

УДК 550.34

Омуралиев М., Омуралиева А.
Институт сейсмологии НАН КР,
г. Бишкек, Кыргызстан

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ M_w 7.8 ТУРЦИИ 06.02.2023 г.

Аннотация. Изложены результаты анализа сейсмологических данных - каталога землетрясений USGS с $m_b \geq 2.5$ за 2012-2023 гг. вблизи эпицентральной зоны землетрясения с $M_w=7.8$, произошедшего в Турции 06.02.2023 г., на основании сейсмологических методов изучения сейсмических предвестников землетрясений, разработанных в Институте сейсмологии НАН КР. В результате отмечено, что место - эпицентр ожидаемого землетрясения проявляется внутри (в центре) хроногеома миграции пиков сейсмических циклов; временем ожидаемого землетрясения являются периоды повторения сейсмических циклов разных порядков, также интервалы времени между фазами активизации дифференцированных магнитуд; амплитуда флуктуации кумулятивной сейсмической энергии исследуемой территории указывает на вероятную силу - нижний порог сейсмической энергии ожидаемого сильного землетрясения; конечное положение последнего цикла третьего порядка проявления гипоцентров - глубину ожидаемого землетрясения.

Ключевые слова: землетрясение, ретроспективный анализ, сейсмический предвестник, место, время, сила, глубина, сейсмический цикл, период повторения, интервал времени, кумулятивная сейсмическая энергия.

ТҮРКИЯДА 06.02.2023 БОЛГОН M_w 7.8 ЖЕР ТИТИРӨӨНҮН СЕЙСМИКАЛЫК АЛДЫН АЛА БИЛГИЛЕРИ

Кыскача мазмуну. Сейсмологиялык маалыматтарды – Түркиядагы жер титирөөнүн ($M_w=7.8$, 02/06/2023) тегерегиндеги 2012-2023-жж. болгон USGS $m_b \geq 2.5$ жер титирөөлөрдүн каталогун КРнын УИАнын Сейсмология институтунда иштелип чыккан жер титирөөлөрдүн сейсмикалык алдын ала белгилерин аныктоо сейсмологиялык методдоруна негизделген талдоонун натыйжалары берилген. Натыйжада, күтүлүп жаткан жер титирөөнүн орду - эпицентри сейсмикалык циклдердин чокуларынын миграциясынын хроногеомунун ичинде (борборунда) пайда болоору белгиленген; күтүлүп жаткан жер титирөөнүн убактысы – ар кандай тартиптеги сейсмикалык циклдердин кайталануу мезгили, ошондой эле дифференцияланган магнитудалардын активдешүү фазаларынын ортосундагы убакыт аралыгы болуп эсептелинет; изилденип жаткан аймактын кумулятивдүү (топтолмо) сейсмикалык энергиясынын флуктуациянын амплитудасы болжолдуу күчтүү - күтүлүп жаткан күчтүү жер титирөөнүн сейсмикалык энергиясынын төмөнкү босогосун көрсөтөт; гипоцентрлердин көрүнүшүнүн үчүнчү иретинин акыркы циклинин акыркы абалы - күтүлүп жаткан жер титирөөнүн тереңдиги деп эсептелинет.

Негизги сөздөр: жер титирөө, ретроспективдүү анализ, сейсмикалык алдын ала белги, жер титирөөнүн орду, убакыт, күч, тереңдик, сейсмикалык цикл, кайталануу мезгили, убакыт аралыгы, кумулятивдүү (топтолмо) сейсмикалык энергиясы.

SEISMIC PRECURSORS OF THE M_w 7.8 TURKEY EARTHQUAKE 2023/02/06

Abstract. The results of the analysis of seismological data - the USGS catalog for 2012-2023 with $m_b \geq 2.5$ earthquakes near the epicentral zone of the $M_w7.8$ earthquake occurred in Turkey in 2023/02/06, which based on seismological methods for studying seismic precursors of

earthquakes, that developed at the Institute of Seismology NAS KR, are presented. It is noted that the location - the epicenter of an expected earthquake appears inside (in the center) of the chronogeome of the seismic cycles' peaks migration; time of an expected earthquake is the repetition periods of seismic cycles of different orders, as well as the time intervals between the activation phases of differentiated magnitudes; the amplitude of the cumulative seismic energy's fluctuations of the study area indicates the probable strength - the lower threshold of seismic energy of an expected strong earthquake; the final position of the last cycle of the third order of the hypocenters' manifestation is the depth of an expected earthquake.

Keywords: earthquake, retrospective analysis, seismic precursor, location, time, strength, depth, seismic cycle, repetition period, time interval, cumulative seismic energy.

Введение. Практически после проявления сильных землетрясений на территории разных стран мира мы становимся свидетелями того, что на современном этапе сейсмологии у нас слабые возможности определения таких предвестников, как времени, интенсивности и места сильных землетрясений, кроме выделения зон ВОЗ при мелкомасштабном и детальном сейсмическом районировании и многие надеются на сейсмостойкое строительство. Однако при сильных землетрясениях образуются разломы с крупными подвижками, они сопровождаются чрезмерно сильными движениями грунтов и другими длительными нелинейными процессами, при которых не хватает запасов прочности зданий и сооружений. Существует крайняя необходимость определения сейсмических предвестников сильных землетрясений для поэтапного (месячного, квартального и годового) предупреждения людей.

Методика исследования и данные

Исходным данным наших исследований является каталог землетрясений USGS за 2012-2023 гг. в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^{\circ}-43^{\circ}$, $\lambda=11^{\circ}-63^{\circ}$, в пределах эпицентральной зоны землетрясения с $M_w=7.8$, произошедшего в Турции 06.02.2023 г. на сочленении литосферных плит: Евразийской (на севере), Африканской, Аравийской, Индийской (на юге) и Анатолийской микроплиты.

Следует отметить, что в Институте сейсмологии НАН КР в 2011 г. были разработаны сейсмологический метод определения предвестников и способы прогноза землетрясений [1, 2, 3] с учётом имеющегося мирового опыта. Данный способ включает следующие основные действия:

- осуществлять слежение за последовательностью землетрясений за сутки, месяцы, годы и составлять их графики;
- выделять поэтапно пики сейсмической активизации, периоды (фазы) спада сейсмической активизации, периоды (фазы) затишья, периоды (фазы) новой сейсмической активизации до наступления пика в каждом цикле от высших порядков до первого;
- измерить периоды повторения сейсмических циклов разного порядка;
- вычислять тренд каждого сейсмического цикла нелинейными полиномами с наибольшими достоверностями аппроксимации;
- вычислять кумулятивную сейсмическую энергию и составлять графики накопления этой энергии, проводить нижние и верхние пределы флуктуации, а также линейные и нелинейные тренды накопления;
- составить карту-схему распределения эпицентров землетрясений в пространстве и во времени, динамических сегментов отдельного взятого активного разлома и динамических секторов группы активных разломов;
- составить карту-схему распределения гипоцентров землетрясений во времени и вертикальных цепочек (роев) гипоцентров перед крупными землетрясениями.

Данный подход определения сейсмических предвестников землетрясений был апробирован и уточнён на примере ряда крупных землетрясений Тянь-Шаня (таблица 1).

Таблица 1. Перечень землетрясений, на примере которых были апробированы предложенные способы [3].

| № пп | Число, месяц, год | Широта, градус | Долгота, градус | Mw |
|------|-------------------|----------------|-----------------|-----|
| 1. | 24.02.2003 | 39.137 | 77.163 | 6.8 |
| 2. | 14.02.2005 | 41.850 | 79.460 | 6.8 |
| 3. | 08.01.2006 | 39.700 | 70.350 | 6.7 |
| 4. | 05.10.2008 | 39.616 | 73.666 | 6.7 |
| 5. | 19.07.2011 | 40.117 | 71.417 | 6.1 |
| 6. | 28.01.2013 | 42.600 | 79.600 | 6.8 |
| 7. | 25.11.2016 | 39.170 | 73.950 | 7.1 |

Данный подход определения сейсмических предвестников землетрясений также был апробирован и уточнён на примере ряда крупных землетрясений, произошедших в разных частях Земли, по данным USGS [4, 5, 6, 7, 8, 9]: Азии (например, землетрясение Непал, M=7.8, 25.04.2015); Северной Америки (например, Мексика, M=8.1, 08.09.2017), Южной Америки (например, землетрясение Чили, M=8.3, 16.09.2015).

Эти сейсмологические эксперименты показали, что рассматриваемый подход может быть широко использован в практике для своевременного предупреждения ожидаемого землетрясения и спасения жизни людей.

Анализ поведения литосферных плит (таких как Евразийская, Индийская, Африканская, Аравийская) показал, что сильные землетрясения приурочены к зонам их сочленения, в частности сильные землетрясения Турции возникают в зонах сочленения Анатолийской плиты с Евразийской плитой на севере, с Аравийской плитой на юго-западе и Африканской – на юге (рисунок 1).

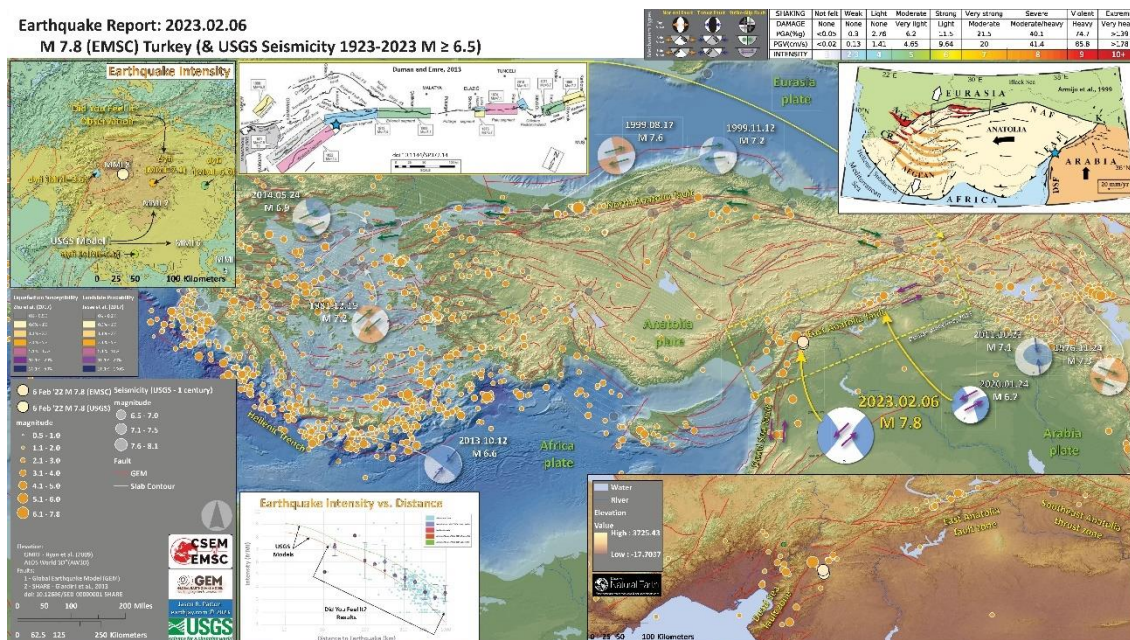


Рисунок 1. Схема сочленения Анатолийской плиты с Евразийской, Аравийской и Африканской плитами, сейсмичность и активные структуры региона.

Карты-схемы эпицентров землетрясений с $m_b \geq 5.0$ и $m_b=2.5-5$ по данным USGS в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^\circ-43^\circ$, $\lambda=11^\circ-63^\circ$, за 2012-2023 гг. показаны на рисунках 2 (а, б). Эпицентральные зоны этих землетрясений в областях сочленения Евразийской плиты с Африканской и Аравийской плитами широкие, а в областях сочленения Аравийской плиты с Африканской и Индийской плитами сравнительно узкие.

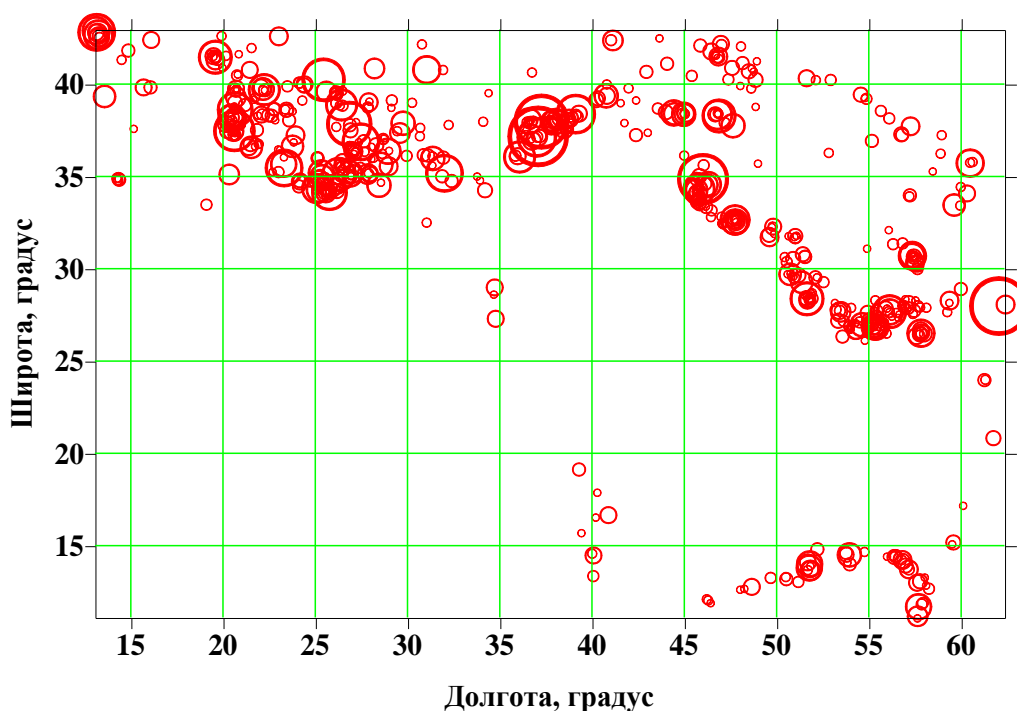


Рисунок 2 (а). Карта - схема распределения эпицентров землетрясений с $m_b \geq 5.0$ на территории в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^\circ-43^\circ$, $\lambda=11^\circ-63^\circ$, по данным USGS за 2012-2023 гг. в пределах эпицентральной зоны землетрясения с $M_w=7.8$, произошедшего в Турции 06.02. 2023 г. на сочленении литосферных плит: Евразийской (на севере), Африканской, Аравийской (на юге), Индийской (на юго-востоке). Кружочками красного цвета обозначены землетрясения.

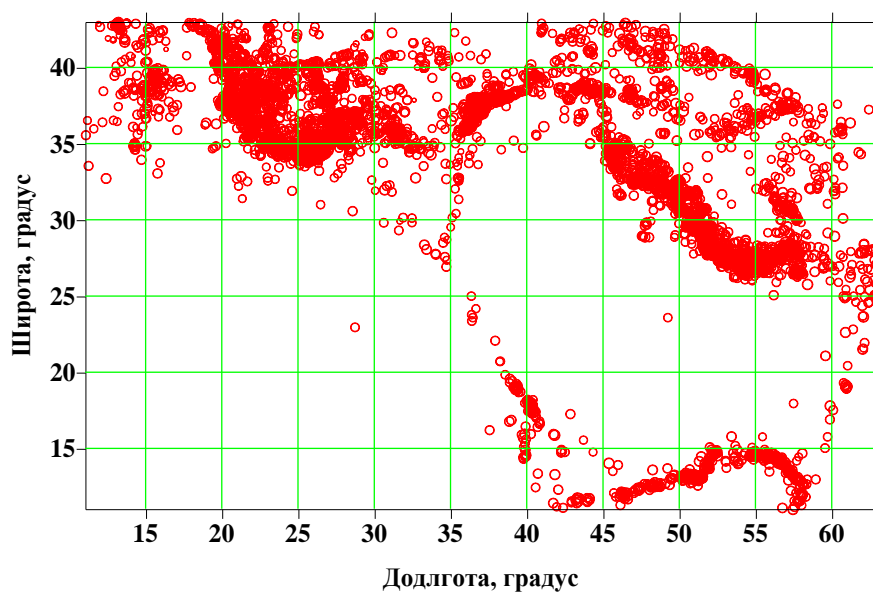


Рисунок 2 (б). Карта-схема распределения эпицентров землетрясений $m_b=2.5-5.0$ на территории в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^\circ-43^\circ$, $\lambda=11^\circ-63^\circ$, по данным

USGS за 2012-2023 гг. в пределах эпицентральной зоны землетрясения с $M_w=7.8$, произошедшего в Турции 06.02. 2023 г. на сочленении литосферных плит: Евразийской (на севере), Африканской, Аравийской (на юге), Индийской (на юго-востоке). Кружочками красного цвета обозначены землетрясения $m_b=2.5-5.0$.

На рисунке 3 показано распределение во времени эпицентров землетрясений с $m_b \geq 2.5$ и миграция ощутимых событий ($M_w \geq 6.5$) вдоль долготы $\lambda=11^\circ-63^\circ$ территории исследования за 2012-2023 гг. Наблюдаются частые проявления таких событий в районах между долготами $\lambda=20^\circ-30^\circ$ и $\lambda=40-60^\circ$, и редкие проявления в районах $\lambda=11^\circ-20^\circ$ и $\lambda=30^\circ-40^\circ$.

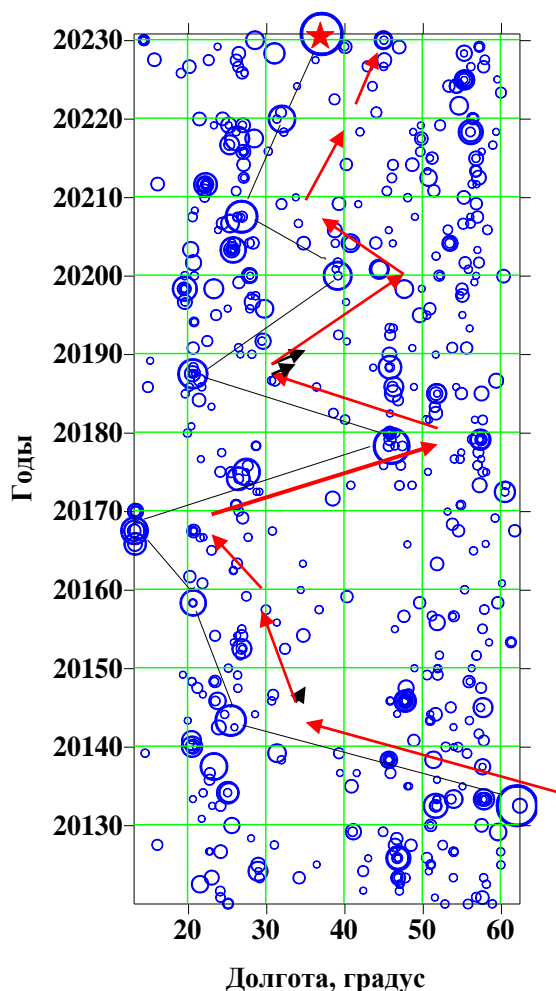


Рисунок 3. Распределение во времени эпицентров землетрясений с $m_b \geq 2.5$ и миграция ощутимых событий ($M_w \geq 6.5$) вдоль долготы $\lambda=11^\circ-63^\circ$ территории исследований по данным USGS за 2012-2023 гг. Эпицентры обозначены кружочками, стрелкам красного цвета – направление и скорость миграции землетрясений с $M_w \geq 6.5$.

Результаты слежения последовательности землетрясений с $m_b \geq 2.5$ по данным USGS в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^\circ-43^\circ$, $\lambda=11^\circ-63^\circ$, за 2012-2023 гг. приведены на рисунке 4. На графике последовательности проявления землетрясений выделяются иерархии сейсмических циклов (рисунок 5). Так, при $m_b \geq 5.7$ отмечаются пики сейсмической активизации, фазы спада сейсмической активизации, фазы затишья и фазы наступления сейсмической активизации третьего порядка. По пикам сейсмической активизации этого цикла $m_b \geq 6.5$ проводится график цикла второго порядка, а именно пики сейсмической активизации, фазы спада сейсмической активизации, фазы затишья и фазы наступления сейсмической активизации. Далее, по

пикам сейсмической активизации второго цикла $m_b \geq 7.0$ проводится график цикла первого порядка, а именно пики сейсмической активизации, фазы спада сейсмической активизации, фазы затишья и фазы наступления сейсмической активизации.

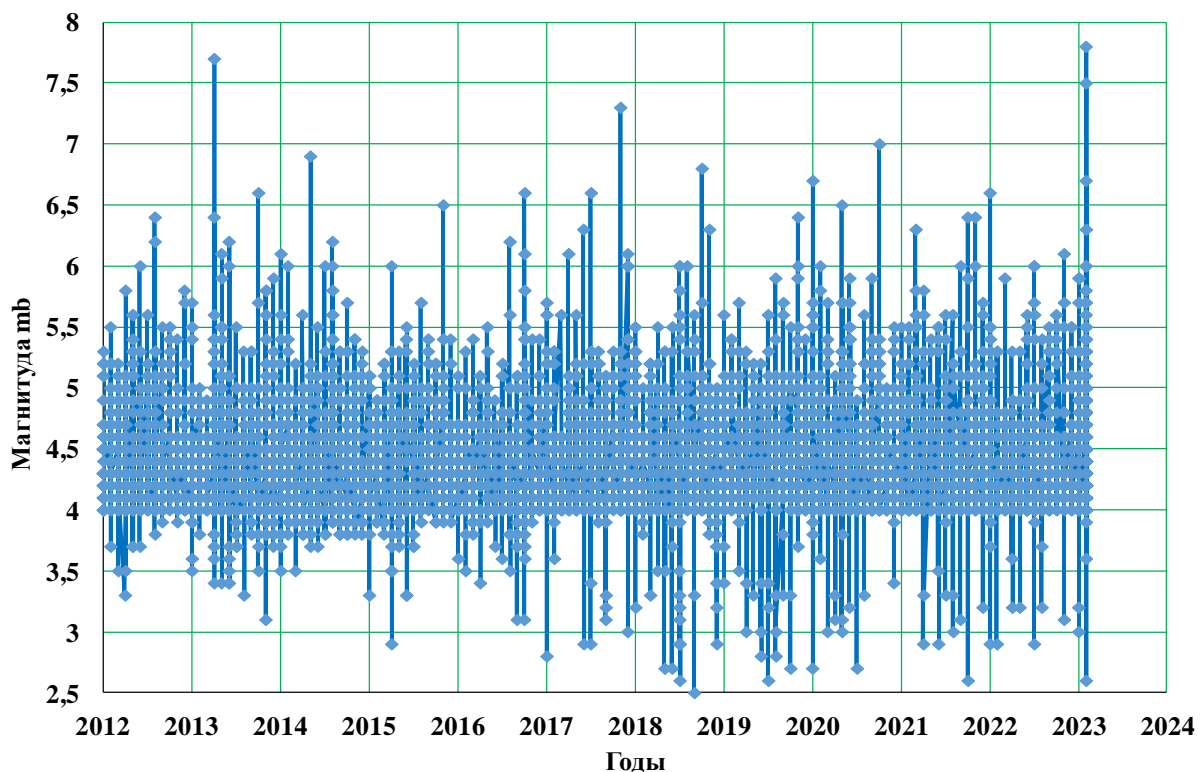


Рисунок 4. График последовательности землетрясений с $m_b \geq 2.5$ по данным USGS в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^\circ- 43^\circ$, $\lambda=11^\circ- 63^\circ$, за 2012-2023 гг.

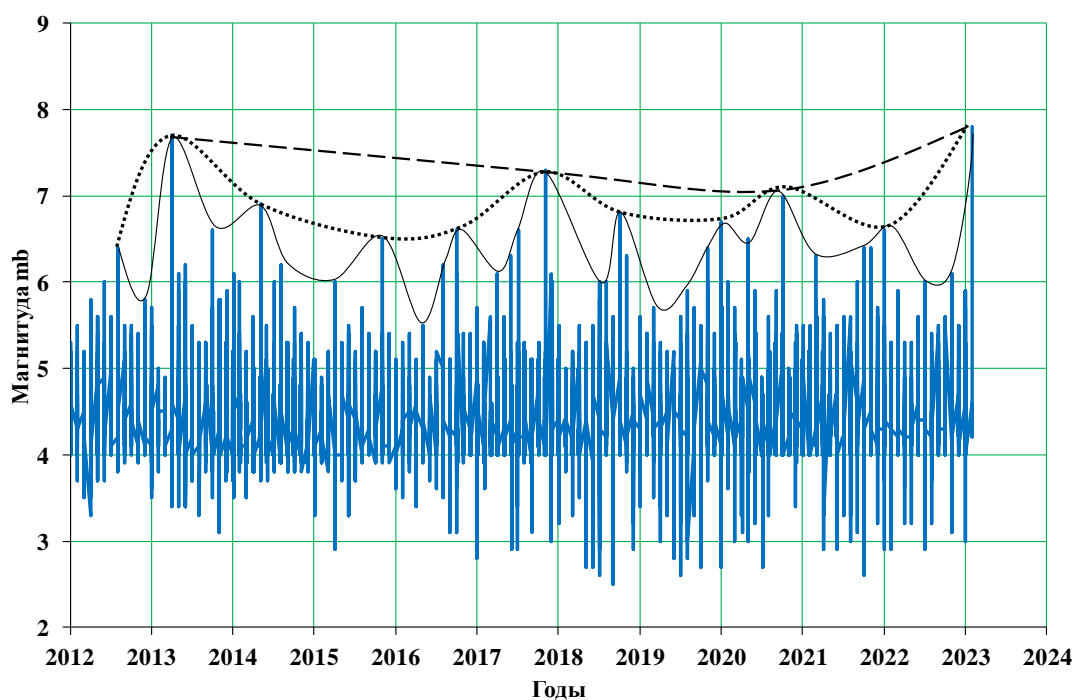


Рисунок 5. Иерархия сейсмических циклов, проявленных в последовательности землетрясений с $m_b \geq 2.5$ по данным USGS, в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^\circ- 43^\circ$, $\lambda=11- 63^\circ$, за 2012-2023 гг. Циклы третьего порядка обозначены сплошной

линией, циклы второго порядка- точечной линией, циклы первого порядка- пунктирной линией.

Пики и периоды повторения сейсмических циклов третьего, второго и первого порядков на территории исследования в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^{\circ}-43^{\circ}$, $\lambda=11^{\circ}-63^{\circ}$, за 2012-2023 гг. приведены в таблице 2.

Таблица 2. Пики сейсмических циклов третьего порядка.

| № пп | Год | месяц | число | час | Магнитуда | Время, год | Период повторения, год |
|------|------|-------|-------|-----|-----------|-------------|------------------------|
| 1. | 2013 | 4 | 16 | 10 | 7.7 | 2013.253422 | |
| 2. | 2014 | 5 | 24 | 9 | 6.9 | 2014.338579 | 1.08 |
| 3. | 2015 | 11 | 17 | 7 | 6.5 | 2015.836983 | 1.50 |
| 4. | 2016 | 10 | 30 | 6 | 6.6 | 2016.756613 | 0.92 |
| 5. | 2017 | 11 | 12 | 18 | 7.3 | 2017.835845 | 1.02 |
| 6. | 2018 | 10 | 25 | 22 | 6.8 | 2018.755776 | 0.92 |
| 7. | 2020 | 1 | 24 | 17 | 6.7 | 2020.005247 | 1.25 |
| 8. | 2020 | 10 | 30 | 11 | 7.0 | 2020.756614 | 0.75 |
| 9. | 2022 | 1 | 11 | 1 | 6.6 | 2022.00228 | 1.25 |
| 10. | 2023 | 2 | 6 | 1 | 7.8 | 2023.084474 | 1.08 |

Пики сейсмических циклов второго порядка

| № пп | Год | месяц | число | час | Магнитуда | Время, год | Период повторения, год |
|------|------|-------|-------|-----|-----------|-------------|------------------------|
| 1. | 2013 | 4 | 16 | 10 | 7.7 | 2013.253422 | |
| 2. | 2017 | 11 | 12 | 18 | 7.3 | 2017.835845 | 4.58 |
| 3. | 2020 | 10 | 30 | 11 | 7.0 | 2020.756614 | 3.40 |
| 4. | 2023 | 2 | 6 | 1 | 7.8 | 2023.084474 | 2.32 |

Пики сейсмического цикла первого порядка

| № пп | Год | месяц | число | час | Магнитуда | Время, год | Период повторения, год |
|------|------|-------|-------|-----|-----------|-------------|------------------------|
| 1. | 2013 | 4 | 16 | 10 | 7.7 | 2013.253422 | |
| 2. | 2023 | 2 | 6 | 1 | 7.8 | 2023.084474 | 9.8 |

Следовательно, на основании значений периодов повторения (таблица 2) можно сказать, что время ожидаемого землетрясения на рассматриваемой территории по сейсмическим циклам третьего порядка составляет 0.75-1.50 года; по циклам второго порядка -2.3-4.6 лет; по циклам первого порядка – порядка 9.8 лет.

На рисунке 6, в качестве примера, приведены сейсмические циклы четвёртого порядка за 01.11.2022 г. - 06.02.2023 г. по момент главного толчка с $M_w=7.8$.

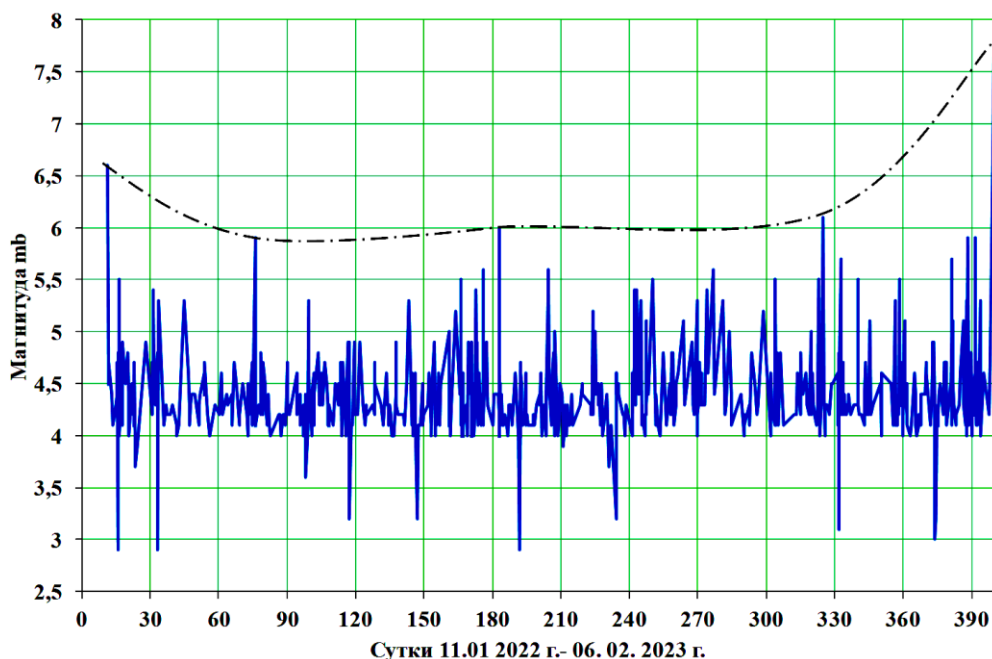


Рисунок 6. Сейсмические циклы четвертого порядка за 01.11.2022 г.- 06.02.2023 г. по момент главного толчка с $M_w=7.8$.

Пики и периоды повторения сейсмических циклов четвертого порядка на территории исследования в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^\circ-43^\circ$, $\lambda=11^\circ-63^\circ$, за 01.11.2022 г.- 06.02.2023 г. приведены в таблице 3.

Таблица 3. Пики и периоды повторения сейсмических циклов четвертого порядка.

| № пп | год | месяц | число | час | Магнитуда пика | Время, сутки | Период повторения, сутки |
|------|------|-------|-------|-----|----------------|--------------|--------------------------|
| 1. | 2022 | 1 | 11 | 1 | 6.6 | 11.63472 | |
| 2. | 2022 | 3 | 16 | 23 | 5.9 | 75.96875 | 64.33 |
| 3. | 2022 | 7 | 1 | 21 | 6.0 | 182.89722 | 106.89 |
| 4. | 2022 | 11 | 23 | 1 | 6.1 | 325.04722 | 142.18 |
| 5. | 2023 | 2 | 6 | 1 | 7.8 | 400.05347 | 75.00 |

Из таблицы 3 следует, что вероятное время ожидаемого землетрясения по периодам повторения сейсмических циклов четвертого порядка составляет 64-142 суток.

Изменение магнитуды пиков за 11.01.2022 г.- 23.11.2022 г. выражается формулой:

$$M_w=2E-05t^2-0.0068t+6.5, R^2=0.70, \quad (1)$$

где M_w - магнитуда, t - сутки (от 11 до 325), R^2 - достоверность аппроксимации. Из формулы (1) следует, что при магнитуде до $M_w=7.8$ получаем «виртуальное время» $t_v=480$ суток, когда реальное время порядка $t_r=400$ суток. Отношение $480/400=1.2$ представляет собой (в дальнейшем можно назвать) «коэффициент сокращения времени», которое, вероятно, обусловлено ускорением развития тектонофизических процессов в исследуемой области. Изменение магнитуды пиков за 11.01.2022 г.- 06.02.2022 г. до главного толчка с $M_w=7.8$ выражается формулой:

$$M_w=1E-9t^4-1E-06t^3+0.0002t^2-0.0226t+6.6, R^2=1, \quad (2)$$

где M_w - магнитуда, t - сутки (от 11 до 400), R^2 - достоверность аппроксимации.

На рисунке 7 приведены в качестве примера сейсмические циклы пятого порядка за 23.11.2022 г.- 06.02.2023 г. (0-75 суток) до главного толчка.

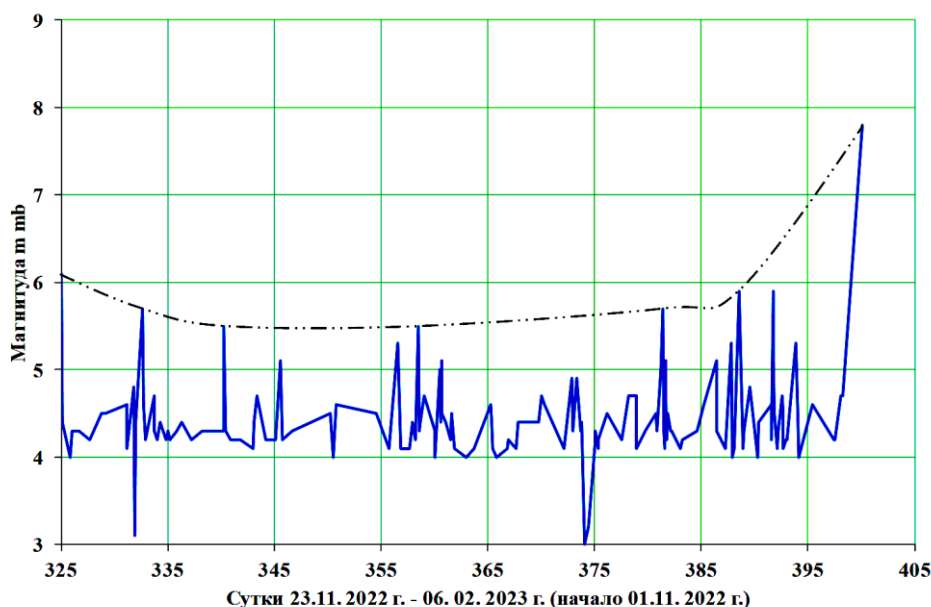


Рисунок 7. Сейсмические циклы пятого порядка за 23.11.2022 г.- 06.02.2023 г. по момент главного толчка с $M_w=7.8$.

Пики и периоды повторения сейсмических циклов пятого порядка на территории исследования в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^{\circ}-43^{\circ}$, $\lambda=11^{\circ}-63^{\circ}$, за 23.11.2022 г.- 06.02.2023 г. приведены в таблице 4.

Таблица 4. Пики и периоды повторения сейсмических циклов пятого порядка.

| № пп | Год | месяц | число | Магнитуда пика | Время, сутки | Период повторения, сутки |
|------|------|-------|-------|----------------|--------------|--------------------------|
| 1. | 2022 | 11 | 23 | 6.1 | 325.047 | |
| 2. | 2023 | 11 | 30 | 5.7 | 332.636 | 7.67 |
| 3. | 2023 | 12 | 18 | 5.5 | 340.279 | 7.56 |
| 4. | 2022 | 12 | 2326 | 5.5 | 358.514 | 18.23 |
| 5. | 2023 | 1 | 618 | 5.7 | 381.422 | 22.90 |
| 6. | 2023 | 1 | 25 | 5.9 | 388.525 | 7.10 |
| 7. | 2023 | 1 | 6 | 7.8 | 400.053 | 11.52 |

Из таблицы 4 следует, что вероятное время ожидаемого землетрясения по периодам повторения сейсмических циклов составляет 7.1-22.9 суток.

Изменение пиков сейсмических циклов пятого порядка (рисунок 7) за 23.11.2022 г.- 25.01.2023 г., т.е. за 7.67-63.47 суток выражается формулой:

$$mb = 4E-07t^4 - 6E-05t^3 + 0.00315t^2 - 0.075t + 6.1, R^2 = 0.99 \quad (3)$$

где mb – магнитуда, t – сутки, R^2 – достоверность аппроксимации. Из формулы (3) следует, что при магнитуде до $M_w=7.8$ получаем «виртуальное время» $t_v=84$ суток, когда реальное время порядка $t_p=75$ суток. Отношение $84/75=1.12$ представляет собой «коэффициент сокращения времени».

Изменение магнитуды пиков за 01.11.01.2022 г.- 01.06.02.2022 г. до главного толчка с $M_w=7.8$ описывается формулой:

$$M_w = 2E-10t^5 + 2E-07t^4 - 5E-05t^3 + 0.003t^2 - 0.0074t + 6.1, R^2 = 0.99 \quad (4)$$

где M_w – магнитуда, t – сутки (от 0 до 75), R^2 – достоверность аппроксимации.

Пространственное (географическое) расположение циклов третьего порядка приведено в таблице 5.

Таблица 5. Пространственное (географическое) расположение пиков циклов третьего порядка.

| № пп | год | месяц | число | час | Магнитуда | Долгота, градус | Широта, градус | Место расположения |
|------|------|-------|-------|-----|-----------|-----------------|----------------|----------------------|
| 1. | 2013 | 4 | 16 | 10 | 7.7 | 61.996 | 28.033 | Иран |
| 2. | 2014 | 5 | 24 | 9 | 6.9 | 25.3889 | 40.2893 | Север Эгейского моря |
| 3. | 2015 | 11 | 17 | 7 | 6.5 | 20.6 | 38.67 | Греция |
| 4. | 2016 | 10 | 30 | 6 | 6.6 | 13.0961 | 42.8621 | Италия |
| 5. | 2017 | 11 | 12 | 18 | 7.3 | 45.9592 | 34.9109 | Ирак |
| 6. | 2018 | 10 | 25 | 22 | 6.8 | 20.5565 | 37.5203 | Ионическое море |
| 7. | 2020 | 1 | 24 | 17 | 6.7 | 39.0609 | 38.4312 | Турция, Малатия |
| 8. | 2020 | 10 | 30 | 11 | 7.0 | 26.7838 | 37.8973 | Восточнее Афины |
| 9. | 2022 | 1 | 11 | 1 | 6.6 | 31.9435 | 35.2267 | Западнее Кипра |

Важно рассмотреть миграцию пиков циклов третьего порядка на территории исследования (рисунок 8). После Иранского землетрясения ($M_w=7.7$, $\varphi=28.033^\circ$, $\lambda=61.996^\circ$) на сочленении Индийской и Евразийской плит пик цикла отмечался на северной части Эгейского моря ($\varphi=40.2893^\circ$, $\lambda=25.3889^\circ$) на сочленении Евразийской и Африканской плит. Соответственно, наблюдалась миграция в северо-западном направлении. Далее, пик цикла проявился в Греции ($\varphi=38.67^\circ$, $\lambda=20.6^\circ$) также на сочленении Евразийской и Африканской плит, миграция направлена на юго-запад. В последствии, миграция направлена на северо-запад, пик проявился на территории Италии ($\varphi=42.8621^\circ$, $\lambda=13.0961^\circ$). Следующий пик проявился на территории Ирака ($\varphi=34.9109^\circ$, $\lambda=45.9592^\circ$) на сочленении Евразийской и Аравийской плит, т.е. миграция была направлена на юго-восток. После пик наблюдался в Ионическом море ($\varphi=37.5203^\circ$, $\lambda=20.5565^\circ$) на сочленении Евразийской и Африканской плит, и миграция пика данного цикла направлена на северо-запад. Следующий пик отметился на сочленении Аравийской и Анатолийской плит на территории Турции (Малатия) и завершился своеобразный сейсмологический хроногеом- «вихрь», направленный по часовой стрелке с 04.2013 г. по 01.2020 г. 30.10.2020 г. произошёл очередной пик цикла третьего порядка в Эгейском море восточнее Афины ($\varphi=37.8973^\circ$, $\lambda=26.7838^\circ$), наблюдалась миграция в юго-западном направлении против часовой стрелки. 01.11.2022 г. проявился пик западнее Кипра ($\varphi=35.2267^\circ$, $\lambda=31.9435^\circ$), где миграция была направлена на юго-восток. Далее 06.02.2023 г. произошёл главный толчок сильного землетрясения с $M_w=7.8$ на сочленении Аравийской и Анатолийской плит, когда миграция была направлена на северо-восток, где замкнулся сейсмический против часовой хроногеом – «вихрь».

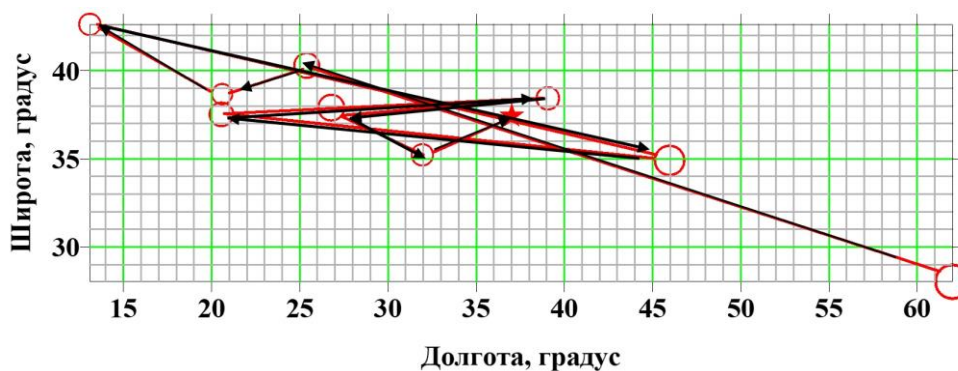


Рисунок 8. Миграция эпицентров пиков ($m_b \geq 6.5$) сейсмических циклов третьего порядка в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^\circ-43^\circ$, $\lambda=11^\circ-63^\circ$, за 2012-2023 гг.

Землетрясения на пиках сейсмических циклов обозначены кружочками, звёздочкой обозначен эпицентр землетрясения с $M_w=7.8$, произошедшего в Турции 06.02.2023, направления миграции обозначены стрелками чёрного цвета.

На рисунке 9 приведена миграция пиков сейсмических циклов пятого порядка за 23.11.2022 г. - 06.02.2023 г. (т.е. за 7.67-63.47 суток). Как видно из рисунка, миграция за 23.11.2022 г. - 26.12.2022 г. направлена против часовой стрелки, а с 18.01.2023 г. - миграция направлена по часовой стрелке. Эпицентр землетрясения с $M_w=7.8$ проявился внутри хроногеома пиков циклов пятого порядка.

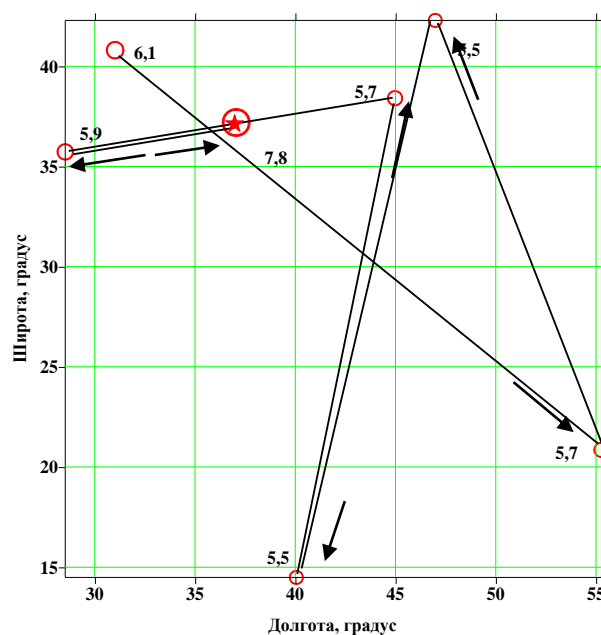


Рисунок 9. Миграция пиков сейсмических циклов пятого порядка за 23.11.2022 г.-06.02.2023 г. (т.е. за 7.67-63.47 суток). Кружочками обозначены эпицентры пиков циклов, стрелками - направление миграции, звёздочкой - эпицентр землетрясения с $M_w=7.8$.

Для определения предвестников времени проявления сильного землетрясения важно изучение изменения частоты проявления дифференцированных классов магнитуд землетрясений. На рисунках 10, 11, 12 приведена частота землетрясений с $m_b=3.6-4.5$, $4.6-5.5$, $5.6-6.5$ в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^\circ-43^\circ$, $\lambda=11^\circ-63^\circ$, за 2022-2023 гг.

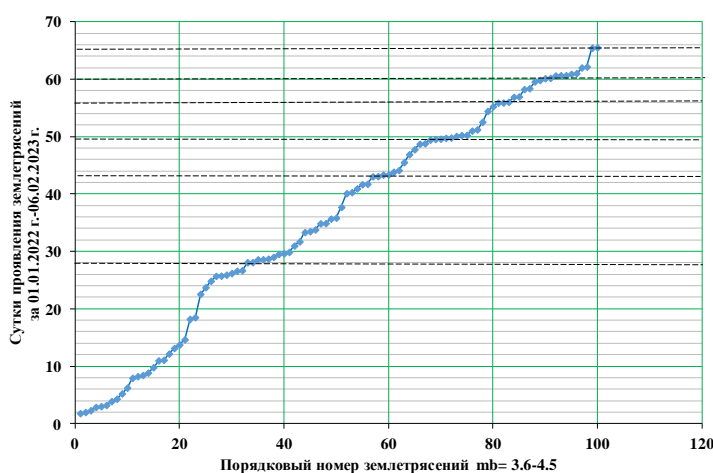


Рисунок 10. График частоты проявления землетрясений с $m_b=3.6-4.5$ в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^\circ-43^\circ$, $\lambda=11^\circ-63^\circ$, за 2022-2023 гг. перед землетрясением с $M_w=7.8$, произошедшего в Турции 06.02.2023 г.

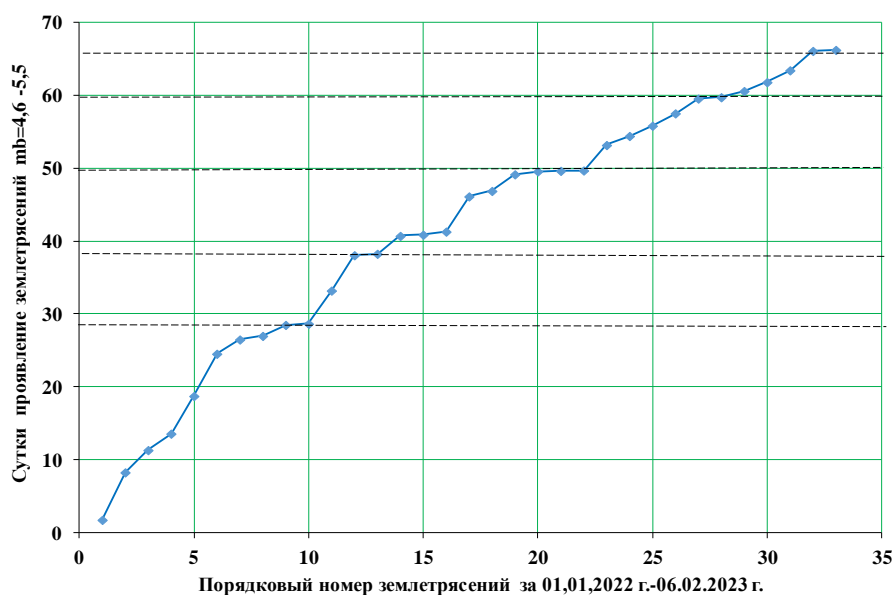


Рисунок 11. График частоты проявления землетрясений с $mb=4.6-5.5$ в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^{\circ}-43^{\circ}$, $\lambda=11^{\circ}-63^{\circ}$, за 2022-2023 гг. перед землетрясением с $M_w=7.8$, произошедшего в Турции 06.02.2023 г.

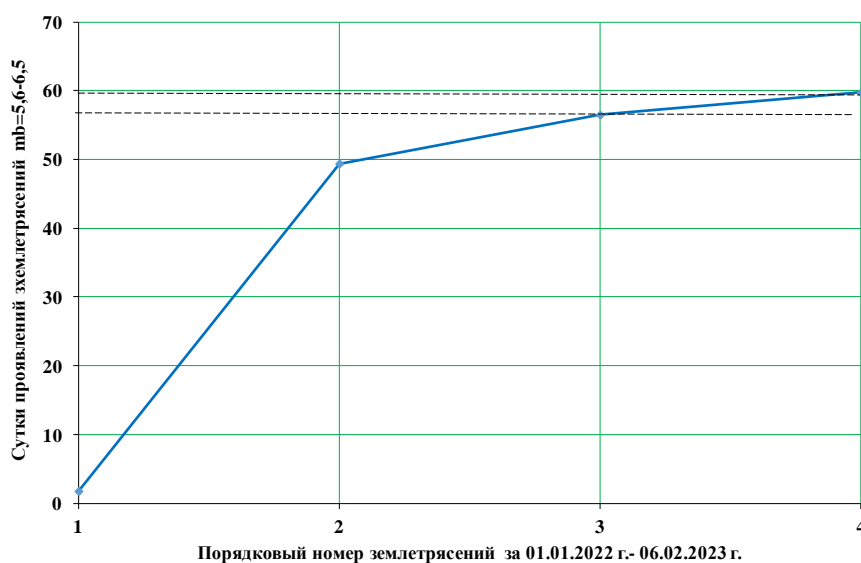


Рисунок 12. График частоты проявления землетрясений с $mb=5.6-6.5$ в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^{\circ}-43^{\circ}$, $\lambda=11^{\circ}-63^{\circ}$, за 2022-2023 гг. перед землетрясением с $M_w=7.8$, произошедшего в Турции 06.02.2023 г.

Для определения предвестников вероятной энергии и времени ожидаемого сильного землетрясения важно слежение накопления кумулятивной сейсмической энергии. Для этого определена сейсмическая энергия E (эрг) на основе формулы Гутенберга-Рихтера [10] через магнитуду mb :

$$\lg E = 5.8 + 2.4 mb. \quad (5)$$

На рисунке 13 приведена кумулятивная сейсмическая энергия, высвобожденная при землетрясениях с $mb \geq 2.5$ в окрестностях землетрясения с $M_w=7.8$ (06.02.2023 г.) в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^{\circ}-43^{\circ}$, $\lambda=11^{\circ}-63^{\circ}$, по данным USGS за 2012-2023 гг.

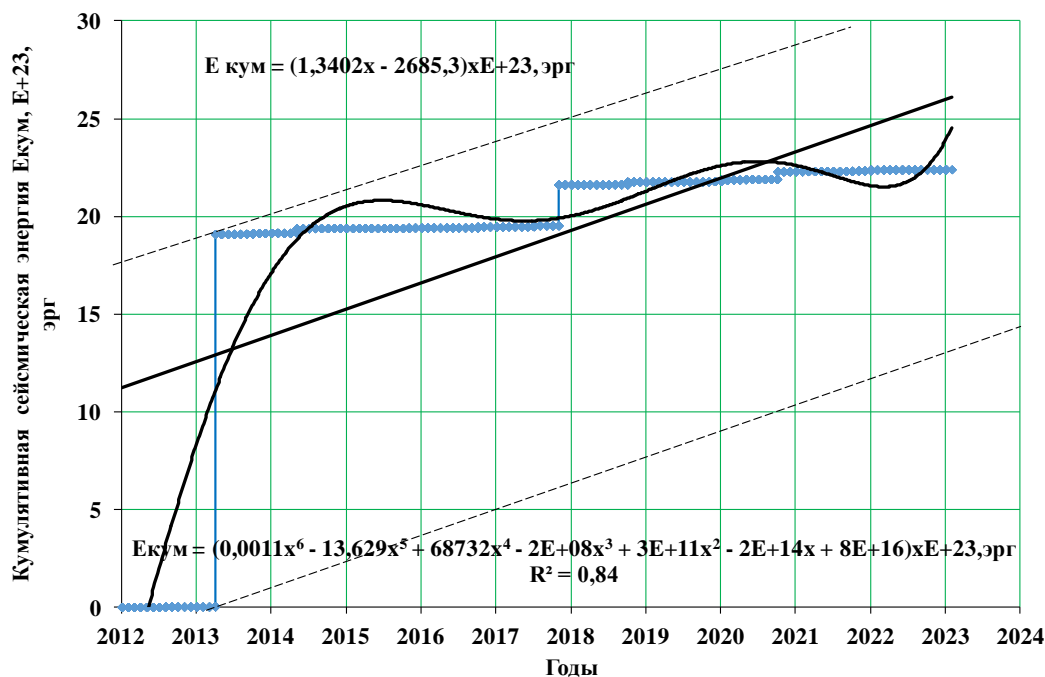


Рисунок 13. Кумулятивная сейсмическая энергия, высвобожденная при землетрясениях с $m_b \geq 2.5$ в окрестностях землетрясения $M_w=7.8$ (06.02.2023 г.) в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^\circ-43^\circ$, $\lambda=11^\circ-63^\circ$, по данным USGS за 2012-2023 гг. Пунктирными параллельными линиями обозначены пределы флуктуации, сплошной прямой линией - линейный тренд, кривой линией - полиномиальный тренд кумулятивной сейсмической энергии.

График кумулятивной сейсмической энергии ($E_{\text{кум}}$) неровный, что выражает иерархию сейсмических циклов. Нижний и верхний пределы флуктуации ограничиваются парой параллельных прямых. Нелинейный тренд $E_{\text{кум}}$ выражается полиномом шестой степени:

$$E_{\text{кум}} = (0,0011t^6 - 13,629t^5 + 68732t^4 - 2E+08t^3 + 3E+11t^2 - 2E+14t + 8E+16) \times 10^{23}, R^2 = 0,84 \quad (6),$$

где $E_{\text{кум}}$ – кумулятивная сейсмическая энергия (эрг), t - год, R^2 – достоверность аппроксимации. Линейный тренд её описывается формулой:

$$E_{\text{кум}} = (1.3402t - 2685.3) \times 10^{23}, \text{ эрг} \quad (7)$$

где $E_{\text{кум}}$ – кумулятивная сейсмическая энергия (эрг), t -год, коэффициент 1.3402×10^{23} имеет размерность эрг/год и представляет собой скорость накопления сейсмической энергии. Следует отметить, что амплитуда флуктуации кумулятивной сейсмической энергии исследуемой территории (порядка 1.9×10^{24} эрг) означает нижний порог сейсмической энергии ожидаемого сильного землетрясения. Конечное положение полиномиального тренда шестой степени во времени указывает на время ожидаемого землетрясения - начало февраля 2023 г.

Важно отметить, что на основе слежения гипоцентров можно оценить вероятные глубину и время ожидаемого сильного землетрясения. На рисунке 14 показано распределение землетрясений во времени и по глубинам по данным USGS за 2012-2023 гг. Как видно из рисунка, землетрясения исследуемой территории проявлены на глубинах до 500 км. Гипоцентры сильных землетрясений с $M_w=7.7$ (16.04.2013 г.), $M_w=7.3$ (12.11.2017 г.) и $M_w=7.8$ (03.02.2023 г.) произошли на глубинах 80 км, 19 км и 10 км, соответственно (рисунок 15).

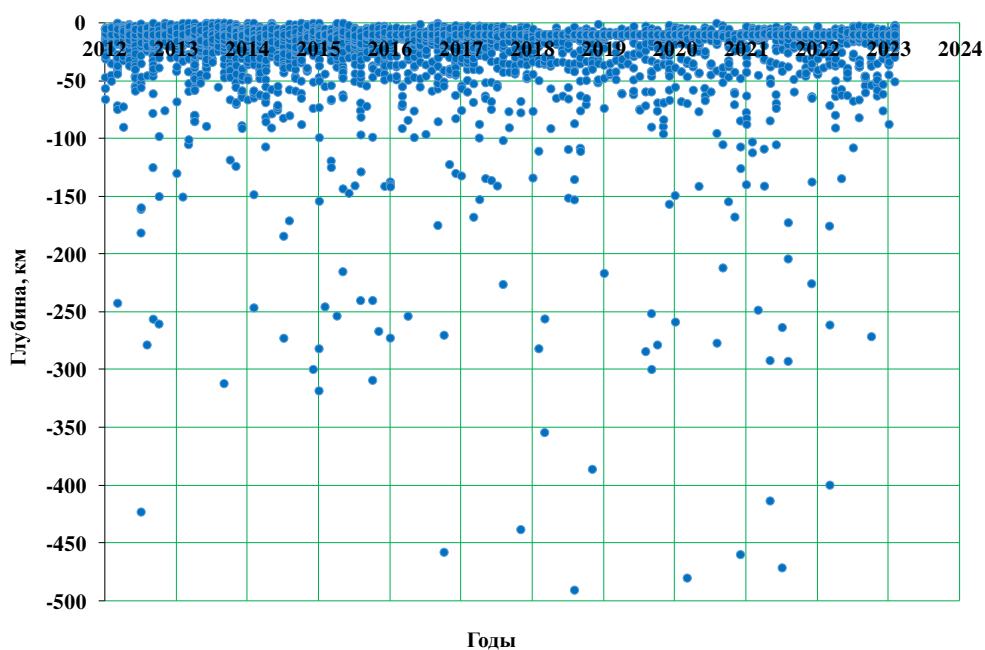


Рисунок 14. Распределение землетрясений во времени и по глубинам в квадрате, ограниченном координатами $\varphi=11^{\circ}-43^{\circ}$, $\lambda=11^{\circ}-63^{\circ}$, по данным USGS за 2012-2023 гг. Кружочками обозначены гипоцентры.

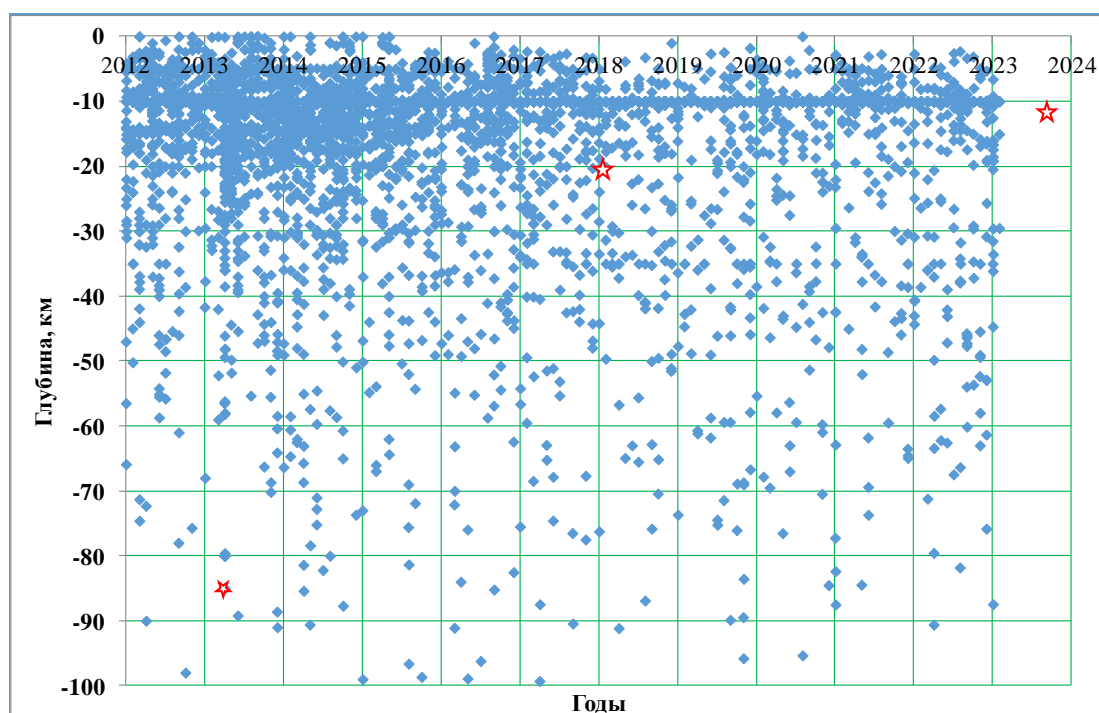


Рисунок 15. Распределение землетрясений во времени и по глубинам (0-100 км) по данным USGS за 2012-2023 гг. Звёздочками обозначены гипоцентры сильных землетрясений с $M_w=7.7$ (16.04.2013 г.), $M_w=7.3$ (12.11.2017 г.) и $M_w=7.8$ (03.02.2023 г.), произошедшие на глубинах 80 км, 19 км и 10 км.

В последовательности проявления гипоцентров перед главным толчком землетрясения $M_w=7.7$ (Иран) отмечается иерархия гипоцентральных циклов (рисунок 16). Периоды повторения, например, цикла третьего порядка составляет 15-38 суток, четвёртого порядка 5-12 суток. Соответственно, время данного землетрясения составляло порядка восьми суток. Конечное положение последнего цикла третьего

порядка принимает значение 80 км, что есть глубина гипоцентра землетрясения с $M_w=7.7$.

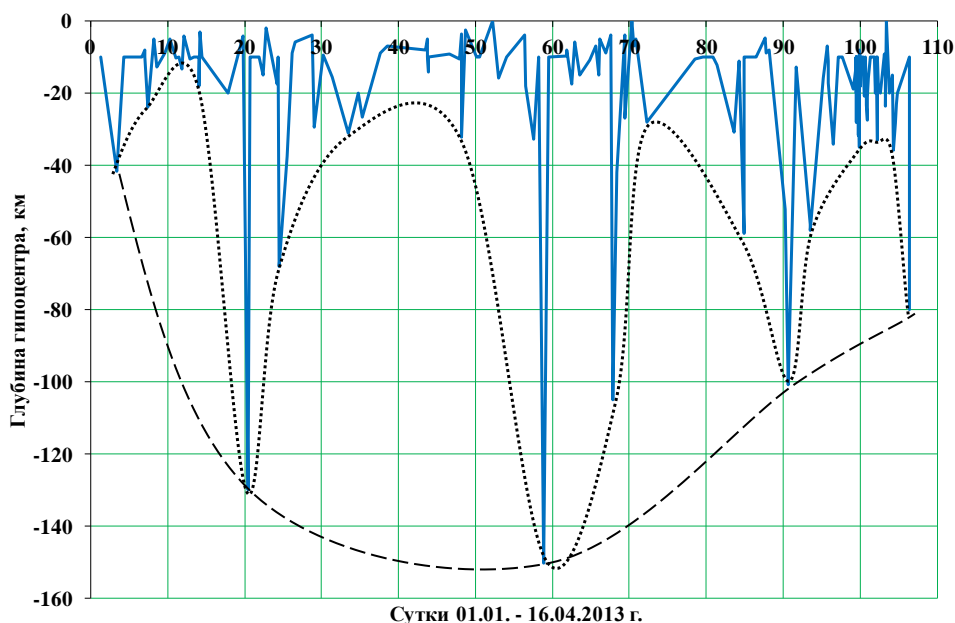


Рисунок 16. Последовательность гипоцентров и циклы их появления за 01.01.2013 г. - 16.04.2013 г. перед главным толчком землетрясения с $M_w=7.7$ (16.04.2013 г., Иран) по данным USGS. Точечной линией обозначены циклы третьего порядка, пунктирной линией - циклы второго порядка.

На рисунке 17 приведена частота появления гипоцентров за 01.01.2013-16.04.2013 г. перед проявлением сильного землетрясения с $M_w=7.7$ (16.04.2013 г.) на 87.2, 94.5, 190.9, 198.6 сутки отмечались фазы активизации проявления гипоцентров. На 211 сутки образовался гипоцентр главного толчка.

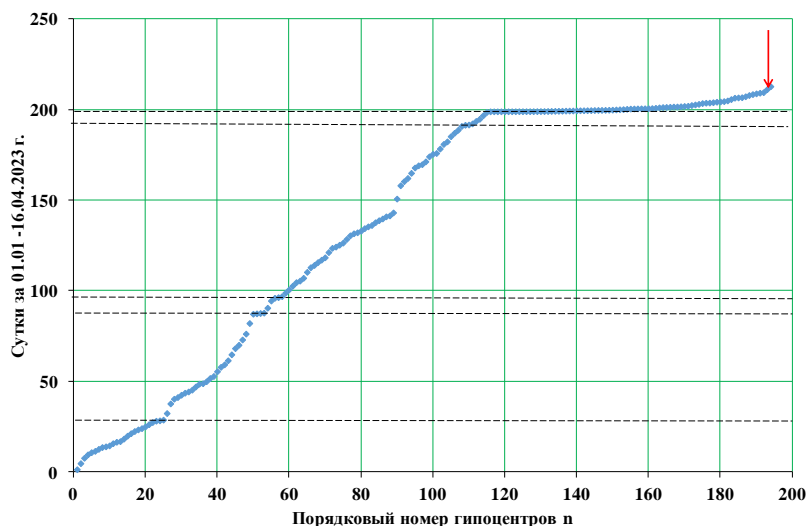


Рисунок 17. Частота проявления гипоцентров землетрясений за 01.01.2013-16.04.2013 г. перед проявлением сильного землетрясения с $M_w=7.7$ (16.04.2013 г.), которое обозначено стрелкой красного цвета. Горизонтальными пунктирными линиями обозначено начало фазы активизации.

На рисунке 18 приведена последовательность гипоцентров и циклы их появления за 01.01.2017 г. - 12.11.2017 г. перед главным толчком землетрясения с $M_w=7.4$ (12.11.2017 г., Ирак) по данным USGS. Отмечена иерархия циклов проявления

гипоцентров, например, второго и третьего порядков. Период повторения циклов третьего порядка составляет 8-35 суток. Последний цикл третьего порядка с периодом $T=11$ суток завершился на значении глубины 19 км.

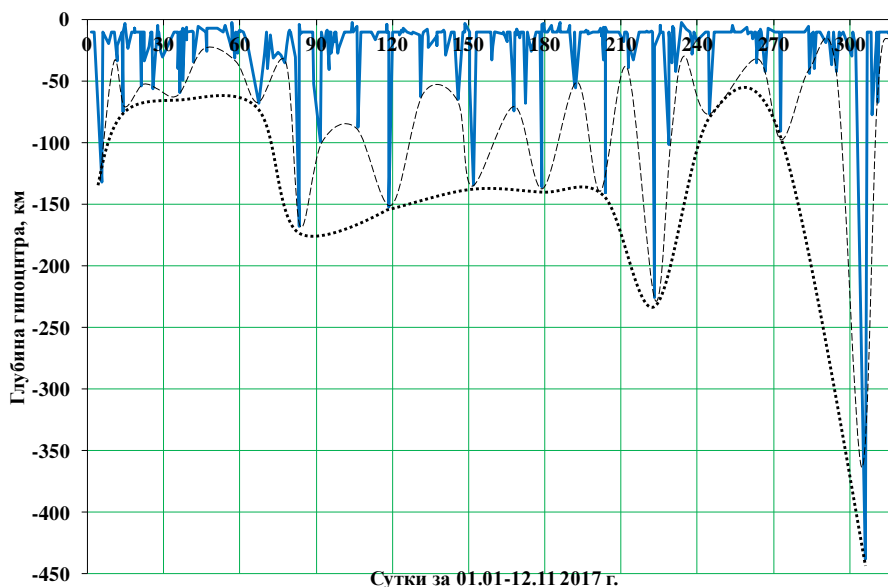


Рисунок 18. Последовательность гипоцентров и циклы их появления за 01.01.2017 г. – 12.11.2017 г. перед главным толчком землетрясения с $M_w=7.4$ (12.11.2017 г., Ирак) по данным USGS. Пунктирной линией обозначены циклы третьего порядка, точечной линией – циклы второго порядка.

На графике частоты проявления гипоцентров (рисунок 19) отмечаются фазы активизации на 71, 190, 296, 402, 523, 630 сутки с периодами повторения порядка 106-121 суток. Последняя фаза активизации на 630 сутки сопровождалась проявлением гипоцентра главного толчка с $M_w=7.4$.

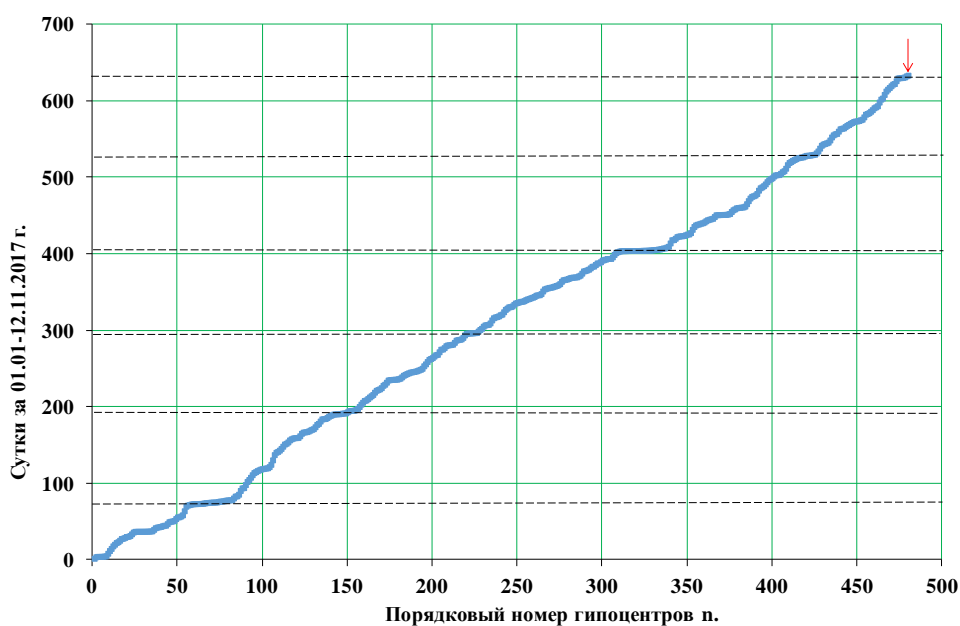


Рисунок 19. Частота проявления гипоцентров землетрясений за 01.01.2017 г. -12.11.2017 г. перед главным толчком землетрясения с $M_w=7.4$ (12.11.2017 г., Ирак), которое обозначено стрелкой красного цвета. Горизонтальными пунктирными линиями обозначено начало фазы активизации.

На рисунке 20 приведена последовательность гипоцентров и циклы их появления за 01.01.2023 г. - 06.02.2023 г. перед главным толчком землетрясения с $M_w=7.8$ (06.02.2023 г., Турция) по данным USGS.

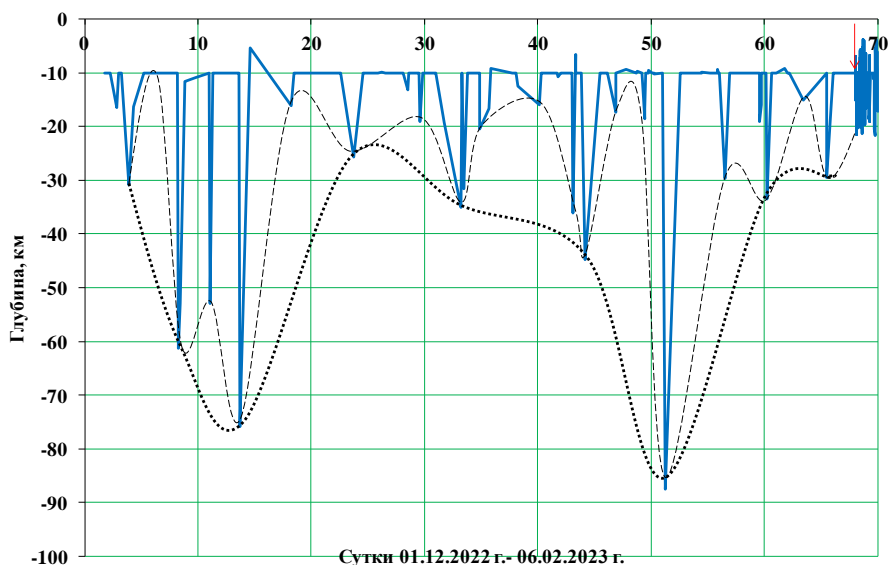


Рисунок 20. Последовательность гипоцентров и циклы их появления за 01.01.2023 г. - 06.02.2023 г. перед землетрясением с $M_w=7.8$ (06.02.2023 г., Турция) по данным USGS. Пунктирной линией обозначены циклы третьего порядка, точечной линией - циклы второго порядка.

На графике частоты проявления гипоцентров (рисунок 21) отмечаются фазы активизации, которые выделены горизонтальными пунктирными линиями.

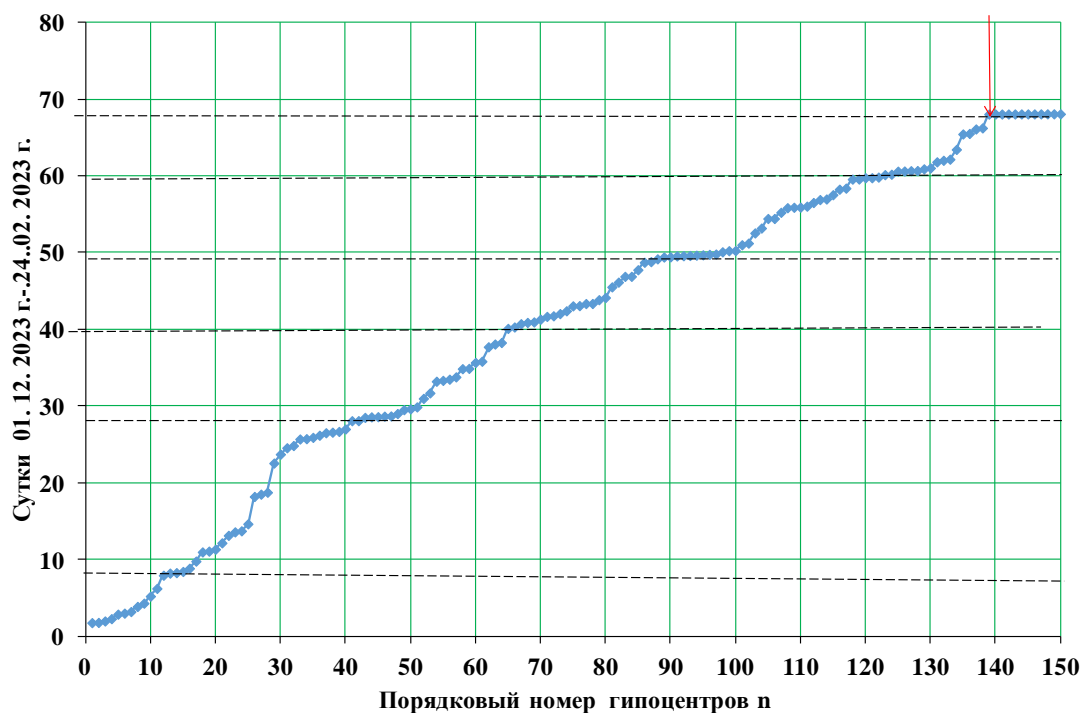


Рисунок 21. Частота проявления гипоцентров землетрясений за 01.12.2023 г.- 06.02.2023 г. перед проявлением сильного землетрясения с $M_w=7.8$ (06.02.2023 г. Турция), которое обозначено стрелкой красного цвета. Горизонтальными пунктирными линиями обозначено начало фазы активизации.

Заключение

В результате анализа имеющихся сейсмологических данных - каталога землетрясений с $m_b \geq 2.5$ USGS за 2012-2023 гг. в зоне эпицентра землетрясения с $M_w=7.8$, произошедшего в Турции 06.02.2023 г., на основании способов определения предвестников землетрясений [1, 2] Института сейсмологии НАН КР и иерархии литосферных блоков установлено:

- центр миграции пиков сейсмических циклов третьего и второго порядков в зоне активного разлома является местом (эпицентром) ожидаемого землетрясения с магнитудой больше максимального пика сейсмических циклов;
- периоды повторения сейсмических циклов первого порядка $T_1=9,8$ лет; второго порядка $T_2=2.3-4.6$ лет; третьего порядка $T_3=0.9-1.5$ лет; четвертого порядка $T_4=64-122$ суток; пятого порядка $T_5=7-22$ суток, являются временем ожидаемого землетрясения, которые последовательно уточняются на разных уровнях. Конечные значения магнитуд последних циклов, например, пятого, четвертого, третьего, второго порядков при средних значениях соответствующих периодов являются вариантами (набором) магнитуд ожидаемого сильного землетрясения;
- интервалы времени между фазами активизации дифференцированных магнитуд $m_b=3.6-4.5$ $t=4-6$ суток, $m_b=4.6-5.5$ $t=5-10$ суток, $m_b=5.6-6.5$ $t=4-6$ суток являются временем ожидаемого землетрясения;
- амплитуда флуктуации кумулятивной сейсмической энергии исследуемой территории (порядка 1.9×10^{24} эрг) означает нижний порог сейсмической энергии ожидаемого сильного землетрясения. Конечное положение полиномиального тренда шестой степени во времени указывает на время ожидаемого землетрясения - начало февраля 2023 г.
- интервалы времени между фазами активизации проявления гипоцентров $T=4-6$ суток является временем ожидаемого землетрясения. Конечное положение последнего цикла третьего порядка проявления гипоцентров означает глубину ожидаемого землетрясения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Омуралиев М., Омуралиева А., Землянский А.А. (KG) Способ определения места и силы крупного землетрясения за наступающий год и его кварталы, месяцы. Патент №1266. 30.06.2010 г.
2. Омуралиев М., Омуралиева А. (KG) Способ определения силы и времени – суток среднего и крупного ожидаемого землетрясения системы сейсмогенерирующих зон. Патент №1369. 31.06.2011 г.
3. Омуралиев М., Омуралиева А. Средне-, краткосрочная сейсмическая опасность Тянь-Шаня и иерархия динамики сейсмических процессов, Бишкек. ОСОО «ТРИАДА Принт», 2016. -116 с.
4. Омуралиева А., Омуралиев М. Динамика сейсмичности и сейсмическая опасность Тянь-Шаня – активного блока первого порядка литосферы. //Вестник Института сейсмологии НАН КР. -2017. - № 1(9). -с. 62-71.
5. Омуралиева А., Омуралиев М. Последовательность исторических землетрясений Земли в целом и периоды сейсмической активизации и затишья. //Наука и Новые Технологии. -2012. -№3. -с. 90-96.
6. Омуралиева А., Омуралиев М. Последовательность проявления землетрясений, высвобождение сейсмической энергии Земли в целом и её регионах (Азии, США) и оценка сейсмической опасности. //Вестник Института сейсмологии НАН КР. -2013. - №1. -с. 85-92.

7. Омуралиев М., Омуралиева А. Опыт слежения за динамикой сейсмичности всей Земли в целом и землетрясение Чили 16 сентября 2015 г. $M=8.3$. //Вестник Института сейсмологии НАН КР. -2015. -№2(6). -с.108-125.
8. Омуралиев М., Омуралиева А. Динамика сейсмических процессов на сопряжении Тихоокеанской, Североамериканской, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы и землетрясение Мексики 8 сентября 2017 г. //Вестник Института сейсмологии НАН КР. -2018. -№1(11). -с.87-100.
9. Омуралиев М., Омуралиева А. «Прогностические параметры: время, сила, место землетрясения Турции $M_w7.8$, 06.02.2023 на основе ретроспективного сейсмологического анализа». //Сборник тезисов XI Казахстанско-Китайский международного симпозиума «Прогноз землетрясений, оценка сейсмической опасности и сейсмического риска в Центральной Азии». Казахстан, Алматы. 26-28 сентября 2023 г. -2023. –С.214-219.
10. Gutenberg, B. and Richter, C.F. Earthquake Magnitude, Intensity, Energy and Acceleration. //Bulletin of the Seismological Society of America -1956a. -Vol.46. -p.105-146.

Рецензент: д.ф.-м.н. Муралиев А.М.