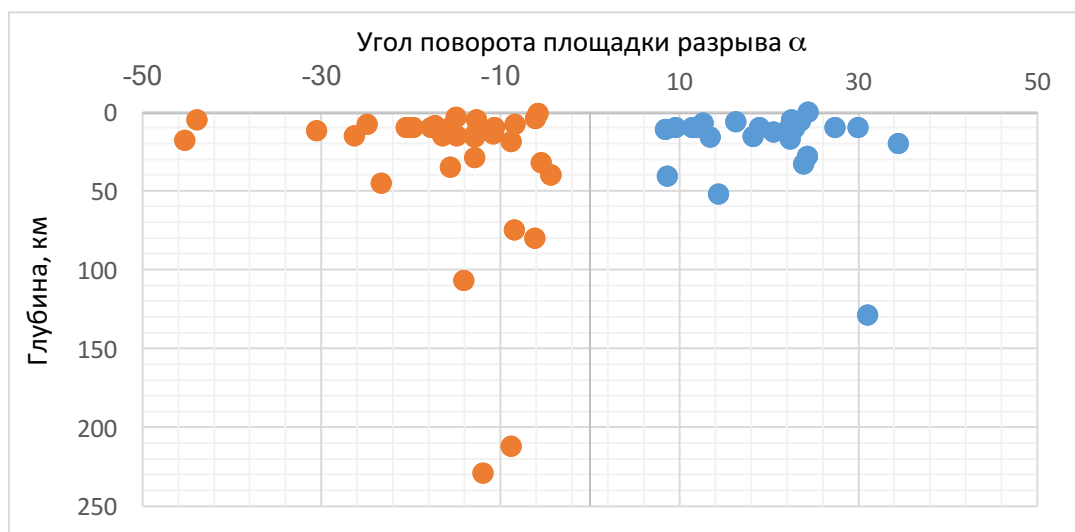


Рисунок 13 – График распределения значений угла поворота площадки разрыва α с глубиной в механизмах CLVD.

Как следует из Рисунка 13, с увеличением глубины число событий в режиме сжатия возрастает.

3.4. Изучение режима нагружения среды Средиземноморского региона.

Следующим пунктом данной работы являлось изучение режима нагружения среды путем определение значений M_{CLVD} тензора сейсмического момента всех событий. Согласно полученным результатам было построено распределение данных значений для каждого события с точностью до порядка величины (Рисунок 14).

Из распределения видно, что 33 события имеют отрицательные значения $M_{CLVD} < 0$, что согласно [18] соответствует областям сжатия, 24 события имеют положительные значения $M_{CLVD} > 0$, что, в свою очередь, соответствует областям растяжения.

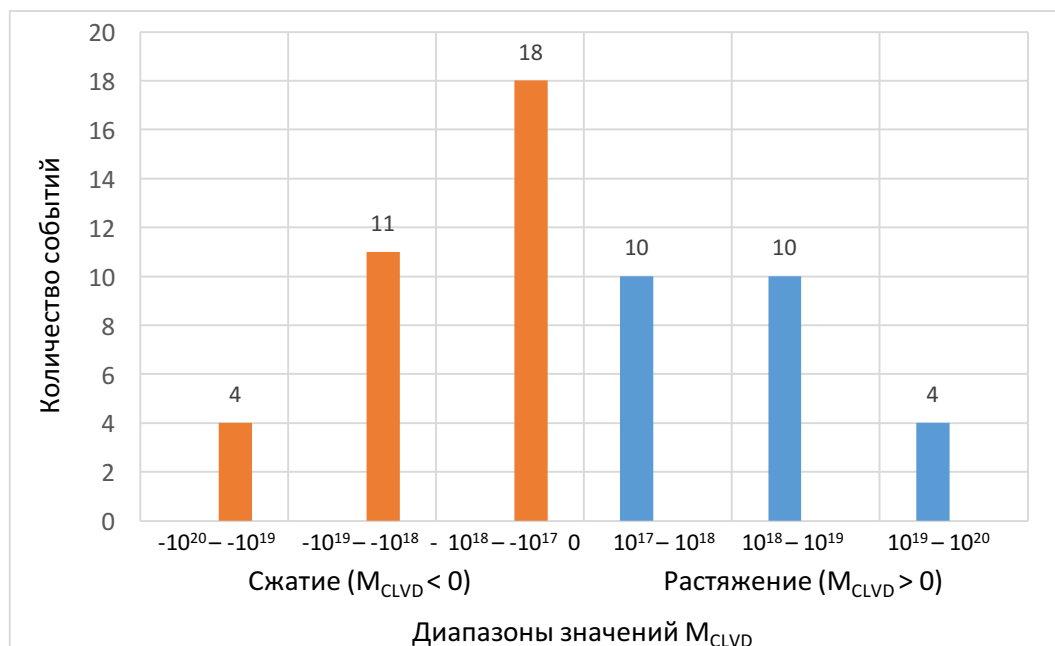


Рисунок 14 – Гистограмма распределения событий для каждого диапазона значений M_{CLVD} . По горизонтальной оси указаны диапазоны изменения величины статического сейсмического момента (Nm). Красный цвет соответствует $M_{CLVD} < 0$ (области сжатия), синий цвет соответствует $M_{CLVD} > 0$ (области растяжения).

Для более наглядного восприятия полученные данные были сопоставлены с сейсмической томографией литосферы Средиземноморского региона (Рисунок 15) [8]. Из Рисунков 12, 14, 15 видно, что события с отрицательными значениям $M_{CLVD} < 0$ (области сжатия) происходили в основном в зонах субдукции Калабрийской и Эллинской дуг, в то время как события с положительными значениями $M_{CLVD} > 0$ (области растяжения) преимущественно сгруппированы в районе Эгейского моря и западной Турции, где согласно [9] наблюдается регионально вспучивание земной коры.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что полученные данные по расчету CLVD составляющей не противоречат результатами сейсмической томографии Средиземноморского региона.

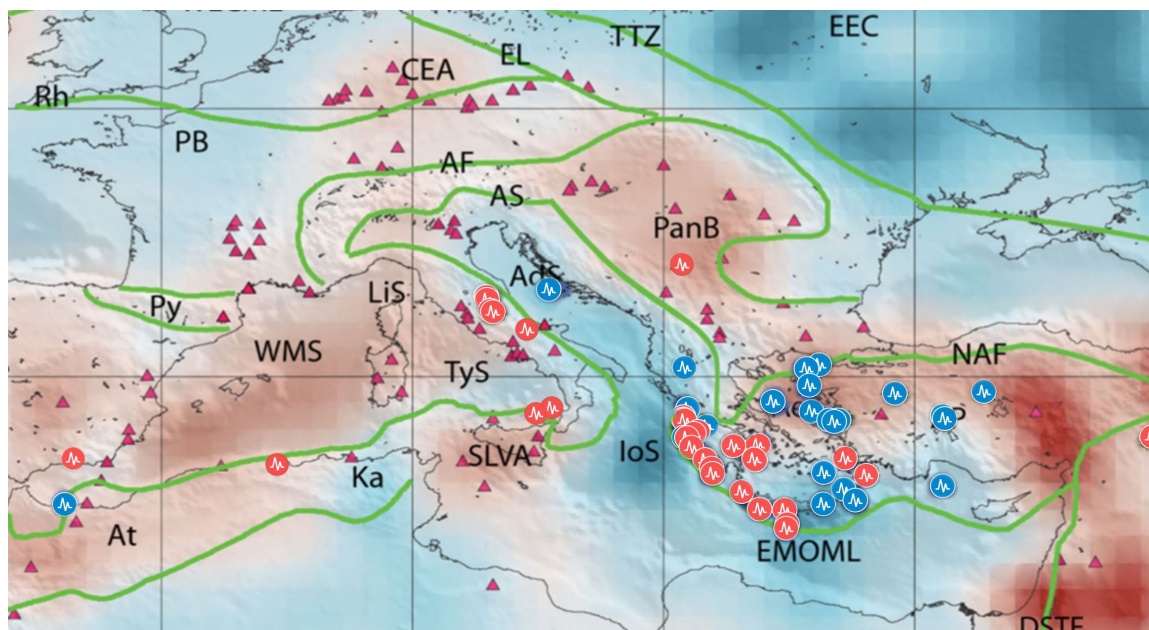


Рисунок 15 – Томографическая карта Средиземноморского региона с нанесенными на нее эпицентрами землетрясений. Красным цветом отмечены землетрясения с $M_{CLVD} < 0$ (области сжатия), синим цветом отмечены землетрясения с $M_{CLVD} > 0$ (области растяжения) [8].

3.5. Изучения аномалии среды вблизи очаговых зон землетрясений.

Для изучения аномалии среды вблизи очаговых зон землетрясений были посчитаны отношения скоростей Р-волн и S-волн по величинам собственных значений тензора напряжений по формуле (6) для каждого исследуемого события. Эта оценка очень приближенная, так как она возможна только в предположении, что среда является упругой и изотропной [2,16]. Тогда имеет место некоторое предельное соотношение упругих параметров, при котором она остается твердой. Отклонение от этого предельного значения может свидетельствовать, например, об анизотропии среды. Предельное значение [18]:

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1,1547.$$

Распределение, полученных по используемым в данной работе землетрясениям, значений отношения скоростей можно видеть на Рисунке 16.

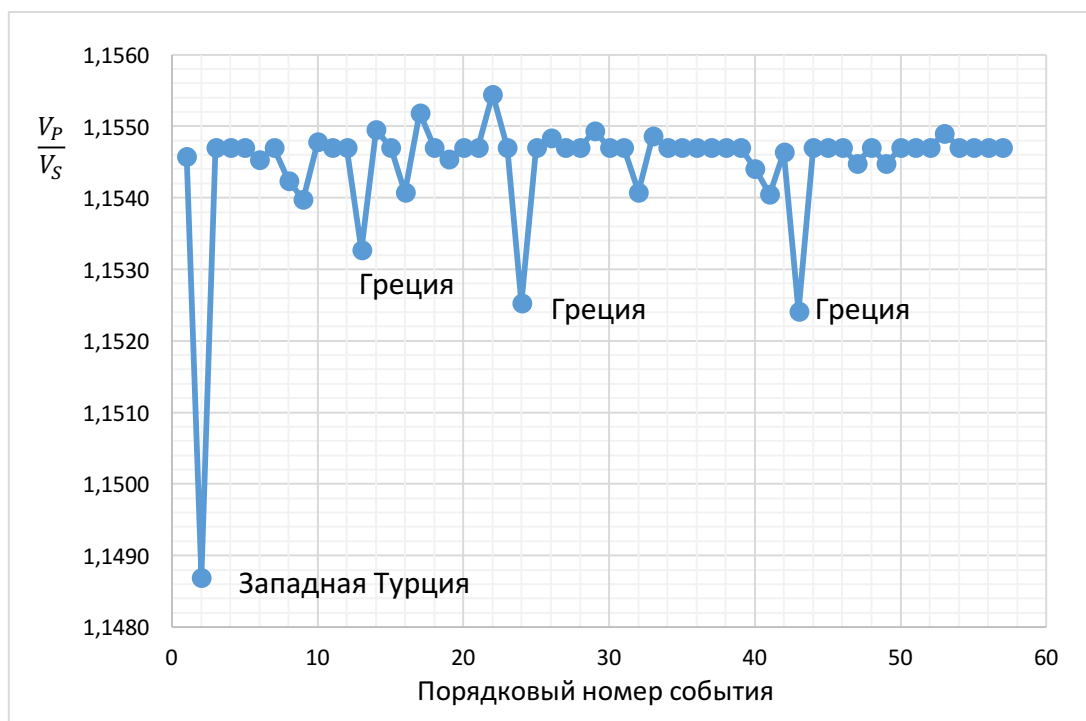


Рисунок 16 – Распределение значений $\frac{V_P}{V_S}$ для каждого исследуемого события.

В этом ряду можно выделить несколько аномально низких значений отношения скоростей, соответствующих землетрясениям, представленным в Таблице 1.

Таблица 1 – Аномально низкие значения $\frac{V_P}{V_S}$.

Регион	Дата	Глубина	Магнитуда	Координаты	$\frac{V_P}{V_S}$
Турция	15.12.2000	10	6	38.457°N 31.351°E	1,1487
Греция	07.10.2004	128,9	5,5	36.429°N 26.796°E	1,1533
Греция	20.02.2008	9,9	6,2	36.288°N 21.775°E	1,1525
Греция	12.10.2013	40	6,6	35.514°N 23.252°E	1,1524

Такие аномально низкие значения $\frac{V_P}{V_S}$ могут указывать на наличие в среде пор и трещин, другими словами, на явление анизотропии среды вблизи очаговых зон землетрясений [2]. Исследование анизотропии среды требует отдельного, более тонкого, анализа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью настоящей бакалаврской работы было изучение механизмов очага землетрясений, не соответствующих модели двойного диполя. Для этого необходимо было произвести разложение тензора сейсмического момента на составляющие изотропного типа, типа двойного и компенсированного линейного векторного диполей.

Результатами настоящей работы является:

1. Были отобраны землетрясения средиземноморского региона, отклоняющиеся от модели двойного диполя более чем на 10%.
2. По литературным данным был выбран метод разложения, который наилучшим образом согласуется с данными Мировой сейсмической службы.
3. Были построены распределения землетрясений по магнитудам и глубине.
4. Были рассчитаны углы поворота плоскости разрыва в процессе вспарывания.
5. Были проанализированы значения составляющей компенсированного линейного векторного диполя в соответствии с тектоникой региона и данными сейсмической томографии.
6. Были выделены очаговые зоны с аномально низким отношением скоростей Р и S волн.

На основании проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Землетрясения, не соответствующие модели двойного диполя, распределены во всем диапазоне магнитуд и глубин.
2. Механизм очага сложных разрывов, в отличии от модели двойного диполя, определяется 4-мя угловыми параметрами: ϕ , δ , λ и α . По этим параметрам удалось определить, что число землетрясений, произошедших в областях доминирующего сжатия, несколько больше, чем в областях растяжения, и с увеличением глубины число событий в режиме сжатия возрастает.

3. Режим нагружения среды по модели компенсированного линейного векторного диполя согласуется с результатами сейсмической томографии литосферы Средиземноморского региона.
4. Аномально низкие значения отношений скоростей V_P/V_S могут быть вызваны реологией окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воронина Е.В., Механика очага землетрясения. М.: Физический факультет МГУ, 2004, 92 с.
2. Кузин А.М., СЕЙСМИЧНОСТЬ С ПОЗИЦИИ ФЛЮИДИЗАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ, Материалы XXI Научно-практической Щукинской конференции с международным участием, Москва, 199–203, 2018.
3. Лутиков А.И., Юнга С.Л., Кучай М.С., СЕЙСМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ, НЕ УДОВЛЕТВОРЯЮЩИЕ МОДЕЛИ ДВОЙНОГО ДИПОЛЯ: КРИТЕРИЙ ВЫЯВЛЕНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ В ОСТРОВНЫХ ДУГАХ, ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ, 2010, том 11, № 3, с.11-25, 2010.
4. Лутиков А.И., Рогожин Е.А., Донцова Г.Ю., Кучай М.С., СИЛЬНЫЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 2009–2016 гг. В ЦЕНТРАЛЬНОЙ ИТАЛИИ: ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ, СЕЙСМИЧЕСКАЯ ИСТОРИЯ И АФТЕРШОКОВЫЕ ПРОЦЕССЫ, ФИЗИКА ЗЕМЛИ, 2018, № 2, с. 45–63, 2018.
5. Finck Florian, Kurz Jochen H., Grosse Christian U., Hans-Wolf Reinhardt Advances in Moment Tensor Inversion for Civil Engineering, International Symposium, 1–9, (NDT-CE 2003).
6. Foulger G.R. and Julian B.R., Non-Double-Couple Earthquakes, Encyclopedia of Earthquake Engineering DOI 10.1007/978-3-642-36197-5_290-1, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1–31, 2015.
7. Frohlich C. (1995) Characteristics of Well-Determined Non-Double-Couple Earthquakes in the Harvard CMT Catalog. Physics of the Earth and Planetary Interiors. Vol. 91. Iss 4. P.213-228.
8. A shear wave velocity model of the European upper mantle from automated inversion of seismic shear and surface waveforms, C. P. Legendre T. Meier S. Lebedev W. Friederich L. Viereck-Götte, Geophysical Journal International,

9. Herman, M.W., Hayes, G.P., Smoczyk, G.M., Turner, Rebecca, Turner, Bethan, Jenkins, Jennifer, Davies, Sian, Parker, Amy, Sinclair, Allison, Benz, H.M., Furlong, K.P., and Villaseñor, Antonio, 2015, Seismicity of the Earth 1900–2013, Mediterranean Sea and Vicinity: U.S. Geological Survey Open-File Report 2010–1083-Q, scale 1:10,000,000, <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20101083Q>.
10. Julian, B.R., Miller, A.D., Foulger, G. R. , Non-double-couple earthquakes 1. Theory. *Reviews of Geophysics*, 36(4), 525–549, 1998.
11. Panza, G. F., & Saraò, A., Monitoring volcanic and geothermal areas by full seismic moment tensor inversion: are non-double-couple components always artefacts of modelling? *Geophysical Journal International*, 143(2), 353–364, 2000.
12. Pino et al. Clock advance and magnitude limitation through fault interaction: the case of the 2016 central Italy earthquake sequence, *Scientific Reports*, doi:10.1038/s41598-019-41453-1, 1–7, 2019.
13. Randall, M. J., and L. Knopoff, The Compensated Linear-Vector Dipole: A Possible Mechanism for Deep Earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 75, 4957–4963, 1970.
14. Stierle Eva, Non-Double-Couple Components in Moment Tensors of Aftershock Seismicity and Laboratory Earthquakes, *Geowissenschaftlichen Fakultät der Freien Universität Berlin*, Berlin, 1–89, 2015.
15. Vavryčuk, V., Inversion for parameters of tensile earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 106(16), 339–16, 2001.
16. Vavryčuk, V., On the retrieval of moment tensors from borehole data. *Geophysical Prospecting*, 55(3), 381–391, 2007.
17. Vavryčuk, V, Non-double-couple mechanisms of microearthquakes induced during the 2000 injection experiment at the KTB site, Germany: A result of tensile faulting or anisotropy of a rock? *Tectonophysics* 456, 74–93, 2008.
18. Vavryčuk, V., Moment tensor decompositions revisited. *Journal of Seismology*,

- 19(1), 231–252, 2015.
19. Yunga S., Lutikov A., Molchanov O.. Non double couple seismic sources, faults interaction and hypothesis of self-organized criticality. Natural Hazards and Earth System Science, Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union, 2005, 5 (1), pp.11-15. hal-00299106
20. https://ru.wikipedia.org/wiki/Мессинское_землетрясение
21. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map/>
22. <https://www.google.ru/maps/>