

Викулин А.В.^{1,3}, Викулина С.А.²¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, vik@kscnet.ru² Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский³ Камчатский государственный технический университет, Петропавловск-Камчатский

Введение

Сейсмический процесс в очаге землетрясения продолжается вполне определенное, отличное от нуля время. И это отличие становится тем заметнее, чем больше магнитуда землетрясения. Для наиболее сильных землетрясений, магнитуды и размеры очагов которых достигают наибольших значений $M_W = 9-9.5$, $L = 1000-3000$ км, интенсивный афтершоковый процесс продолжается в течение многих дней, недель и даже месяцев [10, 15]. При этом сейсмичность всего региона (островной дуги), а часто и всей планеты, в целом, оказывается сосредоточенной исключительно в пределах только очага большого землетрясения и практически равна нулю за его пределами. Таким образом, пространственно-временные закономерности распределения афтершоков в очагах больших землетрясений отражают региональные и планетарные особенности сейсмического процесса Земли.

Установлено, что в очагах больших землетрясений достаточно сильные форшоки и афтершоки закономерным образом перемещаются – мигрируют. Скорости миграции наиболее сильных форшоков и афтершоков достигают «звуковых» значений $\approx 0.1 - 1$ км/сек [6, 7, 20, 23] и имеют тенденцию увеличиваться с ростом их магнитуд [2, 3]. Как видим, сейсмический процесс в очагах больших землетрясений представляет собой растянутый в течение продолжительного отрезка времени процесс выделения упругой энергии, который с достаточно высокими скоростями в определенных направлениях (вдоль очагов больших землетрясений) «перемещается» (мигрирует) в пределах сейсмофокальной зоны на большие расстояния.

Сейсмофокальные зоны, в пределах которых располагаются очаги больших землетрясений, являясь составной частью литосферы, вместе со всей планетой участвуют во вращательном движении вокруг ее оси. Линейные скорости движения поверхности Земли в местах интенсивного проявления сейсмического процесса (в диапазоне экватор \pm средние широты) достигают значений, по величинам сравнимым со скоростями миграции форшоков и афтершоков в очагах больших землетрясений. Поэтому можно ожидать, что вследствие эффекта Доплера, связанного с вращением Земли, направленное перемещение форшоков и афтершоков в ориентированных вдоль широт и долгот очагах больших землетрясений, будет характеризоваться разными значениями и частот и скоростей их миграции.

Методика исследования

Подробно методика исследования описана в [3]. Кратко суть сводится к следующему. Исследовался афтершоковый процесс пяти наиболее сильных ($M_W \approx 9$) в последнее столетие землетрясений планеты, очаги которых были вытянуты в «широтном» (latitude) и «долготном» (longitude) направлениях и имели протяженность около 1000 км и более. Такие землетрясения будем называть большими. Очаги трех землетрясений имели «широтное» (la) простирание и располагались вдоль Алеутских островов: 09.03.1957, $M = 8.8$, $N_{1,2} = 421, 9$, $n_{5.5;6.0;6.5} = 19, 17, 13$, $\varphi = 52^\circ \pm 2^\circ$, $\Delta\lambda = 18^\circ$ (179° в.д. – 163° з.д.); 28.03.1964, $M = 9.0$, $N_{1,2} = 213, (8)$, $\varphi = 58^\circ \pm 2^\circ$, $\Delta\lambda = 15^\circ$ (142° – 157° з.д.) и 04.02.1965, $M = 8.7$, $N_{1,2} = 284, 3$, $\varphi = 52^\circ \pm 2^\circ$, $\Delta\lambda = 10^\circ$ (170° в.д. - 180°). Двух «долготных» (lo)- вдоль Тихоокеанского побережья Южной Америки: Чилийское землетрясение 20.05.1960, $M = 9.5$, $N_{1,2} = 63, 5$, $n_{1,2} = 19, 3$, $\lambda = 70^\circ \pm 5^\circ$ з.д., $\Delta\varphi = 40^\circ$ (10° – 50° ю.ш.) и в Индийском океане: землетрясение Суматра 26.12.2004, $M = 9.0$, $N_{1,2} = 675, 4$, $\lambda = 98^\circ \pm 5^\circ$ в.д., $\Delta\varphi = 22^\circ$ (7° ю.ш. – 15° с.ш.). Здесь $N_{1,2}$ и $n_{1,2}$ – числа афтершоков и форшоков с $M \geq 5$ и с $M \geq 7.0$ ($M \geq 6.5$) соответственно, $n_{5.5;6.0;6.5}$ – числа форшоков с $M \geq 5.5$, $M \geq 6.0$, $M \geq 6.5$. После этих землетрясений интенсивные собственные колебания планеты регистрировались в течение месяца.

Данные о временах и координатах эпицентров главных толчков и их афтершоков использовались из следующих источников. Для землетрясения 1957 г. – из каталога NEIC [22].

Для землетрясений 1960 – 2004 гг. – из каталога ISC [19]. Данные об афтершоках с магнитудами $5 \leq M < 6$ землетрясений 1964 и 1965 гг. дополнялись данными из каталога [1].

Распределения сильных форшоков и афтершоков в очагах сильнейших землетрясений в пространстве и во времени не случайны. Такие распределения, рассматриваемые совместно с эпицентрами главных толчков, с одной стороны, определяют формирование очага на стадии форшоков и его последующее развитие на стадии афтершоков. С другой - они характеризуют сейсмичность брешей, являющихся составными частями («элементарными» кирпичиками) сейсмического процесса в пределах всего сейсмического пояса. Характерной особенностью таких распределений является колебательный процесс с амплитудой, близкой протяженностям очагов сильнейших землетрясений - сейсмических брешей или элементарных сейсмофокальных блоков.

Методом наименьших квадратов для совокупностей афтершоков и форшоков с $M \geq 5$; $M \geq 5.5$; ...; $M \geq 7.0$ в каждом из исследуемых очагов землетрясений определялись зависимости частот ν (обратных временных интервалов между последовательными во времени афтершоками и форшоками) и скоростей V от времени t :

$$\log \nu [\text{час}^{-1}] = a \cdot \log t [\text{час}] + b, \quad (1)$$

$$\log V [\text{км/час}] = A \cdot \log t [\text{час}] + B. \quad (2)$$

Значения коэффициентов A , a и разностей $B-b$ для частот и скоростей афтершоков во всех анализируемых очагах сильнейших землетрясений соотносятся следующим образом:

$$A^{lo} \approx a^{lo} \approx -0.62 \pm 0.09, \quad A^{la} \approx a^{la} \approx -0.92 \pm 0.07, \quad (B-b)^{lo} \approx (B-b)^{la} \approx 2.26 \pm 0.15. \quad (3)$$

Из (3) видно, что имеют место следующие равенства коэффициентов: «наклонов» (первые два равенства в (3)) и «свободных членов» (третье равенство в (3)). Это для широтно и долготно ориентированных очагов больших землетрясений определяет постоянную

$$\left(\frac{V}{\nu}\right)_{lo,la} = const = 10^{B-b} = L_{lo} = L_{la} = 180(130 \div 260) \text{ км}, \quad (4)$$

которая не зависит от ориентации сейсмофокальных зон.

Моментная природа сейсмического процесса

В работе [6] в результате анализа распределения афтершоков с $M \geq 5$ для очага Кроноцкого, Камчатка 5.12.1997, $M = 7.8$ землетрясения аналогичным образом была получена оценка величины отношения скорости к частоте, которая оказалась равной:

$$\left(\frac{V}{\nu}\right)_{45^0} = L_{45^0} = 150 \pm 50 \text{ км} \quad (5)$$

и близкой L_{lo} и L_{la} . Очаг Кроноцкого землетрясения расположен в северо-восточной части Курило-Камчатской дуги, простирающейся примерно под углом 45^0 (что и отражено нижним индексом в (5)) к широте. Как видим, на основании (4) и (5) имеет место равенство

$$L_{lo} = L_{la} = L_{45^0} \approx L_0, \quad (6)$$

которое, фактически, определяет константу, не зависящую от *ориентации* сейсмофокальной зоны.

В соответствии с гипотезой геолога А.В. Пейве [11] константа L_0 , как величина, имеющая «самостоятельную движущую силу», по сути, является *инвариантной к поворотам* и, тем самым, определяет физическую сущность сеймотектонического процесса – его *моментную природу*. В соответствии с гипотезой физика М.А. Садовского [14] элементарный сейсмофокальный блок L_0 имеет иерархическую структуру, ячейки которой для форшоков и афтершоков магнитудного диапазона $5 \leq M \leq 7$ имеют размеры $10 \leq L_i [\text{км}] \leq 50$.

Колебания Чандлера

Значения скоростей и частот «широтных» афтершоков $A^{lo} = a^{lo}$ (первые равенства в (3)) с высокой (не менее двух-трехкратного среднеквадратичного отклонения: 95-98%) статистической значимостью отличаются от таких же «долготных» значений $A^{la} = a^{la}$ (вторые равенства в (3)). На такую же величину отличаются и коэффициенты $a^{la} = 1.27 \pm 0.10$ и $a^{lo} = 0.88 \pm 0.12$ для форшоков широтного 1957 и долготного 1960 землетрясений соответственно. Это позволяет предположить, что интенсивность сейсмического процесса, протекающего в очаге сильнейшего землетрясения (форшоки + главный толчок + афтершоки), *взаимосвязана* с его ориентацией относительно географической широты или относительно оси вращения планеты. Новизна этого вывода

определяется сформулированным нами положением о «собственной» моментной природе геодинамического процесса, существенно дополняющем и даже во многом «переворачивающем» наши представления о той «ведущей» роли, которую ротация планеты оказывает на тектонические процессы.

В рамках существующих в настоящее время представлений принято считать, что «триггерами» геодинамических процессов часто являются резкие изменения угловой скорости вращения Земли. Сформулированный выше вывод о «собственной» моментной природе сейсмотектонического процесса позволяет предположить существование и обратного процесса, а именно: изменение скорости вращения Земли может быть вызвано тем или иным геодинамическим явлением. Доказательство этого было приведено нами ранее в работе [5]. В этой работе в рамках волновой ротационной модели тектонического процесса, опирающейся на представления о движении блоков и плит под действием «собственных моментов», колебания Чандлера напрямую удалось связать с разной интенсивностью сейсмотектонического процесса, протекающего в пределах «долготного» Тихоокеанского и «широтного», экваториального Альпийско-Гималайского поясов, как целых. Другими словами, разность между «долготными» и «широтными» коэффициентами в (3), по сути, определяет величину вызывающего колебания Чандлера момента, «прикладываемого» к планете разными по интенсивности Тихоокеанским и Альпийско-Гималайским сейсмотектоническими процессами.

Эффект Доплера

Волновая природа сейсмического процесса позволяет предположить, что вследствие связанного с вращением Земли эффекта Доплера значение «широтной» скорости (и частоты повторения) форшоков и афтершоков должно «расщепляться» на два, в то время как такое же значение «долготной» величины - нет. При этом вследствие увеличения значения скорости миграции афтершоков с ростом их магнитуд [2, 4] эффект расщепления должен быть все более значимым. Так, при $M = 7$ и соответствующей такой магнитуде скорости миграции, равной $V_{M=7} \approx 1$ км/сек [2, 24], теоретическая (theoretical, *th*) оценка величины ее расщепления на широте очагов алеутских землетрясений 1957, 1964 и 1965 гг. $\varphi = 50^\circ \div 60^\circ$ с.ш. составит:

$$\delta_{th} = \frac{2V_{\Omega}}{V_{M=7}} = \frac{2R_{Earth}\Omega}{V_{M=7}} \sin(90^\circ - \varphi) = 0.54 \pm 0.08, (7)$$

где R_{Earth} - радиус Земли, Ω - ее угловая скорость вращения.

Для проверки влияния эффекта Доплера на процесс миграции землетрясений продолжим анализ представленных выше последовательностей сильных афтершоков в очагах последних сильнейших землетрясений планеты, очаги которых имели «широтную» и «долготную» протяженности. Для этого каждая из совокупностей афтершоков разбивалась на две совокупности. В одну включались данные об афтершоках, эпицентры которых располагались к востоку (East-West, *ew*) [к югу, South-North, *sn*] от предыдущих по времени эпицентров для широтных [долготных] очагов, а в другую – к западу (West-East, *we*) [к северу, North-South, *ns*] для широтных [долготных] соответственно. Для каждой из совокупностей описанным выше способом определялись зависимости скоростей и частот от времени.

Полученные данные показывают, что значения $a_{sn,ns}^{lo}$ для «долготных» очагов не зависят от направления «движения» афтершоков $a_{ns}^{lo} = a_{sn}^{lo} = -0.67 \pm 0.07$ и равны $a^{lo} = A^{lo} = -0.67 \pm 0.09$.

Значения $A_{we,ew}^{la}$ для широтных очагов, определенные во всем анализируемом диапазоне магнитуд, в среднем, также не зависят от направления движения афтершоков и равны, в среднем, $(a^{la})_0 \approx (A^{la})_0 \approx -0.91 \pm 0.07$. В то же время, для всех трех «широтных» очагов значения коэффициентов A_{we}^{la} монотонно уменьшаются с ростом магнитуд и при $M \geq 6.5, 7.0$ достигают значений $A_{we}^{la} = -1.11 \pm 0.03$ и менее. Тем самым, «расщепление» значений коэффициентов при $M \geq 6.5-7.0$ достигает значений: $\Delta_1 = (A^{la})_0 - A_{we}^{la} \approx 0.21 \pm 0.03$.

Уменьшение значений A_{ew}^{la} с ростом магнитуды, в среднем, статистически не значимо. При этом в диапазоне магнитуд $5.5 \leq M \leq 6.5-7.0$ с ростом магнитуды имеет место достаточно устойчивое увеличение значений этого коэффициента для очага землетрясения 1957 г. Тенденция

к увеличению значения коэффициента A_{ew}^{la} имеет место и для Аляскинского землетрясения 1964 г. в области магнитуд $5.0 \leq M \leq 5.5$. Как видим, «синтезированные» на основании двух наиболее сильных широтных Андрияновского 1957 и Аляскинского 1964 землетрясений данные определяют достаточно устойчивое и статистически значимое уменьшение значений коэффициента A_{ew}^{la} во всем магнитудном диапазоне $5.0 \leq M \leq 7.0$. При этом для магнитудного диапазона $M \geq 6.5, 7.0$ справедливо равенство $\Delta_2 = (A^{la})_0 - A_{ew}^{la} \approx -0.21 \pm 0.07$.

Таким образом, полученные данные показывают, что для двух (из трех рассмотренных) наиболее сильных и протяженных широтно ориентированных очагов больших землетрясений экспериментально (experimental, ex) определенная величина расщепления составляет:

$$\delta_{ex} \approx \left| \frac{\Delta_1 - \Delta_2}{A_{we,ew}^{la}} \right| = \frac{0,42 \pm 0,10}{0,90 \pm 0,12} = 0.5 \pm 0.1. \quad (8)$$

Полученное соотношение (8) показывает, что имеет место равенство между теоретической (7) и реально наблюдаемой (8) величинами:

$$\delta_{th} \approx 0.54 \pm 0.08 = \delta_{ex} \approx 0.5 \pm 0.1,$$

что подтверждает наблюдаемое расщепление скоростей (частот) миграции афтершоков вдоль географической широты и позволяет объяснить его с помощью эффекта Доплера, связанного с вращением Земли.

Полученные для афтершоков данные подтверждаются имеющимися данными для форшоков. Действительно, «расщепление» форшокового коэффициента a^{lo} для очага долготного Чилийского 1960 землетрясения статистически не значимо: $a_{sn}^{lo} = 0.73 \pm 0.12 \approx a^{lo} = 0.88 \pm 0.12$. В то время как «расщепление» форшокового коэффициента в очаге широтного 1957 землетрясения: $a_{ew}^{la} = 0.92 \pm 0.04 < a^{la} = 1.27 \pm 0.10 < a_{we}^{la} = 2.20 \pm 0.34$ еще более отчетливое, чем афтершокового.

Заключение

В работе исследовались частоты ν и скорости V миграции афтершоков и форшоков в очагах больших ($M_W \approx 9$) землетрясений. Показано, что значения ν и V зависят от ориентации очагов при их постоянном отношении $\frac{\nu}{V} = L_0 = const$: в долготных очагах афтершоки и форшоки происходят через меньшие интервалы времени (более часто) и мигрируют с большей скоростью, чем в широтных очагах. Подтверждена ранее [2, 4] предложенная гипотеза о «собственной моментной природе» сейсмофокальных блоков. Подтверждены выводы работ [5, 25], согласно которым разные интенсивности течения афтершокового и форшокового процессов в долготных и широтных очагах больших землетрясений могут быть связаны с нутацией полюса Земли – генерировать колебания Чандлера. Приведены данные, показывающие возможность существования эффекта «расщепления» значений повторяемости афтершоков и форшоков в очагах широтных больших землетрясений и дано его объяснение в рамках эффекта Доплера, связанного с вращением планеты.

Следует отметить, что близкие по сути эффекты обнаруживают движущиеся атомы и молекулы и в «обычных» с общепринятой физической точки зрения телах, а не только в геологических [11] и геофизических [14] средах, которые были рассмотрены в настоящей работе. Действительно, при высокой температуре и низкой плотности основной причиной расширения спектральных линий движущихся атомов газа является эффект Доплера [16, с. 522-524]. Тепловое движение приводит к тому, что у части атомов возникает составляющая скорости, направленная к наблюдателю, а у другой части атомов составляющая имеет противоположное направление. В результате спектральная линия, являющаяся суперпозицией линий, испускаемых многими атомами, вследствие эффекта Доплера расширяется [9, с. 134-136].

Как видим, аналогия между потоком атомов и сейсмическим процессом, на которую более 40 лет тому назад обратил внимание Ю.В. Ризниченко [13, с. 127-130], и на «спектральном» уровне может быть продолжена. В контексте настоящей работы аналогом теплового движения атомов могут являться «самосогласованные» волновые [2, 3, 24] движения «элементарных» сейсмофокальных блоков L_0 и слагающих их иерархических ячеек L_i , расщепление спектральных

линий движения которых и происходит вследствие эффекта Доплера, связанного с вращением планеты.

Авторы признательны В.А. Широкову и И.Р. Абубакирову за важные смысловые замечания, которые помогли существенно улучшить работу.

Список литературы

1. Викулин А.В. О магнитудной классификации алеутских землетрясений // Прогноз сейсмической опасности на Дальнем Востоке. Южно-Сахалинск: МСССС, 1984. С. 95.
2. Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. Петропавловск-Камчатский: КОМСП ГС РАН, 2003. 150 с.
3. Викулин А.В. Волновая природа ротационного упруго поля литосферы // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Труды научной конференции с участием иностранных ученых. 10-13 окт. 2005. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2006. С.401-419.
4. Викулин А.В., Иванчин А.Г. Ротационная модель сейсмического процесса // Тихоокеанская геология. 1998. Т. 17. № 6. С. 95-103.
5. Викулин А.В., Кролевец А.Н. Чандлеровское колебание полюса и сеймотектонический процесс // Геология и геофизика. 2001. № 6. С. 996-1009.
6. Викулин А.В., Сеньков С.Л. Миграция форшоков и афтершоков в очаге Кроноцкого землетрясения 5.12.1997 с $M = 7,5-7,7$ // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 года. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: Из-во Камчатской государственной академии рыбопромыслового флота, 1998. С. 80-88.
7. Вилькович Е.В., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И. Волны тектонических деформаций на крупных разломах // Доклады АН СССР. 1974. Т. 219. № 1. С. 77-80.
8. Геологическая история СССР и тектоника плит / Ред. Л.П. Зоненшайн, Е.И. Приставакина. М.: Наука, 1989. 206 с.
9. Вихман Э. Квантовая физика. М.: Наука, 1974. 416 с.
10. Иванов В.В. Эволюция процессов землетрясения // Успехи физических наук. 1991. Т. 161. №3. С. 31-67.
11. Пейве А.В. Тектоника и магматизм // Изв. АН СССР, сер. геологическая, 1961. № 3. С. 36-54.
12. Ребецкий Ю.Л., Маринин А.В. Неоднородность напряженного состояния в геосреде при подготовке Суматринского землетрясения 26.12.2004 // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Труды научной конференции с участием иностранных ученых. 10-13 окт. 2005. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2006. С. 427-437.
13. Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. Избранные труды. М.: Наука, 1985. 408 с.
14. Садовский М.А. Новая модель геофизической среды // Bulgarian Geophys. J. 1986. V. XII. № 2. P. 3-10.
15. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121-150.
16. Цань Сюэ-сень. Физическая механика. М.: Мир, 1965. 544 с.
17. Daly M.C. Correlation between Nazka-Farallon plate kinematics and forearc basin evolution in Ecuador // Tectonics. 1989. 8. № 4. P. 769-790.
18. Geist E.L., Childs J.R., Scholl D.W. The origin of basins of the Aleutian ridge: implications for block rotation of an arc massif // Tectonics. 1988. 7. N 2. P.327-341.
19. ISC: International Seismological Centre. On-Line Bulletin. <http://www.isc.as.uk/>.
20. Mogi K. Migration of seismic activity // Bull. of the Earthquake Res. Inst.. 1968. V.46. P. 53-74.
21. Mogi K. Some features of recent seismic activity in and near Japan. Activity before and after great earthquakes // Bull. of the Earthquake Res. Inst. 1969 V.47. P.395-417.
22. NEIC: Earthquake Search Results. U. S. Geological Survey. Earthquake Data Base. http://earthquake.usgs.gov/eqcenter/recenteqsww/Quakes_all.php.
23. Plafker G., Savage J.C. Mechanism of the Chilean earthquake of May 21-22, 1960 // Bull. Geol. Soc. Amer. 1970. 81. N 4. P.1001-1030.
24. Vikulin A.V. Earth rotation, elasticity and geodynamics: earthquake wave rotary model // Earthquake source asymmetry, structural media and rotation effects / Eds. R. Teisseyre, M. Takeo, E. Majewski. Berlin Heidelberg New York: Springer, 2006. P. 271-289.
25. Vikulin A.V., Krolevets A.N. Seismotectonic processes and the Chandler oscillation // Acta Geoph. Polonica. 2002. V. 50. No 3. P. 395-411.