

32. Рашидов В.А., Гавриленко Г.М. Проверка сообщений о проявлениях подводной вулканической деятельности в пределах Соломоновой островной дуги // Вулканология и сейсмология. 2002. № 1. С. 22-28.
33. Рашидов В.А., Горшков А.П., Иваненко А.Н. Магнитные исследования над подводными вулканами Эсмеральда и Софу // Изучение глубинного строения земной коры и верхней мантии на акваториях морей и океанов электромагнитными методами. М: ИЗМИРАН., 1981. С. 213-218.
34. Рашидов В.А., Невретдинов Э.Б., Селянгин О.Б., Невретдинов Эр.Б. Геолого-геофизические исследования гайотов Магеллановых гор Тихого океана // Вестник КРАУНЦ. Наука о Земле. 2003. № 1. С. 103 - 126.
35. Рашидов В.А., Округин В.М., Ладыгин В.М., Округина А.М. Подводная вулканическая группа Ковачи (Соломонова островная дуга) // Вулканология и сейсмология. 2002. № 5. С. 11-24.
36. Рашидов В.А., Сапожников Е.А. Геолого-геофизические исследования подводной вулканической группы Софу (Идзу-Бонинская островная дуга) // Вулканология и сейсмология. 2001. № 4. С. 39-47.
37. Glasby G.P., Chercashov G.A., Gavrilenko G.M. et al. Submarine hydrothermal activity and mineralization on the Kurile and western Aleutian island arcs, N.W. Pacific // Marine Geology. 2006. Vol. 231. P. 163-180.

УДК 550.34

АФТЕРШОКИ И ЭФФЕКТ ДОПЛЕРА

А.В. Викулин¹, С.А. Викулина²

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, e-mail: vik@kscnet.ru*

²*Камчатский филиал Геофизической службы РАН*

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*) простираие и располагались вдоль Алеутских островов: 09.03.1957, $M = 8.8$, $N_{1,2} = 421, 9$, $\varphi = 52^\circ \pm 2^\circ$, $\Delta\lambda = 18^\circ$ (179⁰ в.д. – 163⁰ з.д.); 28.03.1964, $M = 9.0$, $N_{1,2} = 213, (8)$, $\varphi = 58^\circ \pm 2^\circ$, $\Delta\lambda = 15^\circ$ (142⁰ – 157⁰ з.д.) и 04.02.1965, $M = 8.7$, $N_{1,2} = 284, 3$, $\varphi = 52^\circ \pm 2^\circ$, $\Delta\lambda = 10^\circ$ (170⁰ в.д. - 180⁰). Двух «долготных» (*lo*)- вдоль Тихоокеанского побережья Южной Америки: Чилийское землетрясение 20.05.1960, $M = 9.5$, $N_{1,2} = 63, 5$, $\lambda = 70^\circ \pm 5^\circ$ з.д., $\Delta\varphi = 40^\circ$ (10⁰ – 50⁰ 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., $\Delta\varphi = 22^\circ$ (7⁰ ю.ш. – 15⁰ с.ш.). Здесь $N_{1,2}$ – числа афтершоков с $M \geq 5$ и с $M \geq 7.0$ ($M \geq 6.5$) соответственно. 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].

Развитие форшокового и афтершокового процессов в очагах широтного Аляскинского 1964 г. и долготного Чилийского 1960 г. землетрясений представлено на рис. 1 «а» и «б», «в»

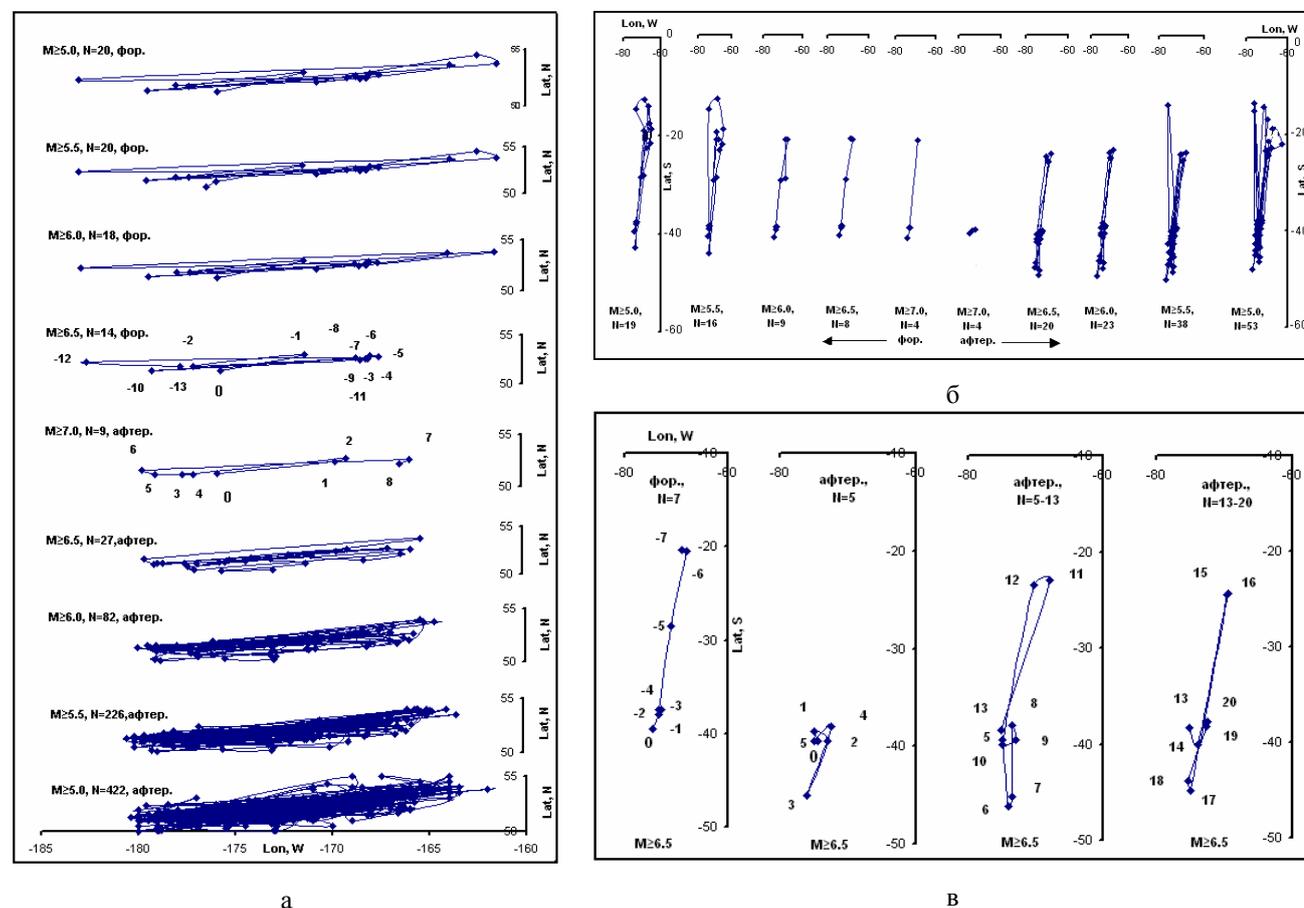


Рис. 1. Развитие афтершокового (афтер) и форшокового (фор) процессов в очагах Аляскинского 1964 (а) и Чилийского 1960 (б, в) землетрясений на различных магнитудных уровнях. Цифрами обозначены последовательные во времени афтершоки (положительные числа) и форшоки (отрицательные числа). 0 – положения главных толчков.

соответственно. Видно, что 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. Видно, что характерной особенностью таких распределений является колебательный процесс с амплитудой, близкой протяженностям очагов сильнейших землетрясений - сейсмических брешей или элементарных сейсмофокальных блоков. Достаточно сильные форшоки не отмечены в очагах Суматринского 2004 землетрясения и землетрясения 1965 на Алеутских островах. Поэтому в дальнейшем в этой статье ограничимся анализом распределения только афтершоков.

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

Таблица 1. Параметры (a , A ; $B - b$) корреляционных зависимостей, определяющих частоты и скорости миграции (осцилляций) афтершоков в пределах «долготных» и «широтных» очагов больших землетрясений планеты с $M_W \approx 9$ в 1957 – 2004 гг.

Магнитуда, M_S , афтер.	«Долготные» (lot , lo) очаги землетрясений						
	Чили, 1960, $M_W=9,5$		Суматра, 2004, $M_W=9,0$		Средние $a^{lo} / A^{lo} / (B - b)^{lo}$		
	N	$a^{lo} / A^{lo} / (B - b)^{lo}$	N	$a^{lo} / A^{lo} / (B - b)^{lo}$			
≥ 5.0	63	-0.62 / -0.34 / 1.82	674	-0.49 / -0.61 / 2.36	-0.56±0.06 / -0.48±0.13 / 2.09±0.27		
≥ 5.5	44	-0.71 / -0.44 / 1.88	195	-0.69 / -0.82 / 2.45	-0.70±0.01 / -0.63±0.19 / 2.17±0.28		
≥ 6.0	28	-0.62 / -0.38 / 1.88	49	-0.77 / -0.78 / 2.21	-0.70±0.07 / -0.58±0.20 / 2.05±0.17		
≥ 6.5	21	-0.66 / -0.46 / 1.97	12	-0.66 / -0.77 / 2.57	-0.66±0.00 / -0.62±0.15 / 2.27±0.30		
≥ 7.0	4	-0.68 / (0.28) / (0.64)	4	-0.95 / -0.89 / 2.56	-0.81±0.06 / -0.89 / 2.56		
Средние $a/A/B-b$		-0.66±0.03 / -0.41±0.04 / 1.89±0.04		-0.71±0.12 / -0.77±0.07 / 2.43±0.08	-0.69±0.08 / -0.64±0.10 / 2.33±0.19		
Магнитуда, M_S , афтершоков	«Широтные» (lat , la) очаги землетрясений Алеутских островов						
	Андреяновские, 1957, $M_W=8,8$		Аляска, 1964, $M_W=9,0$		Амчитка, 1965, $M_W=8,7$		Средние $a^{la} / A^{la} / (B - b)^{la}$
	N	$a^{la} / A^{la} / (B - b)^{la}$	N	$a^{la} / A^{la} / (B - b)^{la}$	N	$a^{la} / A^{la} / (B - b)^{la}$	
≥ 5.0	422	-0.69 / -0.67 / 2.2	213	-0.91 / -0.91 / 2.01	283	-0.85 / -0.84 / 2.00	-0.82±0.08 / -0.88±0.08 / 2.07±0.09
≥ 5.5	226	-0.84 / -0.80 / 2.12	75	-0.94 / -0.87 / 1.94	83	-0.88 / -0.87 / 2.02	-0.89±0.04 / -0.85±0.03 / 2.03±0.06
≥ 6.0	81	-0.85 / -0.82 / 2.10	23	-0.92 / -1.02 / 2.13	20	-0.93 / -0.91 / 2.19	-0.90±0.03 / -0.92±0.04 / 2.14±0.03
≥ 6.5	26	-1.01 / -0.88 / 2.12	8	-0.92 / -1.02 / 2.48	7	-1.01 / -1.23 / 2.48	-0.98±0.04 / -1.04±0.14 / 2.36±0.16
≥ 7.0	8	-0.82 / -1.10 / 2.66	-	-	3	-1.00 / -0.92 / 1.81	-0.91±0.09 / -1.01±0.09 / 2.24±0.43
Средние $a/A/B-b$		-0.84±0.07 / -0.86±0.11 / 2.24±0.19		-0.92±0.01 / -0.96±0.07 / 2.14±0.17		-0.93±0.07 / -0.89±0.03 / 2.10±0.19	-0.90±0.06 / -0.93±0.08 / 2.19±0.11

Примечание: значения в скобках не учитывались ввиду их больших отличий от средних значений, превышающих утроенное среднеквадратичное отклонение.

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

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

Примеры зависимостей (1) и (2), построенных для афтершоков в очагах Алеутского 1957, Чилийского 1960, Аляскинского 1964 и Суматринского 2004 землетрясений, приведены на рис. 2. Значения коэффициентов A , a и разностей $B-b$ для частот и скоростей афтершоков во всех анализируемых очагах сильнейших землетрясений представлены табл. 1. Из данных, представленных в табл. 1, видно, что справедливы следующие равенства:

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

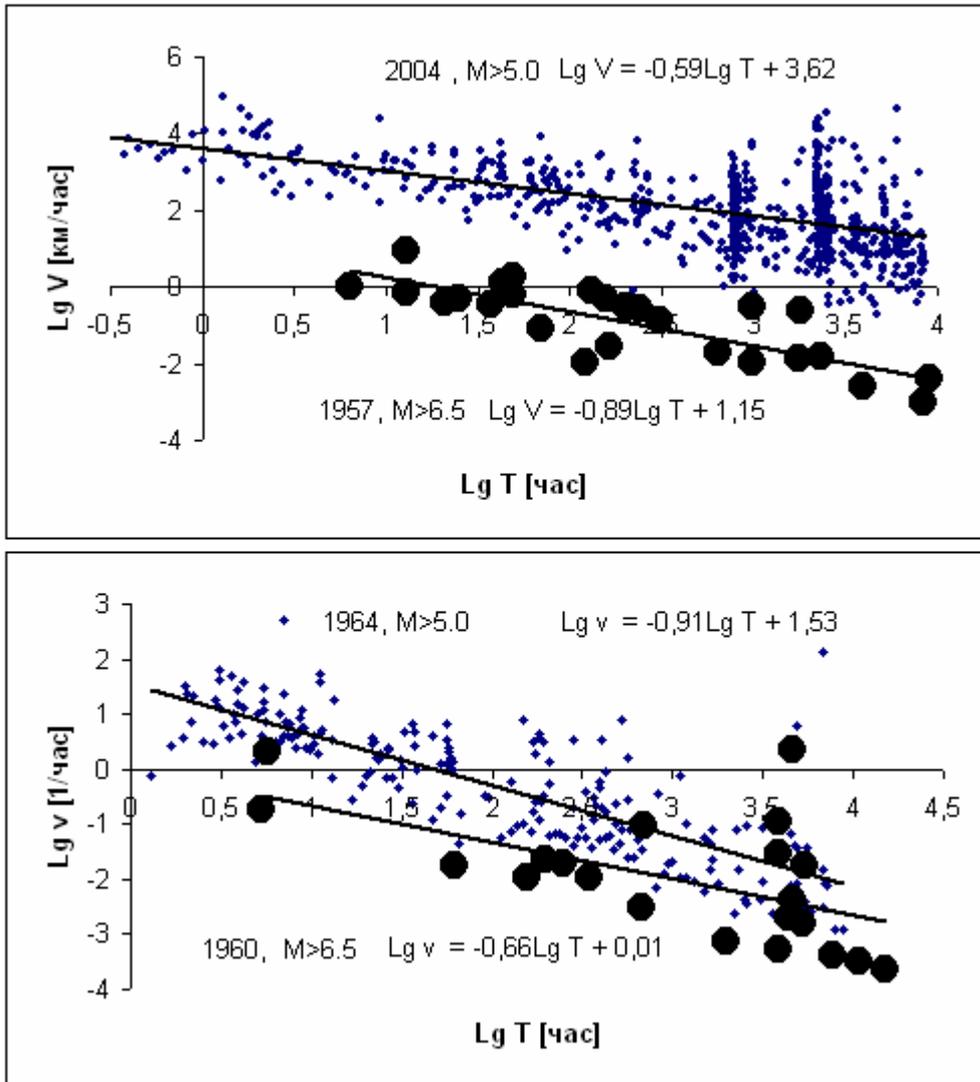


Рис. 2. Примеры зависимостей для частот v (повторяемостей) и скоростей V афтершоков от времени, полученные на разных магнитудных уровнях $M \geq 5$ и $M \geq 6.5$ для Алеутского 1957, Чилийского 1960, Аляскинского 1964 и Суматринского 2004 землетрясений.

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:

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

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 такой же величины, которая оказалась равной:

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

которая, как видим, оказалась 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.

Очаги больших землетрясений состоят из совокупностей субочагов, размеры каждого из которых, в среднем, составляют 200 (100-300) км [8, 12, 17, 18, 21]. Очаг Кроноцкого землетрясения имеет «простое» строение – он представлен одним сейсмофокальным блоком с протяженностью близкой L_{45^0} . Поэтому величину L_0 , по сути, являющейся «элементарным» сейсмофокальным блоком, можно считать *не зависящей от его ориентации*.

В этой связи величина L_0 является не просто константой. В соответствии с гипотезой геолога А.В. Пейве (1961) такая константа, 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)). Это позволяет предположить, что интенсивность сейсмического процесса, протекающего в очаге сильнейшего землетрясения (форшоки + главный толчок + афтершоки), *взаимосвязан* 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 сеймотектонического 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 сеймотектонического 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 сеймотектоническими 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:

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

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 (табл. 1). 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. Данные, характеризующие параметры этих зависимостей представлены табл. 2 и 3.

Из данных табл. 2 видно, что значения $a_{sn,ns}^{lo}$ для «долготных» очагов не зависят от направления «движения» афтершоков $a_{ns}^{lo} = a_{ns}^{lo} = -0,67 \pm 0,07$ и равны $a^{lo} = A^{lo} = -0.67 \pm 0.09$.

Таблица 2. Значения параметров $a_{sn,ns}^{lo}$ корреляционной зависимости, определяющих частоты миграции афтершоков в пределах «долготных» очагов землетрясений планеты с $M_W \approx 9$.

Магнитуда афтершоков	«Долготные» очаги землетрясений: север – юг ($n-s$)				
	Чили, 1960, $M_W=9,5$		Суматра, 2004, $M_W=9,0$		Среднее
	N	a_{ns}^{lo}	N	a_{ns}^{lo}	
≥ 5.0	32	-0.67	343	-0.50	-0.59 ± 0.09
≥ 5.5	19	-0.80	100	-0.69	-0.75 ± 0.05
≥ 6.0	14	-0.83	26	-0.84	-0.84 ± 0.01
≥ 6.5	13	-0.43	7	-0.46	-0.45 ± 0.02
≥ 7.0	-	-	-	-	-
Среднее		-0.68		-0.62	-0.66 ± 0.04
Магнитуда афтершоков	«Долготные» очаги землетрясений: юг – север ($s-n$)				
	Чили, 1960, $M_W=9,5$		Суматра, 2004, $M_W=9,0$		Среднее
	N	a_{sn}^{lo}	N	a_{sn}^{lo}	
≥ 5.0	31	-0.57	331	-0.48	-0.53
≥ 5.5	25	-0.62	95	-0.68	-0.65
≥ 6.0	14	-0.40	23	-0.65	-0.53
≥ 6.5	8	-0.92	5	-0.67	-0.79
≥ 7.0	-	-	3	-0.92	-0.92
Среднее		-0.63 ± 0.12		-0.68 ± 0.10	-0.68 ± 0.11

Из данных табл. 3 видно, что значения $A_{we,ew}^{la}$, определенные во всем анализируемом диапазоне магнитуд, в среднем, также не зависят от направления движения афтершоков $A_{we}^{la} = -0.91 \pm 0.16 \approx A_{ew}^{la} = -0.88 \pm 0.09$, в среднем, $A_{we}^{la} \approx A_{ew}^{la} \approx -0.90 \pm 0.12$ и равны, согласно данным табл. 1, $(a^{la})_0 = -0.90 \pm 0.06 \approx (A^{la})_0 = -0.93 \pm 0.08$, в среднем, $(a^{la})_0 \approx (A^{la})_0 \approx -0.91 \pm 0.07$. В то же время, как видно из данных табл. 3, 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, как видно из данных табл. 3, в среднем, статистически не значимо. При этом в диапазоне магнитуд $5.5 \leq M \leq 6.5-7.0$ с ростом магни-

туды 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 облсти магнитуд $5.0 \leq M \leq 5.5$. Как видим, «синтезированные» на основании двух наиболее сильных широтных Андреяновского 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 $\Delta_2 = (A^{la})_0 - A_{ew}^{la} \approx -0.21 \pm 0.07$.

Таблица 3. Значения параметров $A_{we,ew}^{la}$ корреляционной зависимости, определяющих скорости миграции афтершоков в пределах «широтных» очагов землетрясений планеты с $M_W \approx 9$.

Магнитуда, M_S , афтершоков	«Широтные» (lat, la) очаги землетрясений: с востока на запад($w-e$)						Среднее
	Андреяновские, 1957, $M_W=8,8$		Аляска, 1964, $M_W=9,0$		Амчитка, 1965, $M_W=8,7$		
	N	A_{we}^{la}	N	A_{we}^{la}	N	A_{we}^{la}	
≥ 5.0	208	-0.61	110	-0.90	144	-0.88	-0.80±0.12
≥ 5.5	115	-0.72	40	-0.94	43	-0.89	-0.85±0.09
≥ 6.0	42	-0.83	15	-1.03	11	-0.97	-0.94±0.08
≥ 6.5	13	-1.08	4	-1.13	-	-	-1.11±0.03
≥ 7.0	4	-2.27	-	-	-	-	-2.27
Среднее		-0.81±0.41		-1.00±0.11		-0.91±0.04	-0.91±0.16
Магнитуда, M_S , афтершоков	«Широтные» (lat, la) очаги землетрясений: с запада на восток ($e-w$)						Среднее
	Андреяновские, 1957, $M_W=8,8$		Аляска, 1964, $M_W=9,0$		Амчитка, 1965, $M_W=8,7$		
	N	A_{ew}^{la}	N	A_{ew}^{la}	N	A_{ew}^{la}	
≥ 5.0	212	-0.72	102	-0.92	139	-0.81	-0.82±0.07
≥ 5.5	111	-0.88	35	-0.73	40	-0.87	-0.83±0.06
≥ 6.0	39	-0.81	8	-1.11	8	-0.88	-0.93±0.12
≥ 6.5	13	-0.69	3	-1.17	5	-1.10	-0.99±0.20
≥ 7.0	4	-0.72	-	-	-	-	-0.72
Среднее		-0.76±0.06		-0.98±0.16		-0.89±0.08	0.88±0.09

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.

Заклучение. В работе исследовались частоты ν и скорости V миграции афтершоков 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 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 процесса 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 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 геолого- [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, р. 271-289] 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 за важные смысловые замечания, которые помогли ему 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 сейсмотектонический процесс // Геология и геофизика. 2001. № 6. С. 996-1009.
6. Викулин А.В., Сеньюков 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. N 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. 582 p. // 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.
25. Vikulin A.V., Krolevets A.N. Seismotectonic processes and the Chandler oscillation // Acta Geoph. Polonica. 2002. V. 50. No 3. P. 395-411.

УДК 551.21

ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ИЗВЕРЖЕНИЙ

В.А. Дрознин

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН. Петропавловск-Камчатский, 683006; e-mail: dva@kscnet.ru

Извержения вулканов с их колоссальной энергетикой выноса вещества и раскаленными потоками лавы послужили толчком для развития представлений о внутреннем строении планеты, но именно это спонтанное высвобождение энергии оказались тормозом в понимании механизма извержений. Для объяснения обеспечения вулкана энергией привлекались все осваиваемые человечеством способы от горения нефти и серы, до ионизированных потоков водорода и естественных ядерных реакторов. Сейчас, с развитием теории плитовой тектони-