

УДК 550.34

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

ДИНАМИКА СЕЙСМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НА СОПРЯЖЕНИИ ТИХООКЕАНСКОЙ, СЕВЕРОАМЕРИКАНСКОЙ, ЮЖНОАМЕРИКАНСКОЙ, КАРИБСКОЙ, НАСКА, КОКОС ПЛИТ ЛИТОСФЕРЫ И ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ МЕКСИКИ 8 СЕНТЯБРЯ 2017 Г.

Аннотация. Настоящая работа является продолжением мониторинга за динамикой сейсмических процессов Земли в целом и её региональных частей на основании ежесуточных каталогов землетрясений USGS. Вновь полученные результаты исследований периодически публикуются. Здесь приведены результаты изучения сейсмических процессов на сочленении литосферных плит (Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос), которые представляют собой активные структуры второго порядка в иерархии Земного шара и где происходят крупные землетрясения с $M > 8.0$. Отмечен универсальный параметр - иерархия циклов сейсмических процессов в пределах активных структур литосферы и особенности подготовки землетрясения Мексики, $M=8.1$, 8 сентября 2017 г.

Ключевые слова: последовательность проявления землетрясений, повторяемость землетрясений, период сейсмической активизации, период сейсмического затишья, иерархия сейсмических циклов, кумулятивная сейсмическая энергия, скорость высвобождения сейсмической энергии, миграция сейсмической активизации по глубинам.

ЛИТОСФЕРАНЫН ТЫНЧ ОКЕАН, ТҮНДҮК АМЕРИКА, ТҮШТҮК АМЕРИКА, КАРИБ, НАСКА, КОКОС ПЛИТАЛАРЫНЫН ТИРЕШКЕН ЖЕРИНДЕГИ СЕЙСМИКАЛЫК ПРОЦЕССТЕРДИН ДИНАМИКАСЫ ЖАНА 2017-ЖЫЛДЫН 8-СЕНТЯБРЫНДАГЫ МЕКСИКА ЖЕР ТИТИРӨӨСҮ

Кыскача мазмуну. Ушул иш USGSтин сутка сайын катталган жер титирөө каталогдорунун негизинде бүгүндөй Жердин жана анын аймактык бөлүктөрүнүн сейсмикалык процесстеринин динамикасынын мониторингинин үландысы болуп саналат. Изилдөөнүн жаңыдан алынган жыйынтыктары мезгил-мезгили менен басылып чыгарылууда. Бул макалада литосфера плиталарынын: Тынч Океан, Түндүк Америка, Түштүк Америка, Кариб, Наска, Кокос тирешкен жердеги сейсмикалык процесстерин изилдөө жыйынтыктары келтирилген, алар Жер шарынын иерархиясында экинчи иреттеги активдүү структуралары жана $M > 8.0$ чоң жер титирөөлөр пайда болгон регион болуп эсептелинет. Литосферанын активдүү структуралардын чегинде сейсмикалык процесстердин циклдеринин иерархиясы - универсалдуу параметри белгиленген жана Мексикадагы, 2017-жылдын 8-сентябрындагы, $M=8.1$ жер титирөөсүнүн даярдык өзгөчөлүктөрү берилген.

Негизги сөздөр: жер титирөөлөрдүн болушунун ырааттуулугу, жер титирөөлөрдүн кайталанышы, сейсмикалык активдешүү мезгили, сейсмикалык басандоо мезгили, сейсмикалык циклдердин иерархиясы, топтолгон (кошулмаланган) сейсмикалык энергия, сейсмикалык энергиянын бошонуу ылдамдыгы, сейсмикалык активизациянын тереңдик боюнча миграциясы.

DYNAMICS OF SEISMIC PROCESSES AT THE JUNCTION OF THE PACIFIC PLATE, NORTH AMERICAN PLATE, SOUTH AMERICAN PLATE, CARIBBEAN PLATE, NAZCA PLATE, COCOS PLATE AND THE EARTHQUAKE IN MEXICO OF SEPTEMBER 8, 2017

Abstract. This work is a continuation of the monitoring of the dynamics of seismic processes of the Earth as a whole and its regional parts on the basis of the daily earthquake catalogs of the USGS. Newly-obtained research results are periodically publishing. Results of the study on seismic processes at the junction of the lithosphere plates (Pacific, North American, South American, Caribbean, Nazca, Cocos) are presented in the paper. These plates are second-order active structures in the hierarchy of the Earth, where large earthquakes of $M > 8.0$ occur. The universal parameter - hierarchy of cycles of seismic processes within active structures of the lithosphere and preparation features of the $M=8.1$ earthquake in Mexico, occurred on September 8, 2017, are noted.

Keywords: sequence of earthquakes visualization, earthquakes recurrence, seismic activation period, seismically calm period, hierarchy of seismic cycles, cumulative seismic energy, seismic energy release rate, depth migration of seismic activation.

Введение. Литосферные плиты Тихоокеанская, Северо-, Южноамериканская, Карибская, Наска, Кокос являются активными структурами второго порядка в иерархии структур Земли (рис.1) [1].

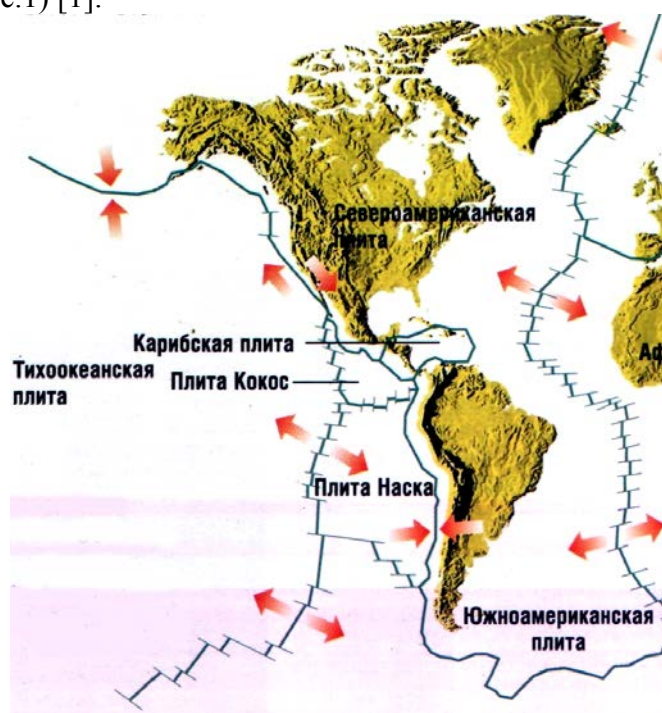


Рис.1. Литосферные плиты: Тихоокеанская, Северо-, Южноамериканская, Карибская, Наска, Кокос, и направления (дивергентные, конвергентные и сдвиговые) движения плит на их границах [1].

На сопряжении Тихоокеанской и Североамериканской плит образовалась зона субдукции сдвигового (правостороннего) характера. Плита Кокос сочленяется с Североамериканской, Карибской и Южноамериканской плитами через зоны субдукции сложного строения. На сопряжении плит Южноамериканской и Наска образовалась протяжённая зона субдукции конвергентного характера. В данных зонах и внутри плит

часто проявляются разрушительные землетрясения. Сейсмические процессы этого обширного региона определяют сейсмическую опасность многих стран. В связи с этим изучение динамики сейсмических процессов региона на основе современных данных является актуальной проблемой науки о земле, в частности сейсмологии. В последние годы отмечено ([2], [3], [4]), что динамика сейсмических процессов может быть более достоверно изучена на основании одновременного исследования иерархии активных плит литосферы, блоков разного порядка и иерархии сейсмических циклов с различной длительностью (интервалом повторяемости).

Последовательность проявления землетрясений и иерархия сейсмических циклов на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы

Основой исследований являются ежесуточные каталоги землетрясений [5] за 2015-2017 гг. в пределах сопряжения Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы. В последовательности землетрясений (за 2015-2017 гг.) видно, что 16 сентября 2015 г. произошло Чилийское землетрясение с $M=8.3$, после сейсмического затишья в июне-июле 2015 г. (рис.2) это землетрясение представляло собой пик сейсмической активизации первого порядка.

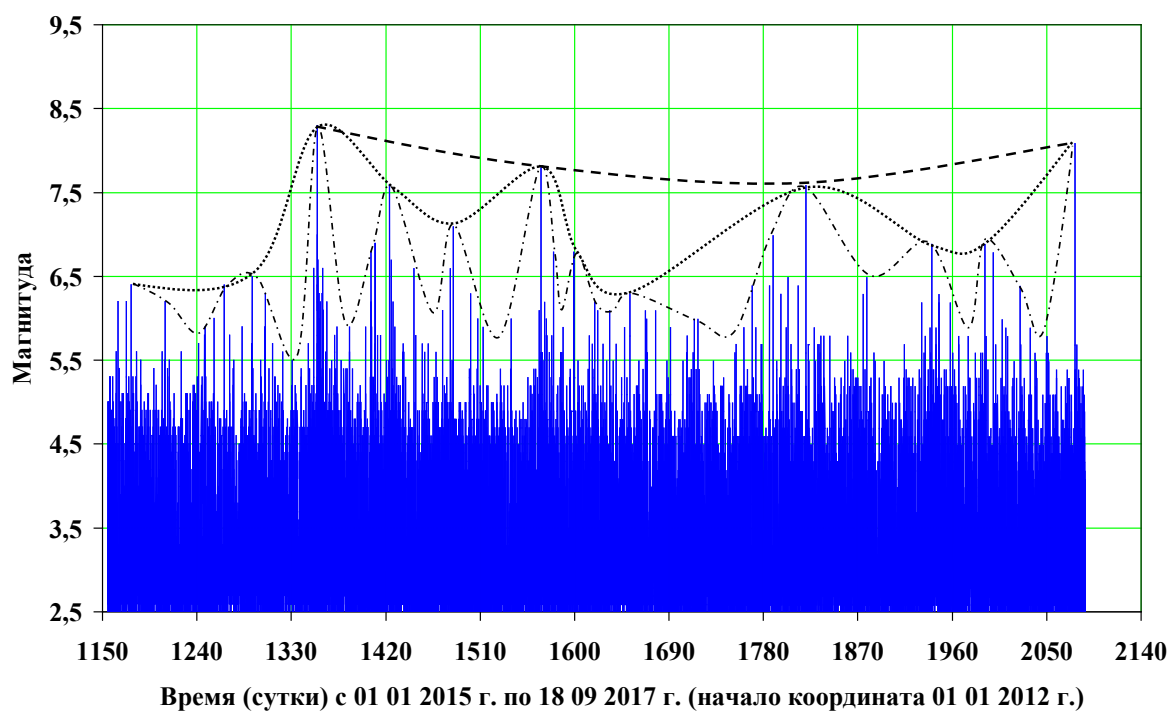


Рис.2. Последовательность проявления землетрясений с $M \geq 2.5$ на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы за 2015-2017 гг. Сейсмические циклы третьего порядка обозначены штрих-пунктирной линией, циклы второго порядка – точечной, циклы первого порядка – пунктирной. Сейсмические циклы третьего порядка находятся при $M > 5.5$, циклы второго порядка – $M \geq 6.4$, циклы первого порядка – $M \geq 7.6$.

После пика наблюдался спад сейсмической активизации и 16 апреля 2016 г. (1567.999 сутки) проявилось Эквадорское землетрясение с $M=7.8$. В дальнейшем 25 декабря 2016 г. (1820.5989 сутки) наступило сейсмическое затишье и произошло землетрясение с $M=7.6$ в Чили. После отмечалась сейсмическая активизация и 8

сентября 2017 г. произошло Мексиканское землетрясение с $M=8.1$. При этом проявлены 9 циклов третьего порядка (табл.1) с продолжительностью $T=31-167$ суток (в среднем 72 сутки) и 3 цикла второго порядка (табл.2) с продолжительностью $T=213-256$ суток (в среднем 240 суток). Следует отметить, что в последовательности проявления землетрясений выделяется иерархия циклов, которая характеризует сейсмические процессы. Как видно из табл.1, пики циклов третьего порядка мигрировали в пределах зоны субдукции на сочленении плит Южноамериканской и Наска от Чили в северном направлении к Перу, Бразилии и далее к Эквадору. Время миграции составляло 213 суток. В дальнейшем отмечалась миграция от Эквадора в южном направлении к Чили за 167 суток. После наблюдалась снова миграция в северном направлении к Гватемале (в сегменте зоны субдукции на сочленении плит Карибской и Кокос) и далее к Мексике в пределах сочленения плит Североамериканской и Кокос. Время миграции составляло 136 суток. Пики циклов второго порядка мигрировали от Чили в Эквадор, после от Эквадора к Чили, далее от Чили в Мексику. Соответственно, в зоне субдукции проявились векторы сейсмической активизации, направленные на юг и на север вдоль этой зоны. Территории Чили и Эквадора представляют собой области возвратов векторов сейсмической активизации и области концентрации землетрясений. Притом глубины очагов землетрясений на пиках сейсмических циклов составляли в пределах Чили, Эквадора 25-35 км, Перу, Бразилии–600-612 км, Гватемале. Мексике – 69-94 км.

Таблица 1.

Пики сейсмической активизации циклов 3-го порядка в последовательности проявления землетрясений на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы за 2015-2017 гг.

№ пп	Год	месяц	число	Географическое Место	Глубина, км	Магнитуда
1	2015	09	06	Чили	25	8.3
2	2015	11	24	Перу	600.6	7.6
3	2015	11	24	Бразилия	611,7	7.6
4	2016	01	24	Аляска	127.8	7.1
5	2016	04	16	Эквадор	19.2	7.8
6	2016	05	18	Эквадор	32.4	6.7
7	2016	11	07	Эквадор	19.2	6.3
8	2016	12	25	Чили	35.1	7.6
9	2017	04	24	Чили	25.0	6.9
10	2017	06	14	Гватемала	94.0	6.9
11	2017	09	08	Мексика	69.2	8.1

Таблица 2.

Пики сейсмической активизации циклов 2-го порядка в последовательности проявления землетрясений на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы за 2015-2017 гг.

№ пп	Год	Месяц	Число	Географическое Место	Глубина, км	Магнитуда
1	2015	09	06	Чили	25	8.3
2	2016	04	16	Эквадор	19.2	7.8

3	2016	12	25	Чили	35.1	7.6
4	2017	09	08	Мексика	69.2	8.1

Изменение магнитуды землетрясений сейсмического цикла первого порядка (в период подготовки землетрясения 08.09.2017 г. в Мексике с $M=8.1$ после землетрясения 16.09.2015 г. в Чили с $M=8.3$) нелинейное и выражается эмпирической формулой (рис.3):

$$M(t) = 3E - 09t^3 + 1E - 06t^2 - 0.0028t + 8.3, R^2 = 1.0, \quad (1)$$

где M – магнитуда, t – время (сутки), R^2 – достоверность аппроксимации.

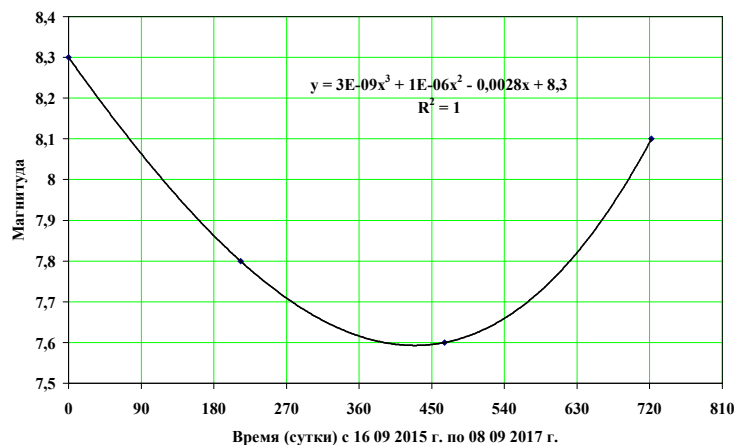


Рис.3. Полиномиальная линия тренда сейсмического цикла первого порядка с 16.09.2015 г. землетрясения Чили, $M=8.3$ по 08.09.2017 г. в период подготовки землетрясения Мексики, $M=8.1$ на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы.

Составляющие формулы (1) представляют собой функции сейсмических процессов цикла первого порядка. Графики этих функций приведены на рис.4.

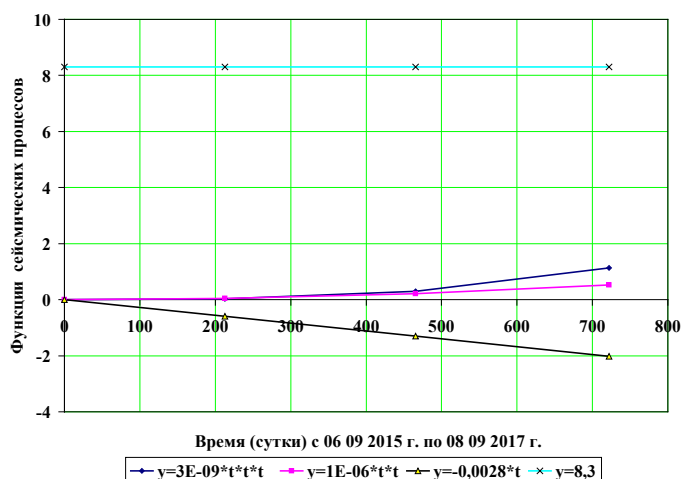


Рис.4. Графики функций сейсмических процессов в сейсмическом цикле первого порядка на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы за 06.09.2015-08.09.2017 гг.

Как видно из рис.4, функции $y = 3E - 09t^3$ и $y = 1E - 06t^2$ нелинейно растут, а функция $y = -0.0028t$ линейно убывает.

Изменение магнитуды землетрясений сейсмического цикла второго порядка (с 25.12.2016 г. по 08.09.2017 г., когда произошло Мексиканское землетрясение, $M=8.1$) нелинейное и выражается эмпирической формулой (рис.5):

$$M(t) = 3E - 07t^3 - 4E - 05t^2 - 0.0044t + 7.6, R^2 = 1.0, \quad (2)$$

где M – магнитуда, t – время (сутки), R^2 – достоверность аппроксимации.

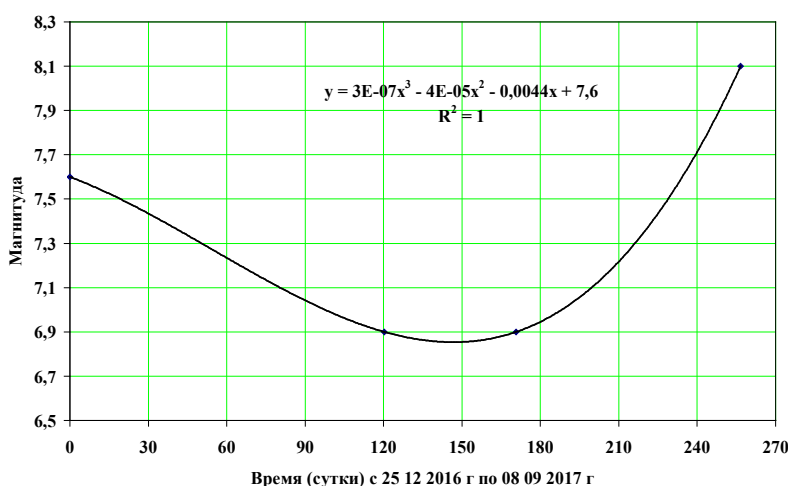


Рис.5. Полиномиальная линия тренда сейсмического цикла второго порядка (с 25.12.2016 г.) перед главным толчком землетрясения Мексики (08.09.2017, $M=8.1$) на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы.

Составляющие формулы (2) представляют собой функции сейсмических процессов цикла второго порядка перед главным толчком землетрясения Мексики, 08.09.2017 г., $M=8.1$. Графики этих функций приведены на рис.6.

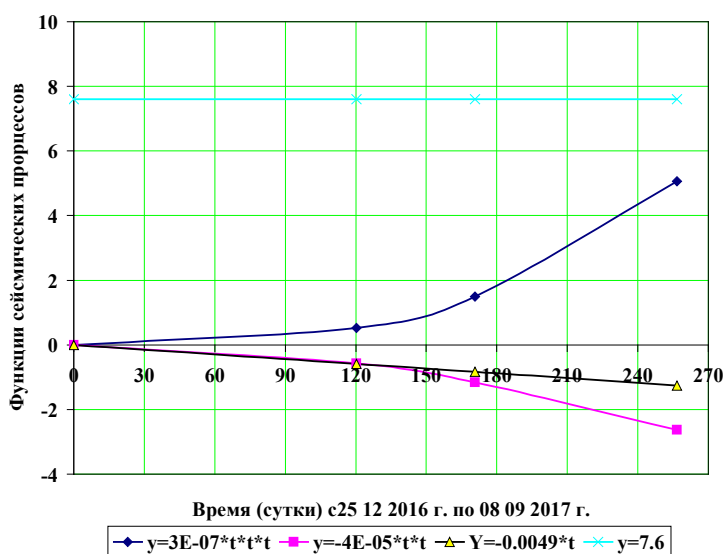


Рис.6. Графики функций сейсмических процессов сейсмического цикла второго порядка за 25.12.2016-08.09.2017 на сопряжении Тихоокеанской, Северо-,

Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы перед главным толчком землетрясения Мексики, $M=8.1$.

Как видно из рис.6, функция $y = 3E - 07t^3$ нелинейно растет, функция $y = 4E - 05t^2$ нелинейно убывает, а функция $y = -0.0049t$ линейно убывает.

Изменение кумулятивной сейсмической энергии землетрясения выражает проявление сейсмических циклов. Допустимое значение сейсмической энергии может быть определено формулой Гутенберга и Рихтера [6]:

$$\lg E = 11.8 + 1.5M, \quad (3)$$

где E - сейсмическая энергия (эрг), M – магнитуда.

График кумулятивной сейсмической энергии, например, с 23.03.2015 г. (наступление периода затишья перед землетрясением Чили, $M=8.3$) по 24.04.2017 г. (наступление периода затишья цикла второго порядка перед главным толчком землетрясения Мексики, $M=8.1$) неровный, ступенчатый (рис.7). Линейный тренд его представлен эмпирической формулой:

$$E_k = (0.0428t - 47.301) \times 10^{23}, \quad (4)$$

где E_k - кумулятивная сейсмическая энергия (эрг), t -время (сутки), коэффициент 0.0428×10^{23} имеет размерность эрг/сутки и представляет собой скорость высвобождения энергии. Флуктуация кумулятивной сейсмической энергии очерчивается снизу и сверху прямыми линиями, параллельными линейному тренду.

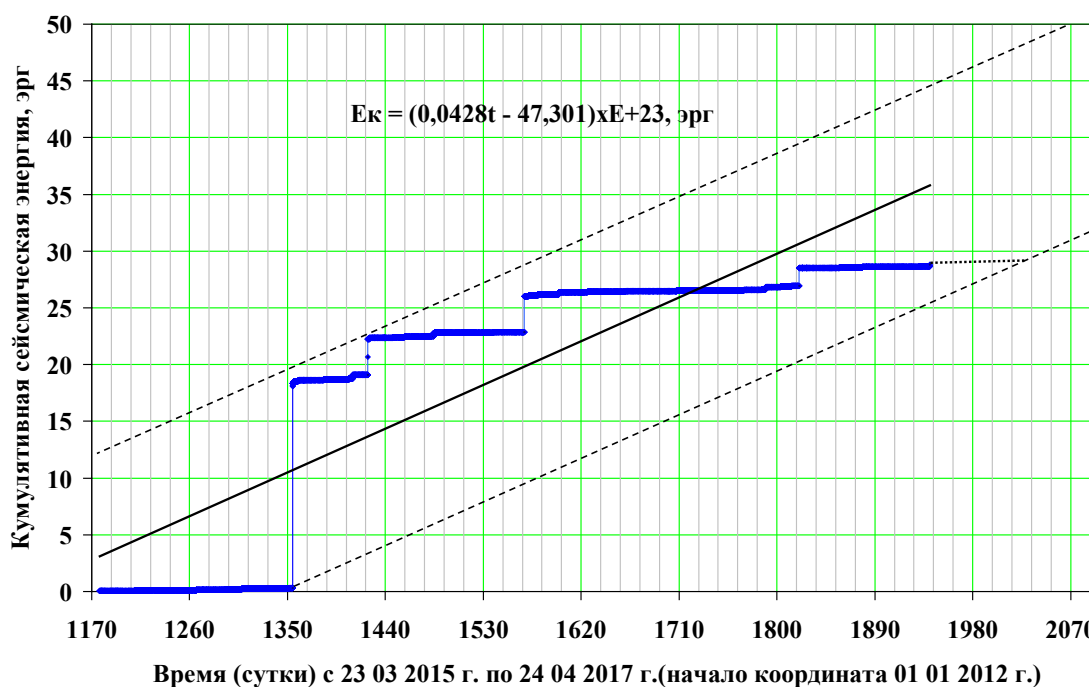


Рис.7. Кумулятивная сейсмическая энергия, высвобожденная при землетрясениях с магнитудами $M \geq 2.5$ на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы за 23.03.2015-24.04.2017 гг. Линейный тренд графика обозначен сплошной линией, пределы флуктуации кумулятивной сейсмической энергии - пунктирными линиями. Вероятное время наступления сейсмической активизации обозначено точечной горизонтальной линией.

Нижний предел флуктуации сейсмической энергии выражается формулой:

$$E_k = (0.0428t - 57.6868) \times 10^{23} \quad (5)$$

Интервал времени от конечной точки графика кумулятивной сейсмической энергии $E_k = 28,8006 \times 10^{23}$ эрг, время $t_k = 1940.9016$ сутки (по горизонтали) до нижнего предела флуктуации, где время предположительно равно 2020.856 суткам, составляет (2020.856-1940.9016) 79.9 суток. Соответственно, вероятная сейсмическая активизация может наступить после 80 суток.

График кумулятивной сейсмической энергии, например, с 23.03.2015 г. (наступление периода затишья перед землетрясением Чили, $M=8.3$) по 14.06.2017 г. (конец периода затишья цикла второго порядка перед главным толчком землетрясения Мексики, $M=8.1$) неровный, ступенчатый (рис.8). Линейный тренд его представлен эмпирической формулой:

$$E_k = (0.0391t - 41.993) \times 10^{23} \quad (6)$$

где E_k - кумулятивная сейсмическая энергия (эрг), t - время (сутки), коэффициент 0.0391×10^{23} имеет размерность эрг/сутки и представляет собой скорость высвобождения энергии.

Нижний предел флуктуации кумулятивной сейсмической энергии выражается формулой:

$$E_k = (0.0391t - 52.9772) \times 10^{23} \quad (7)$$

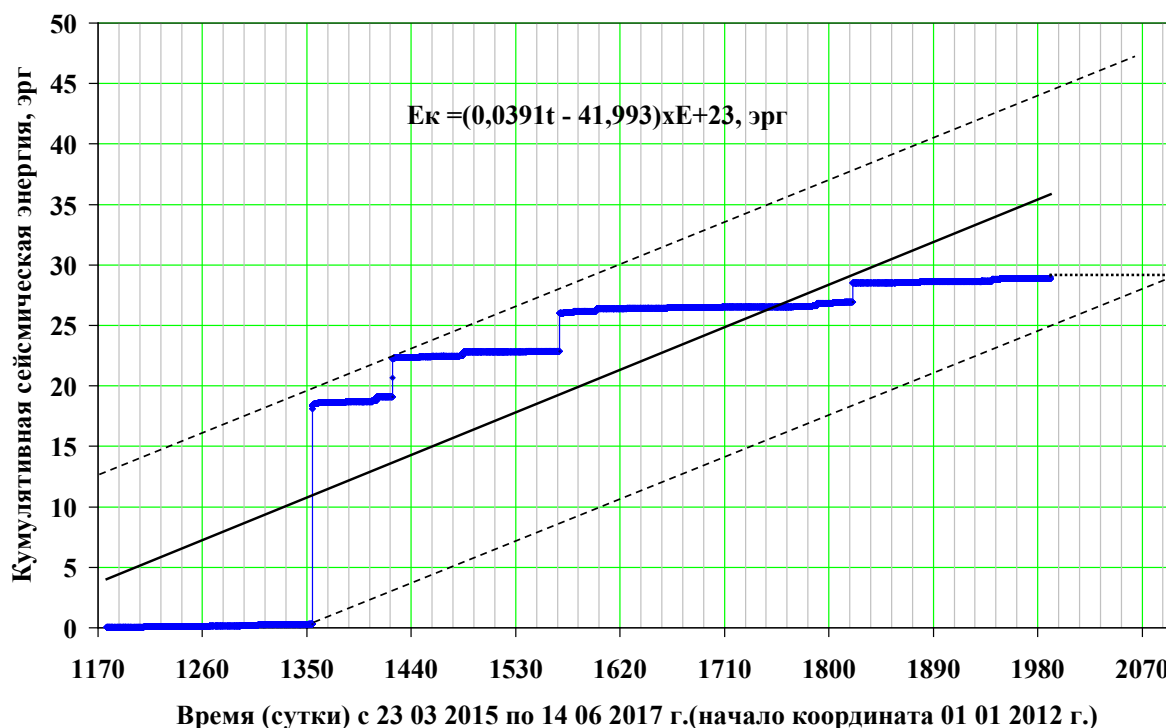


Рис.8. Кумулятивная сейсмическая энергия, высвобожденная при землетрясениях с магнитудами $M \geq 2.5$ на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы за 23.03.2015-14.06.2017 гг. Линейный тренд графика обозначен сплошной линией, пределы флуктуации кумулятивной сейсмической энергии - пунктирными линиями.

Вероятное время наступления сейсмической активизации обозначено точечной горизонтальной линией.

Интервал времени от конечной точки графика кумулятивной сейсмической энергии $E_k = 29.037 \times 10^{23}$ эрг, время $t_k = 1991.3118$ сутки (по горизонтали) до нижнего предела флуктуации, где время равно 2097.54 суткам, составляет $(2097.54 - 1991.31) = 106.2$ суток. Соответственно, вероятная сейсмическая активизация может наступить в течение 106 суток. На самом же деле землетрясение Мексики, $M = 8.1$, произошло 8 сентября 2017 г., т.е. на 2077.2 сутки, то есть реальное время находилось в интервале между вышеопределённым вероятным временем 2020 - 2097 суток.

Изменение кумулятивной сейсмической энергии за 23.03.2015 г. - 08.09.2017 г. приведено на рис.9. График - неровный, ступенчатый, отражает циклы сейсмических процессов. Линейный тренд графика выражается эмпирической формулой:

$$E_k = (0.034t - 34.586) \times 10^{23}, \quad (8)$$

где E_k - кумулятивная сейсмическая энергия (эрг), t - время (сутки), коэффициент 0.034×10^{23} имеет размерность эрг/сутки и представляет собой скорость высвобождения энергии. Разница энергии между нижней и верхней границами флуктуации составляет около 2×10^{24} эрг и представляет собой возможную максимальную сейсмическую энергию крупного землетрясения на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы.

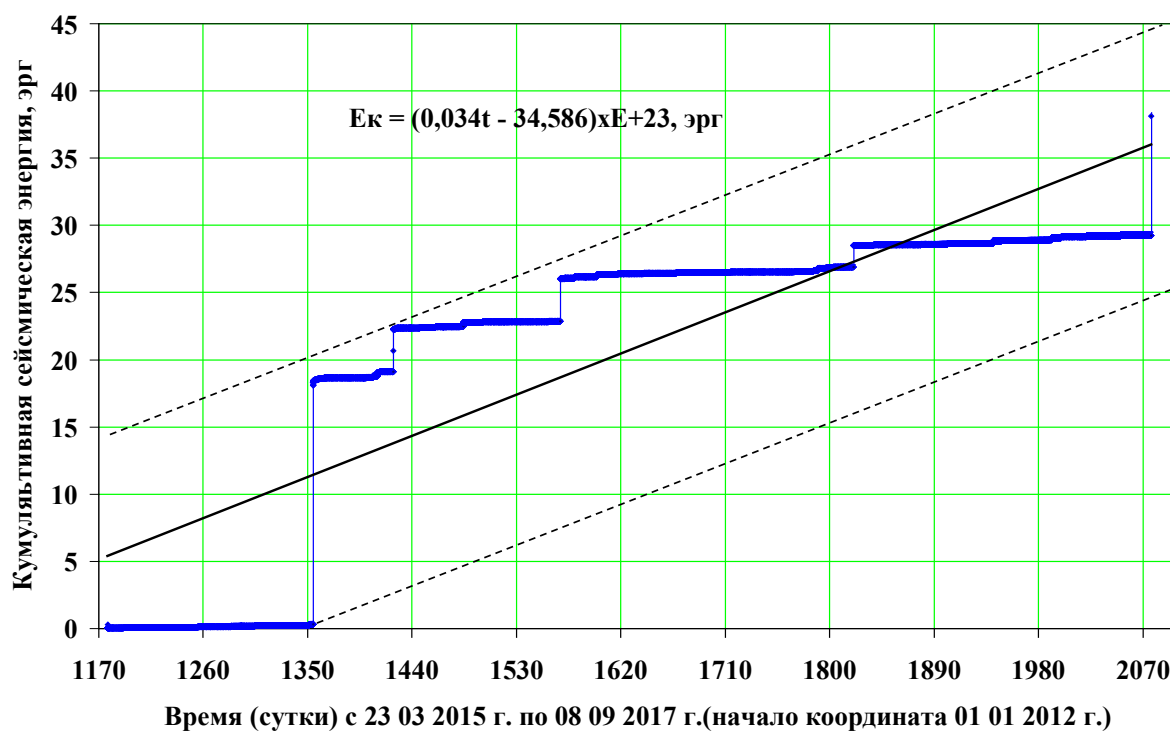


Рис.9. Кумулятивная сейсмическая энергия, высвобожденная при землетрясениях с магнитудами $M \geq 2.5$ на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы за 23.03.2015-08.09.2017 гг. Линейный тренд графика обозначен сплошной линией. Пределы флуктуации кумулятивной сейсмической энергии обозначены пунктирными линиями.

Важно рассмотреть изменение кумулятивного сейсмического момента, которое выражает проявление сейсмических циклов. Допустимое значение сейсмического момента может быть определено с учетом формулы (3) формулой Канамори [7]:

$$E = M_0 / (2 \times 10^4), \quad (9)$$

где M_0 – сейсмический момент (дин·см), E – сейсмическая энергия (эрг). График кумулятивного сейсмического момента, например, с 23.03.2015 г. (наступление периода затишья перед землетрясением Чили, $M=8.3$) по 24.04.2017 г. (наступление периода затишья цикла второго порядка перед главным толчком землетрясения Мексики, $M=8.1$) неровный, ступенчатый (рис.10). Линейный тренд его представлен эмпирической формулой:

$$M_{0k} = (0.0856t - 94.602) \times 10^{27}, \quad (10)$$

где M_{0k} – кумулятивный сейсмический момент (дин·см), t – время (сутки), коэффициент 0.0856×10^{27} имеет размерность (дин·см)/сутки и представляет собой скорость проявления сейсмического момента. Флуктуация кумулятивного сейсмического момента очерчивается снизу и сверху прямыми линиями, параллельными линейному тренду.

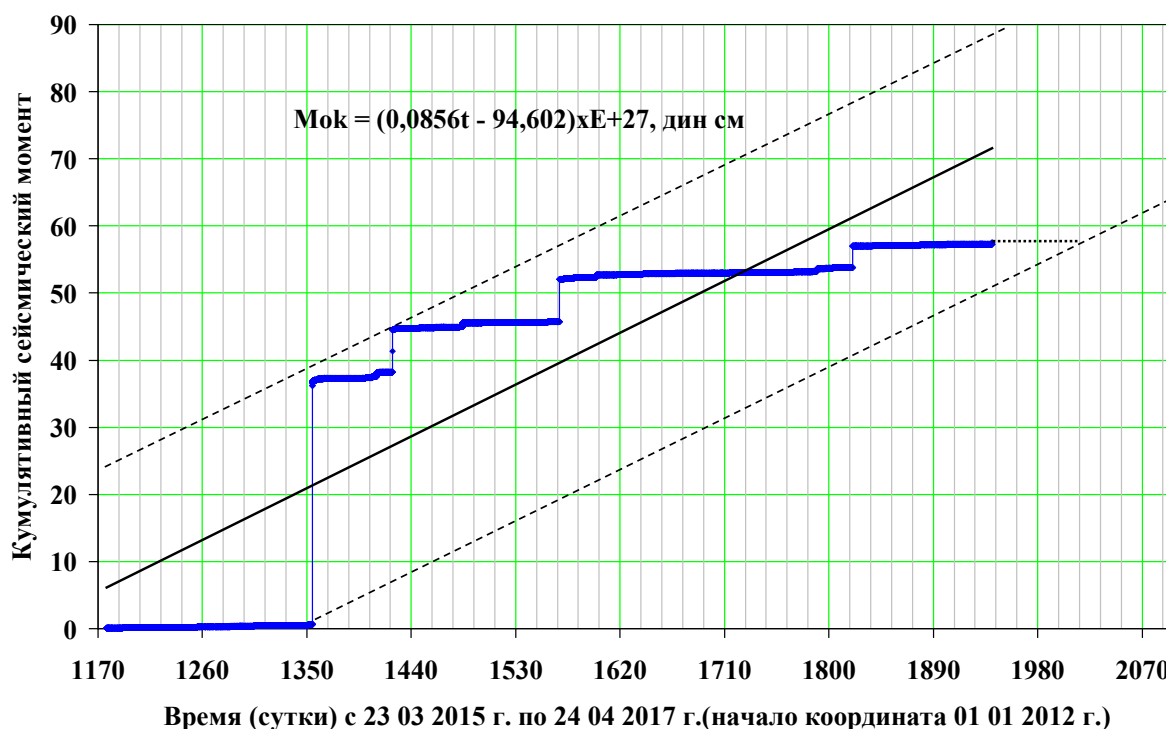


Рис.10. Кумулятивный сейсмический момент, проявленный при землетрясениях с магнитудами $M \geq 2.5$ на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы за 23.03.2015-24.04.2017 гг. Линейный тренд графика обозначен сплошной линией, пределы флуктуации кумулятивной сейсмической энергии – пунктирными линиями. Вероятное время наступления сейсмической активизации обозначено точечной горизонтальной линией.

Нижний предел флуктуации кумулятивного сейсмического момента выражается формулой:

$$M_{0k} = (0.0856t - 107.6575) \times 10^{27}. \quad (11)$$

Интервал времени от конечной точки графика кумулятивного сейсмического момента $M_{ok}=57.6012 \times 10^{27}$ дин·см, время $t_k=1940.9016$ сутки (по горизонтали) до нижнего предела флуктуации, где время предположительно равно 2018.2 суткам, составляет $(2018.2-1940.9)$ 77.3 суток. Соответственно, вероятная сейсмическая активизация может наступить после 77 суток.

График кумулятивного сейсмического момента, например, с 23.03.2015 г. (наступление периода затишья перед землетрясением Чили, $M=8.3$) по 14.06.2017 г. (конец периода затишья цикла второго порядка перед главным толчком землетрясения Мексики, $M=8.1$) неровный, ступенчатый (рис.11). Линейный тренд его представлен эмпирической формулой:

$$M_{ok} = (0.0782t - 83.987) \times 10^{27}, \quad (12)$$

где M_{ok} - кумулятивный сейсмический момент (дин·см), t -время (сутки), коэффициент 0.0782×10^{27} имеет размерность (дин·см)/сутки и представляет собой скорость проявления сейсмического момента. Флуктуация кумулятивного сейсмического момента очерчивается снизу и сверху прямыми линиями, параллельными линейному тренду.

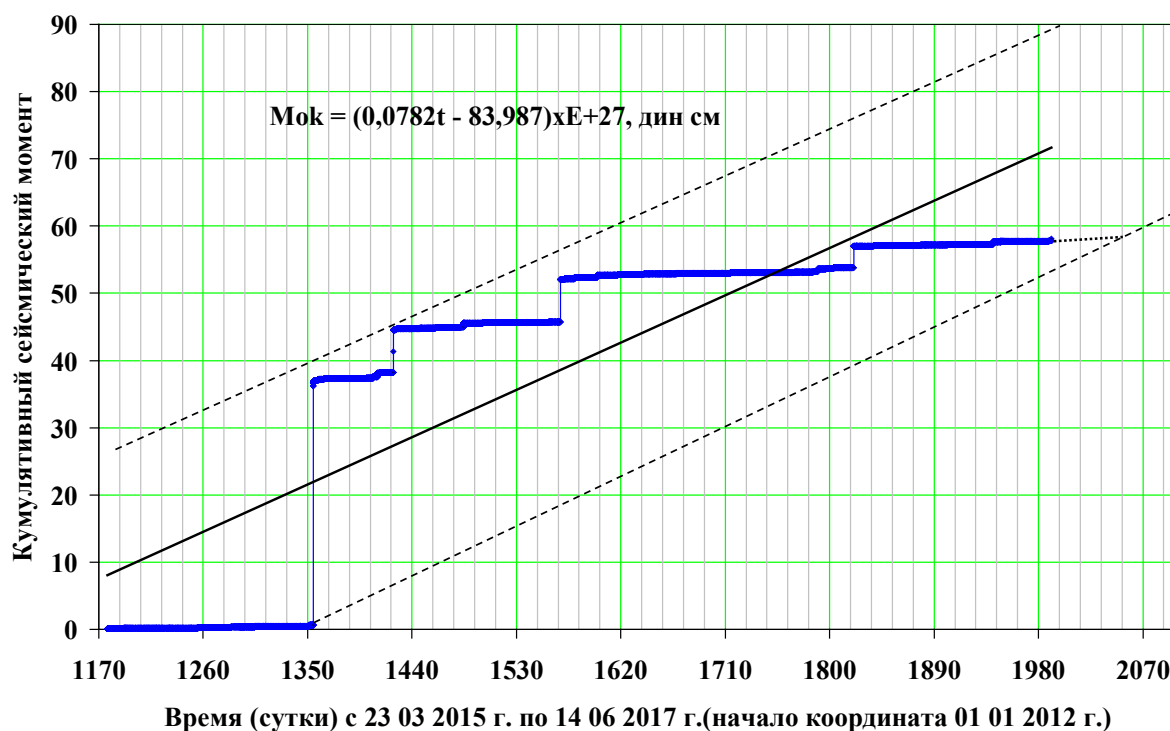


Рис.11. Кумулятивный сейсмический момент, проявленный при землетрясениях с магнитудами $M \geq 2.5$ на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы за 23.03.2015-14.06.2017 гг. Линейный тренд графика обозначен сплошной линией, пределы флуктуации кумулятивной сейсмической энергии - пунктирными линиями. Вероятное время наступления сейсмической активизации обозначено точечной горизонтальной линией.

Нижний предел флуктуации кумулятивного сейсмического момента выражается формулой:

$$M_{ok} = (0.0782t - 105.9544) \times 10^{27}. \quad (13)$$

Интервал времени от конечной точки графика кумулятивного сейсмического момента $M_{0k}=58.074 \times 10^{27}$ дин·см, время $t_k=1991.3118$ сутки (по горизонтали) до нижнего предела флуктуации, где время предположительно равно 2097.5 суткам, составляет $(2097.5-1991.3)$ 106.2 сутки. Соответственно, вероятная сейсмическая активизация может наступить в течение 106 суток. Мексиканское землетрясение произошло 08.09.2017 г., т.е. на 2077 сутки между вышеопределённым временем наступления сейсмической активизации, т.е. 2018 и 2097 сутки.

Распределение глубины землетрясений ($M \geq 2.5$) на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы во времени за январь 2015 г. – сентябрь 2017 г. приведено на рис.12. Землетрясения за рассматриваемый период имеют глубину до 678 км. Высокая плотность очагов землетрясений отмечается на глубинах около 5-70 км и 100-120 км. Концентрация их уменьшается с глубиной и на глубинах около 300-500 км не наблюдаются очаги землетрясений. Далее на глубинах около 500-678 км отмечаются незначительные очаги.

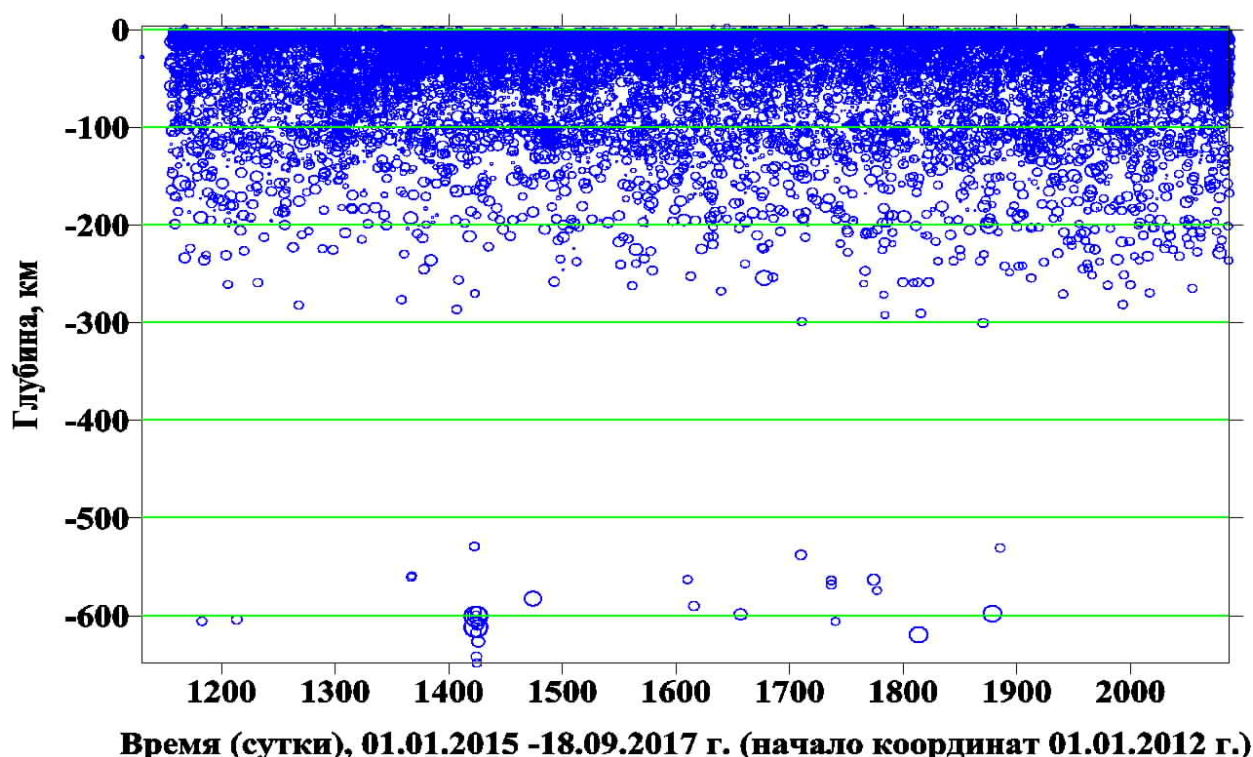


Рис.12. График изменения глубины землетрясений на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы во времени за январь 2015г. – сентябрь 2017 г.

На рис.13 приведено распределение очагов землетрясений во времени на глубинах 0-300 км, 0-100 км и 0-30 км. Здесь проявляются периодические своеобразные «вспышки» (далее вспышки) очагов, которые на графике выделяются как висячие вертикальные «цепочки» (далее цепочки). Вместе с тем, на глубинах 5 км и 10 км отмечаются поверхности сейсмической среды в виде горизонтальных непрерывных цепочек частых очагов землетрясений.

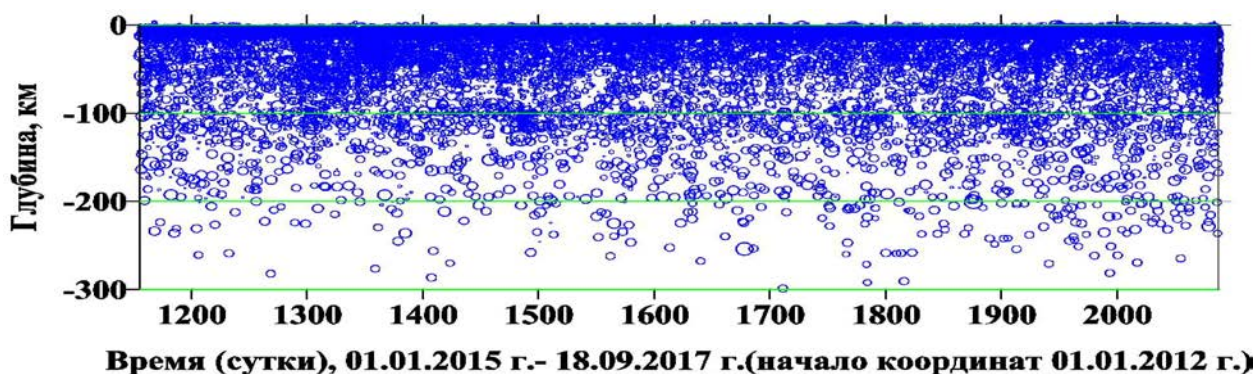


Рис.13. Распределение землетрясений по глубинам 0-300 км на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы во времени за январь 2015 г. – сентябрь 2017 г.

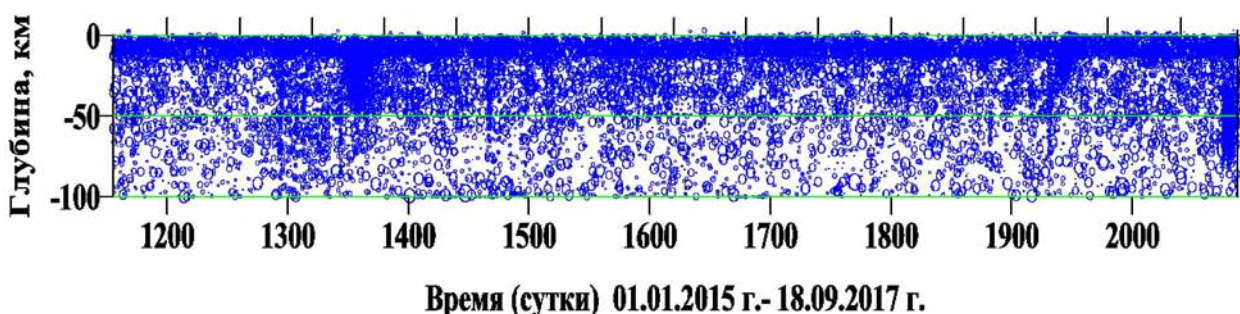


Рис.13. (Продолжение) Распределение землетрясений по глубинам 0-100 км на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы во времени за январь 2015 г. – сентябрь 2017 г.

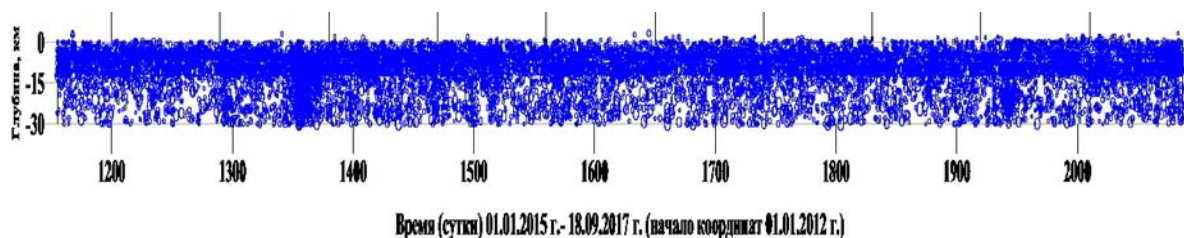


Рис.13. (Продолжение) Распределение землетрясений по глубинам 0-30 км на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы во времени за январь 2015 г. – сентябрь 2017 г.

Следует отметить, что проявлялись аномальные вспышки очагов перед сильными землетрясениями, как Чилийское ($M=8.3$, 16 сентября 2015 г.) и Мексиканское ($M=8.1$, 8 сентября 2017 г.) на глубинах около 0-120 км. Так, перед Чилийским землетрясением сплошные вспышки очагов начались с июля 2015 г., перед землетрясением Мексики прерывистые вспышки очагов - с апреля 2017 г.

В последовательности проявления землетрясений в обобщённых отрезках глубины сейсмической среды наблюдается чередование периодов сейсмической активизации и затишья. Так, на глубинах 0-10 км (рис.14) проявились два пика ($M=6.8-6.9$) сейсмической активизации (табл.3). Промежуток времени между пиками составляет около 170 суток.

Таблица 3.

№	Год	Месяц	Число	Магнитуда	Географическое место	Глубина, км
1	2015	11	11	6.9	Чили	10
2	2016	04	29	6.8	Северо-восток Тихоокеанского поднятия	10

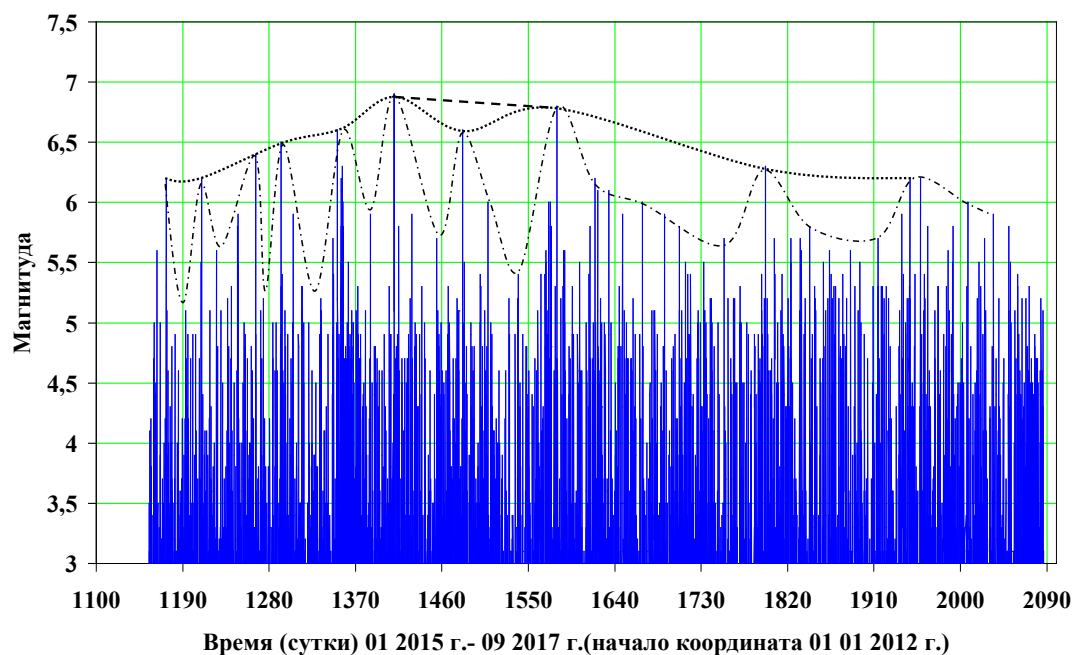


Рис.14. Последовательность проявления землетрясений, чередование периодов сейсмической активизации и затишья на глубинах 0-10 км на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы во времени за январь 2015 г. – сентябрь 2017 г. Сейсмические циклы разного порядка обозначены пунктирной, точечной и штрихпунктирной линиями

На глубинах 10-70 км отмечались четыре пика ($M=7.6-8.3$) сейсмической активизации (рис.15, табл.4). Промежуток времени между пиками составляет 213-256 суток.

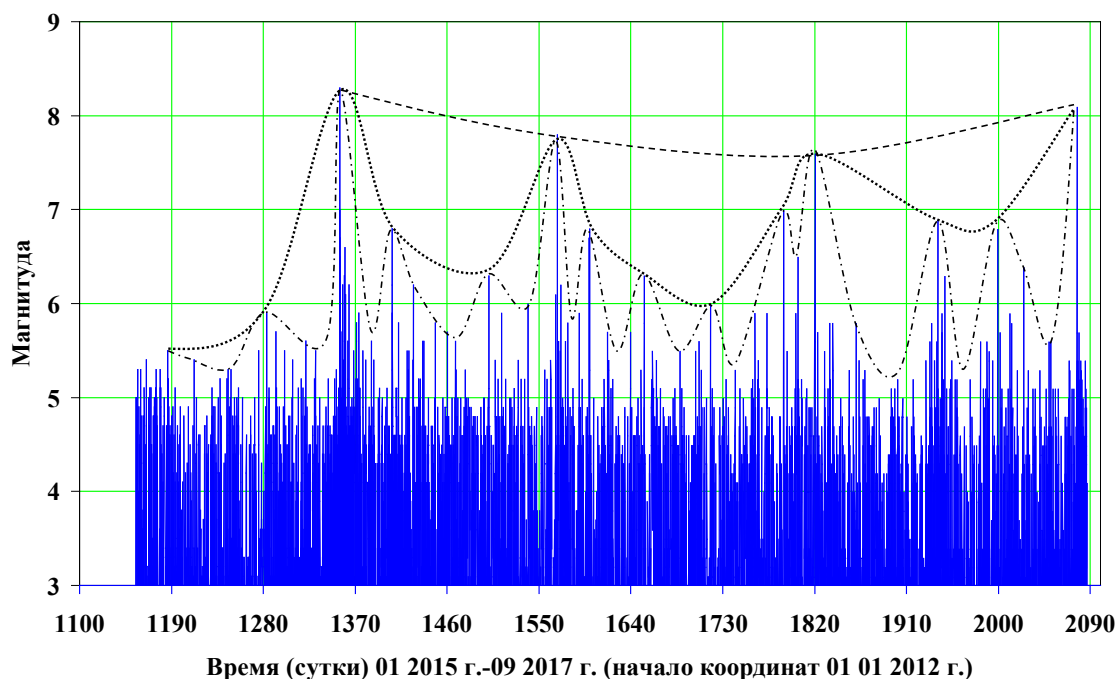


Рис.15. Последовательность проявления землетрясений, чередование периодов сейсмической активизации и затишья на глубинах 10-70 км на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы во времени за январь 2015 г. – сентябрь 2017 г. Сейсмические циклы разного порядка обозначены пунктирной, точечной и штрихпунктирной линиями.

Таблица 4.

№	Год	Месяц	Число	Магнитуда	Географическое место	Глубина, км
1	2015	09	16	8.3	Чили	25.0
2	2016	04	16	7.8	Эквадор	19.2
3	2016	12	25	7.6	Чили	35.1
4	2017	09	08	8.1	Мексика	69.7

На глубинах 70-100 км отмечались три пика ($M=6.4-6.9$) сейсмической активизации (рис.16, табл.5). Промежуток времени между пиками составляет 221-322 суток.

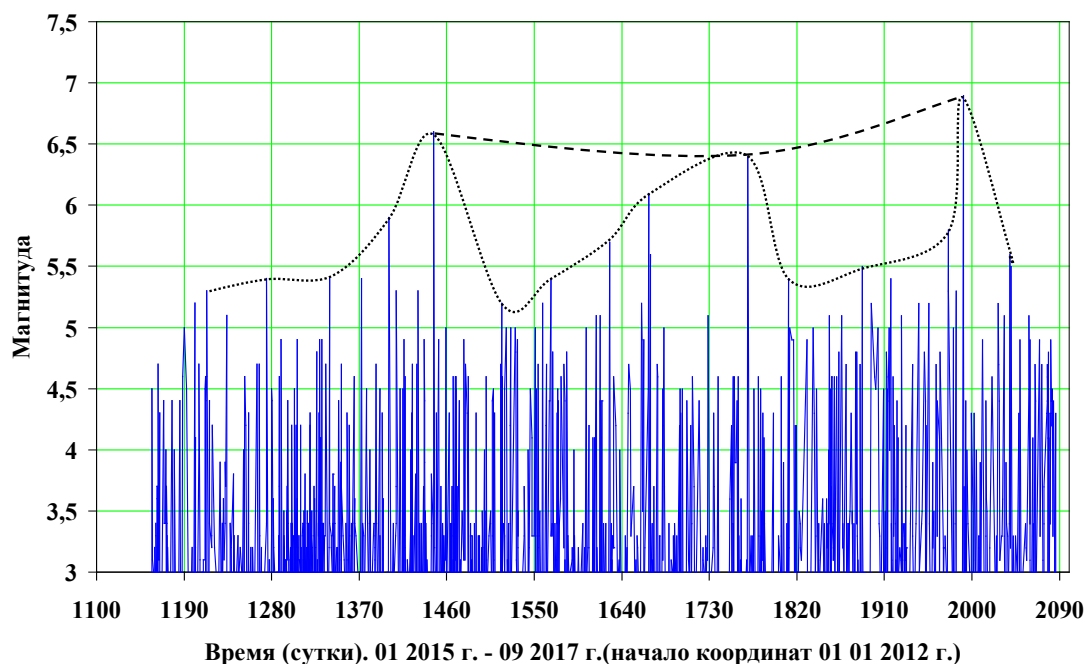


Рис.16. Последовательность проявления землетрясений, чередование периодов сейсмической активизации и затишья на глубинах 70-100 км на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы во времени за январь 2015 г. – сентябрь 2017 г.. Сейсмические циклы разного порядка обозначены пунктирной, точечной линиями.

Таблица 5.

№	Год	Месяц	Число	Магнитуда	Географическое место	Глубина, км
1	2015	12	17	6.6	Мексика	97.8
2	2016	11	04	6.4	Чили	90.8
3	2017	06	14	6.9	Гватемала	94.0

На глубинах 100-120 км отмечались два пика ($M=6.3-6.4$) сейсмической активизации (рис.17, табл.6). Промежуток времени между пиками составляет около 480 суток.

Таблица 6.

№	Год	Месяц	Число	Магнитуда	Географическое место	Глубина, км
1	2015	07	29	6.3	Аляска	116.6
2	2016	11	20	6.4	Аргентина	115.8

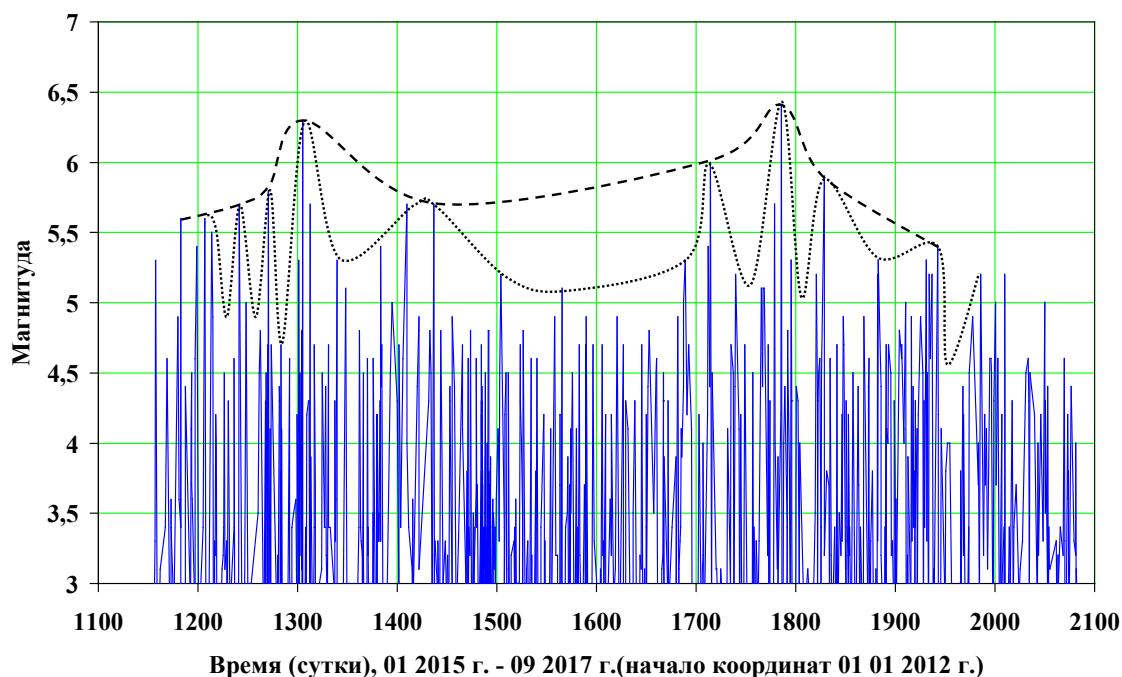


Рис.17. Последовательность проявления землетрясений, чередование периодов сейсмической активизации и затишья на глубинах 100-120 км на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы во времени за январь 2015 г. – сентябрь 2017 г. Сейсмические циклы разного порядка обозначены пунктирной, точечной линиями

На глубинах 120-300 км отмечались три пика ($M=6.2-7.1$) сейсмической активизации (рис.18, табл.7). Промежуток времени между пиками составляет 307-446 суток.

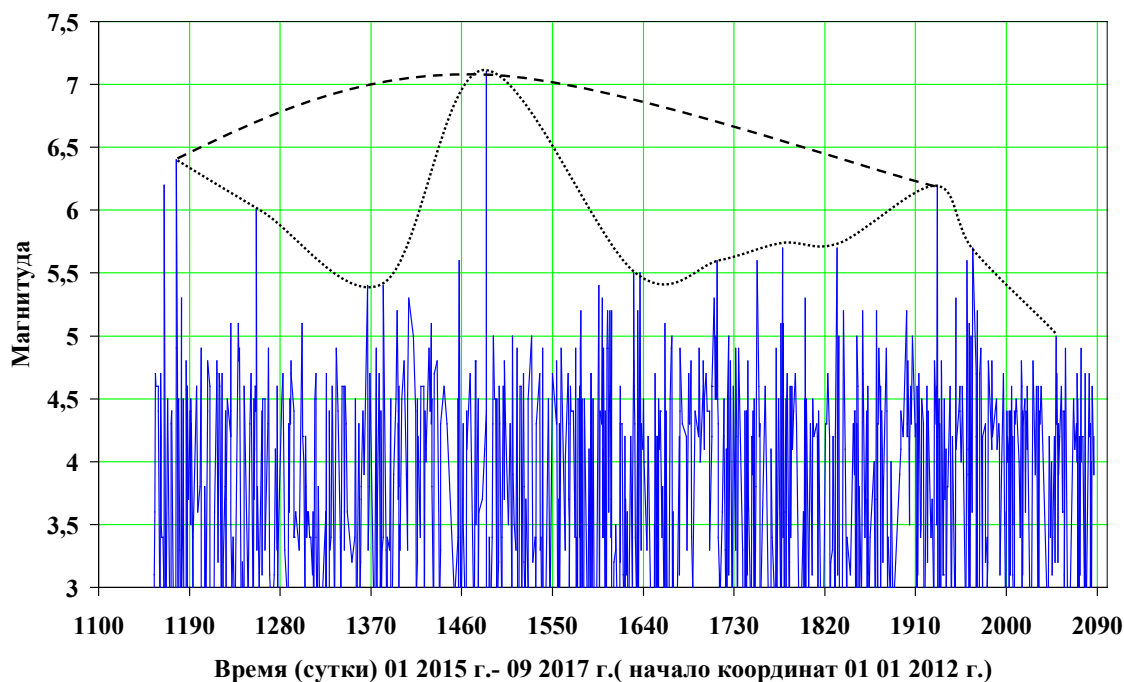


Рис.18. Последовательность проявления землетрясений, чередование периодов сейсмической активизации и затишья на глубинах 120-300 км на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит

литосферы во времени за январь 2015 г. – сентябрь 2017 г. Сейсмические циклы разного порядка обозначены пунктирной, точечной линиями.

Таблица 7.

№	Год	Месяц	Число	Магнитуда	Географическое место	Глубина, км
1	2015	03	23	6.4	Чили	120.9
2	2016	01	24	7.1	Аляска	127.8
3	2017	04	15	6.2	Чили	135.1

На глубинах 500-678 км отмечались три пика ($M=6.4-7.6$) сейсмической активизации (рис.19, табл.8). Промежуток времени между пиками составляет около 454 суток.

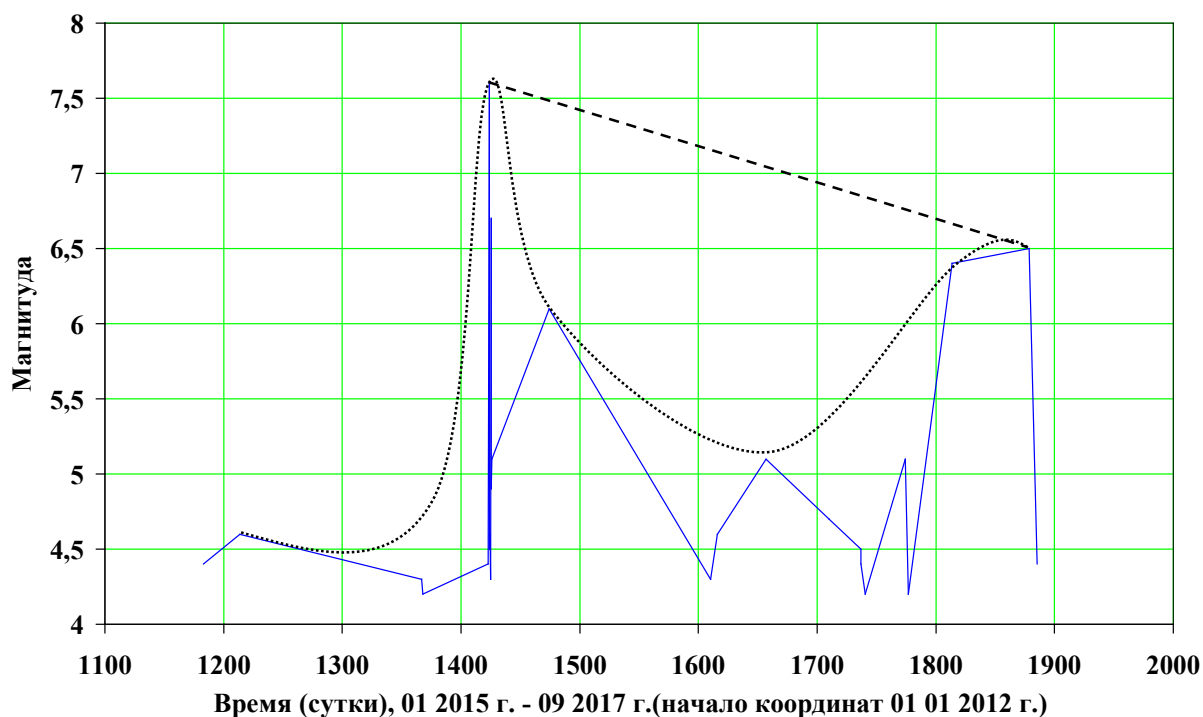


Рис.19. Последовательность проявления землетрясений, чередование периодов сейсмической активизации и затишья на глубинах 500-678 км на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы во времени за январь 2015 г. – сентябрь 2017 г. Сейсмические циклы разного порядка обозначены пунктирной, точечной линиями.

Таблица 8.

№	Год	Месяц	Число	Магнитуда	Географическое место	Глубина, км
1	2015	11	24	7.6	Перу	600.6
2	2015	11	24	7.6	Бразилия	611.7
3	2016	12	18	6.4	Бразилия	609.4
4	2017	02	21	6.5	Боливия	597.9

В распределении сейсмической активизации во времени и по глубинам на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы во времени за январь 2015 г. – сентябрь 2017 г. отмечаются периодические подъёмы и спуски (миграция) пиков активизации в пределах литосферы и верхней мантии (табл.9). Так, пик активизации в 2015.03.23 проявился на глубинах 120-300 км. После наблюдался подъем активизации: 2015.07.29 на глубинах 100-120 км, 2015.09.16 на глубинах 10-70 км (произошло землетрясение Чили, М=8.3) и 2015.11.11 на глубинах 0-10 км. Затем отметился резкий спад активизации в 2015.11.24 на глубинах 500-649 км. После наблюдался подъём в 2015.12.17 на глубинах 70-100 км, далее спад в 2016.01.24 на глубинах 120-300 км. В дальнейшем наблюдалась миграция пиков сейсмической активизации вниз: в 2016.04.16 - на глубинах 10-70 км, в 2016.11.04 - на глубинах 70-100 км, в 2016.11.20 - на глубинах 100-120 км, в 2016.12.18 - на глубинах - 500-649 км. После активизация снова повторялась в 2016.12.25 - на глубинах 10-70 км, в 2017.02.21 - на глубинах 500-649 км. Затем отмечалась миграция вверх: в 2017.04.15 - на глубинах 120-200 км (Чили), в 2017.06.14 - на глубинах 70-100 км (Гватемала) и в 2017.09.08 - на глубинах 10-70 км (произошло землетрясение Мексики, М=8.1).

Таблица 9.

Глубина, км					
(0-10)	(10-70)	(70-100)	(100-120)	(120-300)	(500-649)
				1177.2* (2015.03.23)	
			1305.1 (2015.07.29)	М=6.4	
	1354.9 (2015.09.16)		М=6.3	Чили	
1410.0 (2015.11.11)	М=8.3		Аляска		
М=6.9	Чили				1423.9 (2015.11.24)
Чили		1446.8 (2015.12.17)			М=7.6
		М=6.6		1484.4 (2016.01.24)	Перу, Бразилия
	1567.9 (2016.04.16)	Мексика		М=7.1	
	М=7.8	1769.6 (2016.11.04)		Аляска	
	Эквадор	М=6.4	1785.8 (2016.11.20)		
		Чили	М=6.4		1813.5 (2016.12.18)
	1820.5 (2016.12.25)		Аргентина		М=6.4
	М=7.6				Бразилия
	Чили				1878.5 (2017.02.21)
				1931.3 (2017.04.15)	М=6.5
		1991.3 (2017.06.14)		М=6.2	Боливия

	2077.2 (2017.09.08)	M=6.9		Чили	
	M=8.1	Гватемала			
	Мексика				

Примечание: *Время дано в сутках, начиная с января 2012 г., в скобках указана дата в формате год.месяц.число.

В промежутках глубины (в различных сейсмических средах литосферы) на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит за январь 2015 г. – сентябрь 2017 г. отмечаются характерные повторяемости землетрясений ($M \geq 2.5$) в соответствии с законом Гутенберга и Рихтера [8] (табл.10). Исключением является глубины 200-500 км, где не проявлялись землетрясения.

Таблица 10.

Глубина, км	Формула повторяемости землетрясений по закону Гутенберга - Рихтера	Максимальная магнитуда M
0-10	$\lg N = -0.756M + 5.7467, R^2 = 0.966$	6.9
10-70	$\lg N = -0.677M + 5.4994, R^2 = 0.97$	8.3
70-100	$\lg N = -0.713M + 4.8272, R^2 = 0.95$	6,9
100-120	$\lg N = -0.547M + 4.0804, R^2 = 0.94$	6.4
120-300	$\lg N = -0.675M + 4.633, R^2 = 0.87$	7.1
300-500		
500-649	$\lg N = -0.293M + 1.954, R^2 = 0.77$	7.6

Примечание: *N – средняя годовая частота землетрясений, M- магнитуда, R^2 – достоверность аппроксимации

Как видно из таблицы 10, на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы за январь 2015 г. – сентябрь 2017 г. значение коэффициента наклона (b) графика повторяемости землетрясений по глубине распределено следующим образом: 0-10 км $b=0.75$; 10-70 км $b=0.67$; 70-100 км $b=0.71$; 100-120 км $b=0.54$; 120-300 км $b=0.67$; 500-649 км $b=0,29$ (сравнительно низкое значение). Очевидно, что значение коэффициента графика повторяемости землетрясений выражает свойства сейсмической среды

Следует отметить, что максимальная магнитуда на глубинах изменяется от $M=6.4$ (на глубинах 100-120 км) до $M=8.3$ (на глубинах 10-70 км). На глубинах 500-649 км значение магнитуды достигало $M=7.6$.

Заключение

1. В последовательности проявления землетрясений (разного параметра) на сопряжении Тихоокеанской, Северо-, Южноамериканской, Карибской, Наска, Кокос плит литосферы за январь 2015 г. – сентябрь 2017 г. установлен универсальный параметр сейсмических процессов - иерархия сейсмических циклов. Цикл первого порядка, очевидно, начался с землетрясения в Чили, $M=8.3$, 16 сентября 2015 г. и через два года в конце цикла произошло землетрясение в Мексике, $M=8.1$, 08 сентября 2017 г. Иерархия сейсмических циклов предполагает,

что после землетрясения в Мексике следует ожидать спад сейсмической активизации в данном регионе.

2. Изменение магнитуды землетрясений в цикле первого порядка нелинейное, выражается эмпирической формулой:

$$M(t) = 3E - 09t^3 + 1E - 06t^2 - 0.0028t + 8.3, R^2 = 1.0,$$

где M – магнитуда, t – время (сутки), R^2 – достоверность аппроксимации. Составляющие этой формулы представляют собой функции сейсмических процессов цикла первого порядка. Изменение магнитуды землетрясений сейсмического цикла второго порядка перед главным толчком землетрясения в Мексике, 08.09.2017 г., $M=8.1$, нелинейное и выражается эмпирической формулой:

$$M(t) = 3E - 07t^3 - 4E - 05t^2 - 0.0044t + 7.6, R^2 = 1.0,$$

где M – магнитуда, t – время (сутки), R^2 – достоверность аппроксимации. Составляющие этой формулы представляют собой функции сейсмических процессов цикла второго порядка.

3. График изменения кумулятивной сейсмической энергии – неровный, ступенчатый, выражает сейсмические циклы и имеет линейный тренд:

$$E_k = (0.0428t - 47.301) \times 10^{23},$$

где E_k – кумулятивная сейсмическая энергия (эрг), t – время (сутки), коэффициент 0.0428×10^{23} имеет размерность эрг/сутки и представляет собой скорость высвобождения энергии. Флуктуация кумулятивной сейсмической энергии очерчивается снизу и сверху прямыми линиями, параллельными линейному тренду. В результате слежения графиков кумулятивной сейсмической энергии с 23.03.2015 г. (наступление периода затишья перед землетрясением в Чили, $M=8.3$), например, по начало и конец периода затишья последнего цикла второго порядка определено вероятное время наступления сейсмической активизации, равное 80 суткам и 106 суткам, соответственно. На самом деле, время проявления главного толчка землетрясения в Мексике находилось в данном отрезке ожидаемого времени.

4. На графике распределения землетрясений ($M \geq 2.5$) по глубинам и во времени отмечены сейсмические слои: 0-10 км, 10-70 км, 70-100 км, 100-120 км, 120-300 км, 500-649 км и глубины 5 км и 10 км, где наблюдается наибольшая концентрация событий. Слой на глубинах 300-500 км представляется асейсмичным слоем. Установлены проявления всплесков одновременных землетрясений на глубинах 0-300 км, перед сильными землетрясениями, как в Чили, $M=8.3$ и в Мексике, $M=8.1$. Наблюдаются сейсмические циклы в отдельно взятых сейсмических слоях, и чередование подъема и спуска (миграция) сейсмической активизации по глубине и по различным слоям. Вышеотмеченные сейсмические слои имеют различные максимальные магнитуды.
5. Определена повторяемость землетрясений по закону Гутенберга-Рихтера в сейсмических слоях. Значения коэффициента графика повторяемости землетрясений в сейсмических слоях изменяются от 0.75 в слое 0-10 км до 0.29 в слое 500-649 км и выражают, очевидно, свойства среды.

Литература

1. Электронные ресурсы http://moyplanet.ucoz.ru/index/tektonika_plit/0-25
2. 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.
3. 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.
4. Омуралиев М., Омуралиева А. Опыт слежения за динамикой сейсмичности всей Земли в целом и землетрясение Чили 16 сентября 2015 г. М=8.3. //«Вестник Института сейсмологии НАН КР». -2015. -№2(6). –С.108-125.
 5. U.S. Geological Survey (USGS <<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>>)
 6. Gutenberg B., Richter. C.F. Earthquake magnitude, intensity, energy and acceleration. //Bull. Seismol. Soc. Am. -1956a, -N46, -P.105-145.
 7. Kanamori H. The energy release in great earthquakes, //J. Geophys. Res. -1977. –N82. – P298-2987.
 8. Gutenberg B., Richter C.F. Seismicity of the Earth and associated phenomena, 2nd edition, Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1954, 310 pp.

Рецензент: д-р физ. - мат. наук Погребной В.Н.