

ISBN 978-5-328-00222-6

**ВЕСТНИК
Камчатского
государственного
технического
университета**



Научный
журнал

Основан в 2002 г.

ВЫПУСК

10

2009

Издательство



КамчатГТУ

Петропавловск-Камчатский

Литература

1. Компьютерный тренажер холодильных установок RPS-4000: Модель «Провизионные кладовые, рефрижераторный транспорт, морозильный комплекс, рыбокомбинат, кондиционер»: Руководство для обучаемого. – СПб.: Transas Ltd, 2005.
2. <http://www.Transas>

УДК 550.34

ПЕРИОДИЧНОСТЬ КАТАСТРОФИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ И ИХ МИГРАЦИЯ ВДОЛЬ ОКРАИНЫ ТИХОГО ОКЕАНА

А.В. Викулин, Д.Р. Акманова, Н.А. Осипова
(Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН),
С.В. Чебанюк, Т.В. Залипина, Ю.О. Фирсова, И.А. Яценко (КамчатГТУ)

С помощью созданной базы данных извержений вулканов мира выявлены периодичности вулканического процесса как в мировом масштабе, так и в локальном: для отдельных районов окраины Тихого океана и отдельно взятого вулкана. Оказалось, что выявленные периоды близки периодам сейсмического процесса (в годах): $T_1 \approx 198 \pm 17$, $T_2 \approx 2T_1 \approx 376 \pm 12$ и $T_3 \approx 4T_1 \approx 762 \pm 17$. «Четность» этих периодов может свидетельствовать о «замкнутости» окраины Тихого океана. Кроме того, изучалось пространственно-временное распределение вулканической активности в пределах окраины Тихого океана. Показано, что вулканические извержения с $W \geq 4$ (объем изверженного материала составляет $0,01 \text{ км}^3$ и более) за последние 12 тыс. лет имеют тенденцию мигрировать по часовой стрелке в направлении от Новой Зеландии до Южной Америки со скоростью около 10 км/год , и это подтверждает ранее полученные результаты.

By means of world's volcanoes eruptions database periodicity of volcanic process in separate areas of suburb of Pacific Ocean and for separately taken volcano is revealed. It has appeared that the revealed periods are close to the periods of seismic process: $T_1 \approx 198 \pm 17$, $T_2 \approx 2T_1 \approx 376 \pm 12$ and $T_3 \approx 4T_1 \approx 762 \pm 17$ years. "Parity" of these periods can testify to "isolation" of suburb of Pacific ocean. Existential distribution of volcanic activity within suburb of Pacific Ocean was studied. It has been shown, that volcanic eruptions with $W \geq 4$ (the volume of erupted is material 0.01 км^3 and more) for last 12 thousand years tend to migrate clockwise in the direction from New Zealand to the South America with a speed about 10 km/year , confirming earlier received results.

Сейсмичность и вулканизм как процессы планетарного масштаба взаимосвязаны. Большая часть всех землетрясений, в том числе и самые сильные, располагаются в пределах тектонически активных поясов. Вблизи таких поясов расположены и самые активные вулканы мира. Согласно обзору данных, приведенных в работах (Акманова, 2007; Викулин, 2003; Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007), отсутствуют данные, однозначно указывающие на существование взаимосвязи этих процессов. Тем не менее ряд исследователей склоняется к мысли о существовании такой взаимосвязи.

Ранее авторами (Викулин, 2003; Акманова, 2007; Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007) была сформулирована гипотеза о том, что взаимосвязь имеет не локальный, а региональный характер, т. е. взаимосвязаны не конкретные землетрясения и извержения вулканов, а их совокупности.

Обзор опубликованных данных по миграции вулканической активности показывает, что миграция была выявлена как в пределах отдельно взятых вулканических центров (Kenneth et al, 1986; Clague, Dalrymple, 1987; Lonsdale, 1988; Леонов, 1991), так и в пределах вулканических дуг (Berg, Sutton, 1974; Sauers, 1986; Викулин, 2003). Скорости миграции вулканической активности в пределах отдельно взятых вулканических центров расположены в пределах $V = 3 \cdot 10^{-5} \div 2 \cdot 10^{-3} \text{ км/год}$; в пределах вулканических дуг $V = 100$ и 900 км/год . В работе (Викулин, 2003) установлено на региональном уровне существование корреляции между извержениями вулканов и сильнейшими землетрясениями. На этом основании был сделан вывод о миграции вулканической активности.

Данные, полученные ранее авторами, позволили сделать предположение о существовании миграции вулканической активности в пределах окраины Тихого океана, являющимся одним из самых активных регионов планеты (Акманова, 2007; Акманова, Осипова, 2007; Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007).

С целью изучения свойств миграции вулканического процесса исследовались закономерности распределения в пространстве и времени катастрофических извержений ($W \geq 6$) окраины Тихого океана, а также велась проверка рассчитанных ранее (Акманова, 2007; Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007; Акманова, Викулин, Осипова, 2008) значений скоростей миграции. С этой целью был создан электронный каталог, включающий все известные (датированные) данные о вулканических извержениях планеты: временной период $T = 9850$ г. до н. э. – 2007 гг., число извергавшихся вулканов $N = 630$, количество их извержений $n = 6415$ (Акманова, 2007; Акманова, Осипова, 2007; Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007). В качестве количественной характеристики извержений была использована шкала $1 \leq W \leq 7$, отражающая в логарифмическом масштабе объем извергнутого материала. При этом значениям W соответствуют объемы материала, равные $10^5, 10^6, \dots, 10^{11}$ м³.

Периодичность вулканического процесса

Развитие любого глобального процесса Земли происходит неравномерно, и в проявлении его максимумов выделяется периодичность. И.И. Гущенко отмечал наличие определенной цикличности в извержениях магматических вулканов (И.И. Гущенко, 1985). Он выделяет циклы со следующими периодами: 1 год, 5–6 лет, 23 года, 60–90 лет, 180 лет. В работе (Белов, 1986) убедительно доказано, что в истории Земли в течение последних 600 млн лет в глобальном проявлении вулканизма имели место периодические пульсационные колебания вулканической активности, происходившие на фоне общего увеличения масштабов вулканизма. По данным количественных расчетов, в глобальном проявлении древнего вулканизма Земли также устанавливается четкая периодичность, при которой максимумы проявления вулканизма отмечаются через каждые 190–200 млн лет.

Анализ данных, характеризующих частоту вулканических извержений за последние 400 лет, показал экспоненциальное нарастание числа событий от года к году. Однако это связано не с природным нарастанием активности процесса, а с возрастанием числа сообщений о них по мере расширения границ географических знаний и количества наблюдателей в средневековье. На фоне этого роста отличаются локальные временные всплески в 1630–1700, 1730–1810, 1840–1910, 1920–1930 и 1950–1960 гг., которые возможно, но не очевидно отражают активизацию процесса как такового. Наиболее вероятные гармоники, характеризующие частоту вулканических извержений, имеют продолжительность 20–30, 50, 80, 110–130, 160 и около 200 лет. Наиболее характерные гармоники вариаций энергии вулканических извержений имеют продолжительность 30, 70 и 100 лет (Леви и др., 2003). В работе (Хаин, Халилов, 2008) приводятся данные о наличии 1–2-, 11-, 22-, 50-, 60-, 80-летних циклов.

Методом Фурье-анализа выявлялись периоды вулканического процесса не только в мировом, но и в локальном масштабе, т. е. периоды для вулканов, расположенных в пределах окраины Тихого океана и его отдельно взятых регионов, в том числе восточной и западной окраин. Анализ показал наличие большого количества выявленных периодов, заключенных в широком диапазоне – от 170 до 2700 лет. Значения выявленных периодов оказались различными для каждой выборки. Все выборки содержат периоды, продолжительности которых заключены в следующих диапазонах:

$$T_1 \approx 198 \pm 17 \text{ лет};$$

$$T_2 \approx 2T_1 \approx 376 \pm 12 \text{ лет};$$

$$T_3 \approx 4T_1 \approx 762 \pm 17 \text{ лет}.$$

Кроме этого, методом Фурье-анализа выявлялись периоды для отдельно взятых вулканов мира ($N = 9$), число извержений которых составляет более 70. Анализ показал наличие только четных периодов: $2T_0 \approx 210$ лет, $4T_0 \approx 390$ лет, $6T_0 \approx 610$ лет, $8T_0 \approx 830$ лет, $10T_0 \approx 1010$ лет, $12T_0 \approx 1230$ лет, где $T_0 \approx 110 \pm 10$ лет, что может быть связано с «замкнутостью» окраины Тихого океана.

Полученные периоды наблюдаются в извержениях как одного вулкана, так и нескольких, расположенных в пределах одного региона. Так, извержения вулкана Кракатау (Индонезия) в 416 и 1883 гг. произошли с интервалом в 1467 года, извержения вулкана Бона (Аляска) в 110 и 740 гг. – с периодом в 630 лет. Вулкан Чурчил (Аляска) извергался в 60 и 740 гг. с периодом 640 лет, вулканы Амбрим (Новые Гибриды) в 50 г. и Кувае (Новые Гибриды) в 1452 г. – с периодом в 1402 года, вулканы Кагуяк (Аляска) в 415 г. и Новарупта (Аляска) в 1912 г. – с периодом в 1497 лет. Интервал между извержениями вулканов Ксудач и Опала (Камчатка) составляет 370 лет.

Миграция вулканической активности

Исследование пространственно-временного распределения извержений тихоокеанских вулканов будет проводиться на плоскости с осями «расстояние по дуге $0 \leq L \leq 45\,400$ км – время извержений t ». В качестве расстояния вдоль дуги была выбрана линия, примерно совпадающая с осями глубоководных желобов и границами тектонических плит. Определенная таким образом общая протяженность окраины Тихого океана от вулкана Бакл Айленд (Антарктика) до Десепсьон (Южные Шетландские острова) составила 45 400 км (Викулин, Водинчар, 2005; Викулин, Водинчар, 2006).

Из данных об извержениях вулканов окраины Тихого океана, приведенных в каталоге, были сформированы три выборки: извержения с объемом выброшенного материала $W \geq 4, 5, 6$. Алгоритм выявления и построения миграционной цепочки в каждой из трех сформированных совокупностей извержений вулканов сводился к следующему. Для каждого i -го извержения вулкана с координатой L_i и временем t_i в каталоге искалось такое извержение вулкана $I + 1$, координата и время которого $L_{i+1} \geq L_i, t_{i+1} \geq t_i$. Извержение вулкана, попавшее хотя бы один раз в миграционную цепочку, исключалось из дальнейшего анализа. В результате применения описанного алгоритма в каталоге тихоокеанских извержений вулканов в период 9850 г. до н. э. – 2007 гг. было выявлено достаточно большое количество миграционных цепочек (N) вулканических извержений с различным объемом выброшенного материала (W):

W	N
$W \geq 4$	36
$W \geq 5$	20
$W \geq 6$	11
Всего	67

Вследствие этого были выявлены все возможные миграционные цепочки вулканических извержений и определены их параметры: количество событий в каждой цепочке, их продолжительность и протяженность вдоль окраины Тихого океана, скорость миграции в цепочке. Примеры выявленных цепочек и их параметры представлены на рис. 1–4 и в табл. 1, 2.

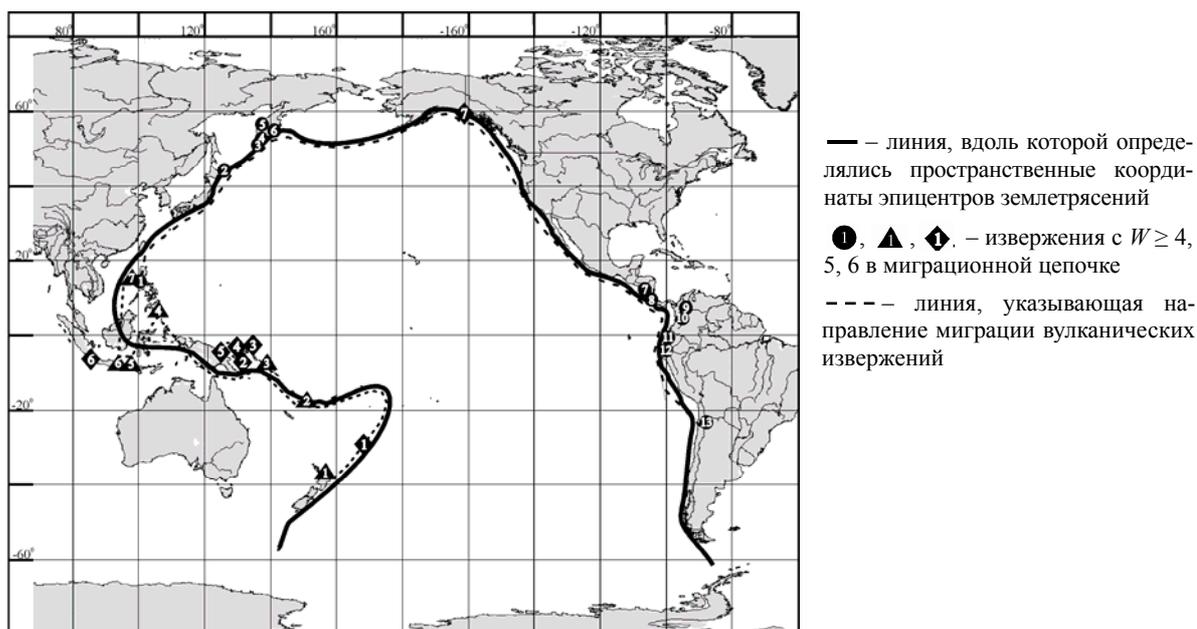


Рис. 1. Расположение вулканов окраины Тихого океана (цифры обозначают последовательность вулканических извержений в разных цепочках событий)

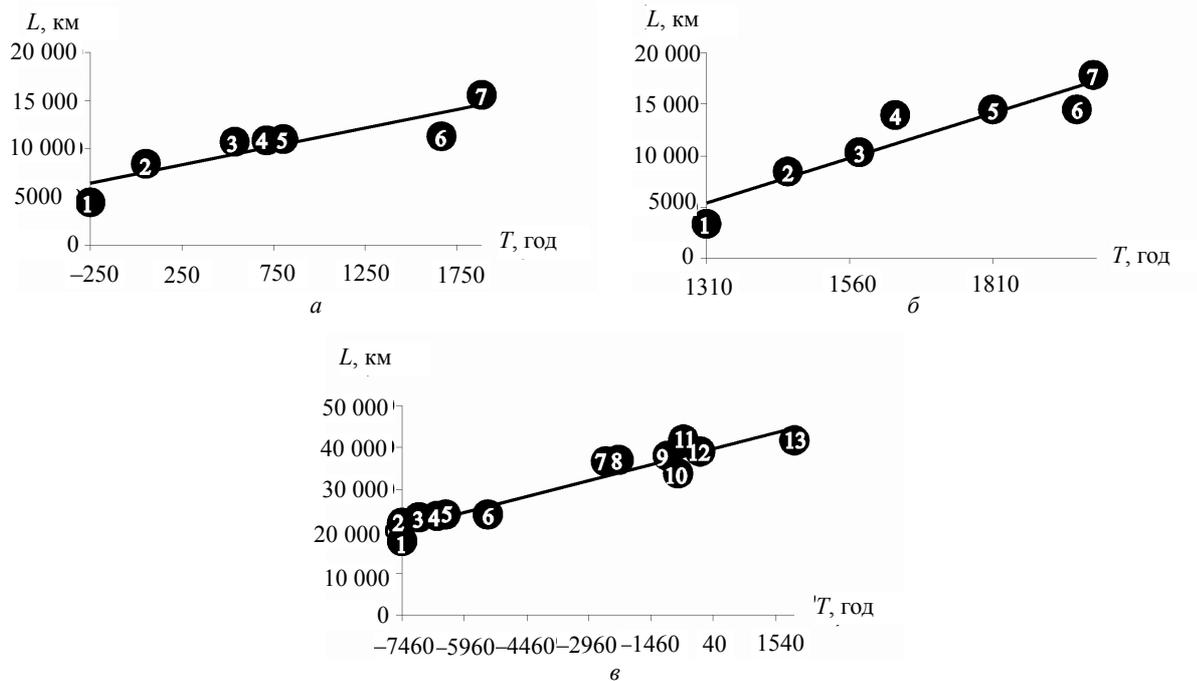


Рис. 2. Пример миграционных цепочек очагов сильнейших землетрясений с $W \geq 6$ (а), $W \geq 5$ (б), $W \geq 4$ (в)

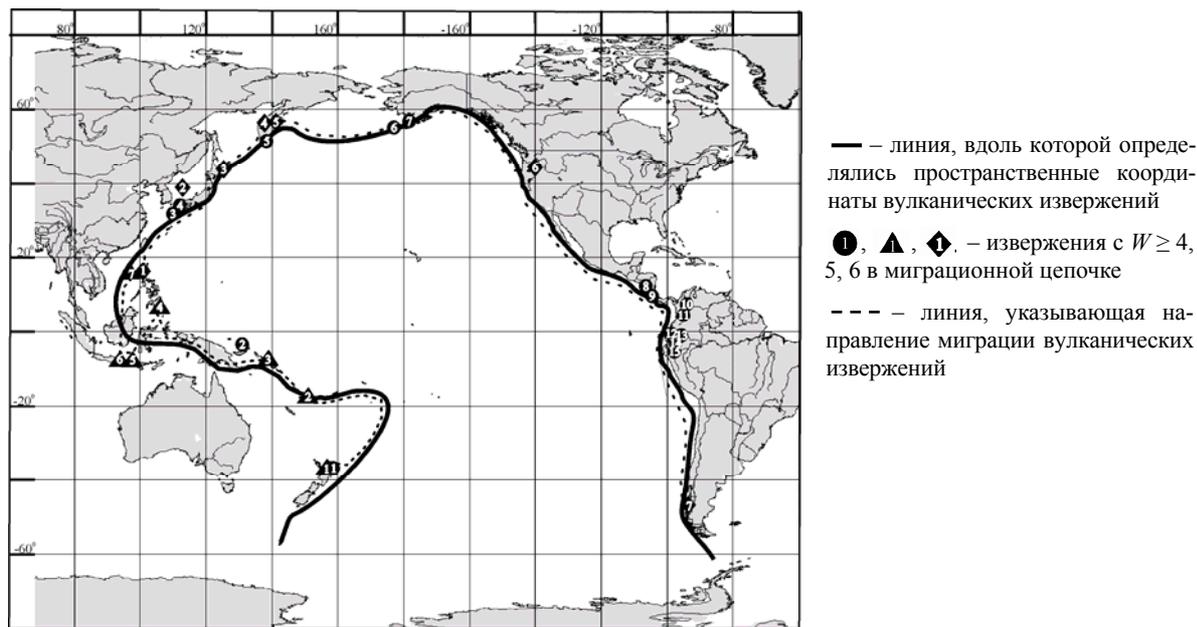


Рис. 3. Расположение вулканов окраины Тихого океана

Таблица 1

Параметры выявленных миграционных цепочек

p	$W \geq 6$			$W \geq 5$			$W \geq 4$		
	W	T, год	L, км	W	T, год	L, км	W	T, год	L, км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6	-250	4490	5	1310	3386	6	-7460	17 821
2	6	50	8467	6	1452	8391	4	-7450	22 019
3	6	540	10 769	6	1580	10 362	5	-7050	23 386
4	6	710	10 906	5	1641	13 919	6	-6600	23 720
5	6	800	10 967	7	1815	14 451	5	-6400	23 848
6	6	1660	11 311	5	1963	14 548	5	-5400	23 883

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
7	6	1883	15 514	6	1991	17 821	5	-2550	36 580	
8							4	-2250	36 846	
9							4	-1050	37 861	
10							4	-850	37 870	
11							5	-690	38 320	
12							4	-270	39 111	
13							4	1993	41 787	
a, км/год			4	a, км/год			18	a, км/год		3
ΔT , год			2133	ΔT , год			681	ΔT , год		9453
ΔL , км			11 024	ΔL , км			14 435	ΔL , км		23 966

Примечание. Символ p – порядковый номер землетрясения в цепочке; W – объем изверженного материала; L – расстояние вдоль дуги от L_{\min} ; a – скорость миграции; ΔT – продолжительность цепочки во времени; ΔL – протяженность цепочки в пространстве.

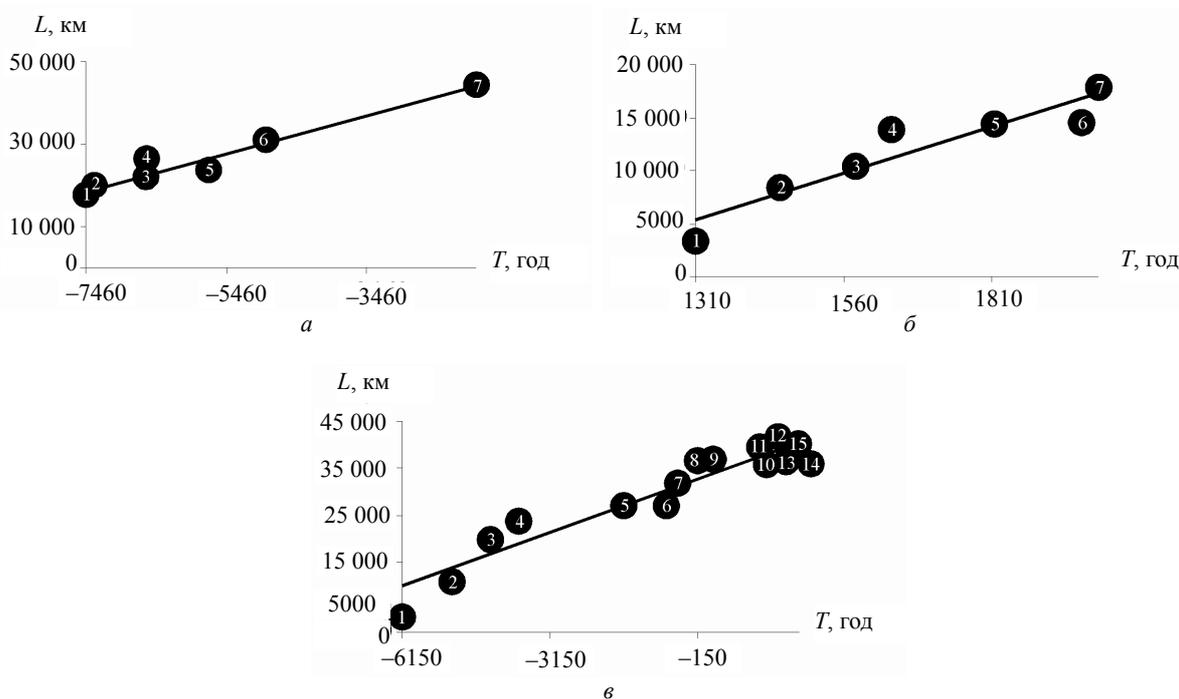


Рис. 4. Пример миграционных цепочек очагов сильнейших извержений с $W \geq 6$ (а), $W \geq 5$ (б), $W \geq 4$ (в)

Таблица 2

Параметры выявленных миграционных цепочек

p	$W \geq 6$			$W \geq 5$			$W \geq 4$		
	W	T , год	L , км	W	T , год	L , км	W	T , год	L , км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6	-7460	17 821	5	1310	3386	5	-6150	3386
2	6	-7350	20 142	6	1452	8391	5	-5150	10 776
3	6	-6600	22 019	6	1580	10 362	7	-4350	19 750
4	6	-6600	23 720	5	1641	13 919	4	-4350	19 889
5	6	-5700	23 786	7	1815	14 451	4	-3790	23 620
6	7	-4900	31 149	5	1963	14 548	6	-1645	27 062
7	6	-1890	44 364	6	1991	17 821	5	-800	27 119
8							4	-570	31 727
9							4	-170	36 613
10							4	170	36 846
11							4	1330	37 861
12							4	1350	37 870
13							4	1570	38 274
14							4	1660	38 348

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15							4	1744	38 376
16							4	1916	39 111
<i>a</i> , км/год			5	<i>a</i> , км/год			18	<i>a</i> , км/год	
ΔT , год			5570	ΔT , год			681	ΔT , год	
ΔL , км			26543	ΔL , км			14435	ΔL , км	

Примечание. Символ *p* – порядковый номер землетрясения в цепочке; *W* – объем изверженного материала; *L* – расстояние вдоль дуги от L_{min} ; *a* – скорость миграции; ΔT – продолжительность цепочки во времени; ΔL – протяженность цепочки в пространстве.

Для каждой из выявленных 67 цепочек определялось значение скорости миграции методом наименьших квадратов. Диапазон скоростей «глобальной» миграции извержений вулканов с различными значениями *W* ($W \geq 4$, $W \geq 5$ и $W \geq 6$) оказался расположенным в пределах $2 < V < 96$ км/год (рис. 3–5). Как видим, полученные в работе (Акманова, Викулин, Осипова, 2008) данные о скоростях миграции извержений вулканов с $W \geq 4$ не противоречат ранее полученным результатам.

Гистограммы, представленные на рис. 5, указывают на наличие некоторых закономерностей в распределении скоростей миграции катастрофических вулканических извержений ($W \geq 4, 5, 6$).

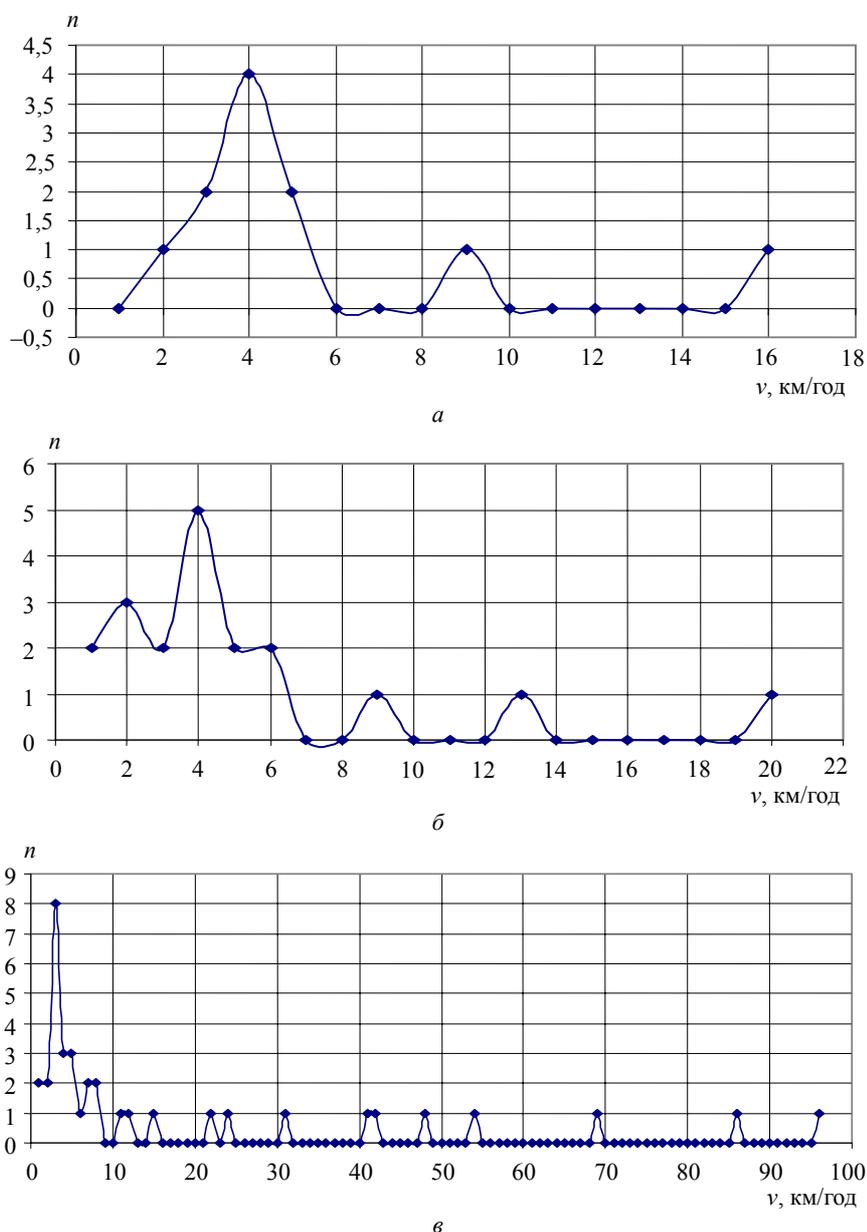


Рис. 5. Графики зависимости миграционных цепочек (*n*) от скорости (*v*) для извержений вулканов с $W \geq 6$ (а), $W \geq 5$ (б), $W \geq 4$ (в)

Общей закономерностью для всех значений W в первом (грубом) приближении можно считать наличие «широкого высокоамплитудного» максимума в диапазоне $2 \leq V \leq 24$ (км/год) и нескольких «узких малоамплитудных» максимумов, соответствующих более высоким значениям скоростей $31 \leq V \leq 96$ км/год. Такое распределение скоростей миграции позволяет предположить существование общих закономерностей для всего класса катастрофических извержений в диапазоне $W \geq 4, 5, 6$. Все «локальные» максимумы скоростей миграции, выявленные на гистограммах (см. рис. 5), приведены в табл. 3.

Таблица 3

«Локальные» максимумы скоростей миграции вулканических извержений

$W \geq 6$	$W \geq 5$	$W \geq 4$
2	2	
		3
4	4	4
	6	
7		7
9	9	
		12
	13	
		15
16		
	20	
		22
		24
		31
		41
		48
		54
		69
		86
		96

Согласно табл. 3 в диапазоне значений $2 \leq V \leq 22$ (км/год) скорости для всех анализируемых диапазонов W имеют тенденцию группироваться в пределах достаточно «узких» диапазонов (ограниченных жирными линиями): $3 \pm 1, 8 \pm 1, 19 \pm 3$ км/год. Именно в эти узкие диапазоны, отстоящие друг от друга на $\Delta V = 16$ км/год, попадают 53 (79%) значения скоростей из 67.

Расчет средней миграционной цепочки

Средняя миграционная цепочка (СМЦ) – это цепочка со средними параметрами: скоростью (\bar{V} , км/год), количеством событий в цепочке (\bar{n}), продолжительностью цепочки ($\Delta \bar{T}$, год), протяженностью цепочки вдоль дуги ($\Delta \bar{L}$, км). Приведенные выше данные позволили рассчитать параметры СМЦ (табл. 4) для различных значений W (объем выброшенного материала).

Таблица 4

Параметры средних миграционных цепочек для различных объемов выброшенного материала

Параметры СМЦ	Объем выброшенного материала		
	$W \geq 4$	$W \geq 5$	$W \geq 6$
\bar{V}	17	11	3
$\Delta \bar{T}$	4449	4808	4684
$\Delta \bar{L}$	19 784	19 731	13 496
\bar{n}	13	8	5

Как следует из табл. 4, параметры (\bar{V} , $\Delta\bar{T}$, $\Delta\bar{L}$, \bar{n}) средней цепочки не слишком зависят от объема выброшенного материала мигрирующих извержений. При этом среднюю скорость миграции можно принять за $V \approx 10$ км/год.

Вероятность появления средней миграционной цепочки

Известно, что вулканические извержения имеют тенденцию перемещаться в пространстве и времени. Поэтому определение вероятности появления одной миграционной цепочки с параметрами \bar{V} , $\Delta\bar{T}$, $\Delta\bar{L}$, \bar{n} (см. табл. 4) необходимо рассчитывать путем определения значений соответствующих условных вероятностей. Однако представляется, что наименьшее значение вероятности существования одной СМЦ будет соответствовать случаю, когда все (\bar{V} , $\Delta\bar{T}$, $\Delta\bar{L}$, \bar{n}) параметры цепочки рассматриваются как независимые.

Если каждая выборка ($W \geq 4, 5, 6$) характеризуется своим набором параметров (табл. 5): количеством событий (n), протяженностью вдоль окраины Тихого океана (ΔL , км), продолжительностью временного интервала между последним и первым событием в выборке (ΔT , лет), количеством выявленных цепочек (Nc), – тогда вероятность появления одной СМЦ определяется по формуле

$$P = P_1 P_2 P_3, \tag{1}$$

где P_1 – вероятность появления цепочки с \bar{n} событиями в цепочке из общего числа событий N каталога:

$$P_1 = \frac{\bar{n}}{N}; \tag{2}$$

P_2 – вероятность появления цепочки длительностью ΔT во всем временном интервале каталога T :

$$P_2 = \frac{\Delta T}{T}; \tag{3}$$

P_3 – вероятность появления цепочки с пространственной протяженностью ΔL в пределах окраины Тихого океана протяженностью L :

$$P_3 = \frac{\Delta L}{L}. \tag{4}$$

Вероятность появления Nc таких цепочек рассчитывается как

$$P_{Nc} = PNc. \tag{5}$$

Таблица 5

Параметры	Объем выброшенного материала		
	$W \geq 4$	$W \geq 5$	$W \geq 6$
n	460	162	58
ΔL	41 913	41 913	41 061
ΔT	11 857	11 841	9471
Nc	36	20	11

Примечание. Символ n – количество событий в цепочке; ΔL – протяженность цепочки вдоль окраины Тихого океана; ΔT – продолжительность временного интервала выборки; Nc – количество выявленных цепочек.

С помощью данных табл. 5 были получены значения для вероятностей, рассчитанных с применением соотношений (2)–(6) (табл. 6).

Как можно видеть из данных, приведенных в табл. 5, значения вероятностей P , P_1 , P_2 , P_3 различаются в зависимости от объема выброшенного материала не более чем на порядок. Однако для всех W значение P_{Nc} остается равным: $0,2 \leq P_{Nc} \leq 0,66$. Как показывает анализ, в случае снятия ограничения (одно значение может попасть в миграционную цепочку только один раз) число выделяемых цепочек увеличивается на порядок (см. табл. 6). Это означает, что $P_{Nc} \rightarrow 1$.

Другими словами, объединение вулканических извержений с объемом выброшенного материала $W \geq 4$ является не случайным, а закономерным явлением вулканического процесса в пределах Тихого океана. При этом средняя скорость миграции извержений вулканов с $W \geq 4$ должна составлять около 10 км/год, или $\approx 0,3$ см/с, что подтверждает вывод, сделанный в работе (Викулин, 2003).

Таблица 6

Значения, определяющие вероятности существования одной средней миграционной цепочки в случае, когда ее параметры считаются независимыми

Значения вероятностей	Объем выброшенного материала			
	$W \geq 4$	$W \geq 5$	$W \geq 6$	Диапазон W
P_1	0,03	0,05	0,4	0,03–0,4
P_2	0,4	0,4	0,5	0,4–0,5
P_3	0,5	0,5	0,3	0,3–0,5
P	0,006	0,01	0,06	0,006–0,01
P_{Nc}	0,2	0,2	0,66	0,2–0,66

Примечание. Символ P – вероятность появления одной цепочки; P_1 – вероятность появления цепочки с \bar{n} событиями в цепочке из общего числа событий N каталога; P_2 – вероятность появления цепочки длительностью $\Delta \bar{T}$ во всем временном интервале каталога T ; P_3 – вероятность появления цепочки с пространственной протяженностью $\Delta \bar{L}$ в пределах окраины Тихого океана протяженностью L ; P_{Nc} – вероятность появления Nc таких цепочек.

В случае, когда одно извержение вулкана может быть неоднократно составной частью миграционных цепочек, число выявленных цепочек миграции извержений вулканов (N) с разным объемом выброшенного материала (W) представляется в виде следующего соотношения:

W	N
$W \geq 4$	454
$W \geq 5$	160
$W \geq 6$	55
Всего	669

Выводы

1. Анализ пространственно-временных закономерностей вулканического процесса окраины Тихого океана показал, что вулканические извержения с $W \geq 4$ за последние 12 тыс. лет имеют тенденцию мигрировать по часовой стрелке в направлении от Новой Зеландии до Южной Америки со скоростью около 10 км/год, что подтверждает полученные ранее результаты (Акманова, Викулин, Осипова, 2008).

2. В результате проведенного анализа данных о вулканических извержениях мирового каталога, окраины Тихого океана и его регионов с использованием разработанного программного комплекса было доказано существование периодичностей вулканического процесса (в годах): $2T_0 \approx 210$, $4T_0 \approx 390$, $6T_0 \approx 610$, $8T_0 \approx 830$, $10T_0 \approx 1010$, $12T_0 \approx 123$, где $T_0 \approx 110 \pm 10$ лет.

Расчеты сделаны студентами КамчатГТУ во время написания ими курсовых работ и прохождения преддипломной практики в лаборатории геодинамики переходных зон ИВиС ДВО РАН.

Литература

1. Акманова Д.Р. Особенности вулканической активности окраины Тихого океана за последние 12 тыс. лет // Пробл. комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Тез. докл. I региональной науч.-техн. конф., Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2007 г. – Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2007. – С. 98.
2. Акманова Д.Р., Осипова Н.А. О взаимосвязи сейсмического и вулканического процессов на примере окраин Тихого океана // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2007. – № 10. – С. 144–155.
3. Акманова Д.Р., Викулин А.В., Осипова Н.А. Миграция сейсмической и вулканической активности как тектонофизический процесс // Тектонофизика и актуальные вопр. наук о Земле: Тез. докл. Всерос. конф., Москва, 13–17 октября 2008 г. – М.: ИФЗ, 2008. – С. 205–207.
4. Белов С.В. О периодичности современного и древнего вулканизма Земли // ДАН СССР. – 1986. – Т. 291. – № 2. – С. 421–425.

5. Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. – Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. – 151 с.
6. Викулин А.В., Водинчар Г.М. Спектр энергии потока сейсмичности // Материалы ежегод. конф., посвященной Дню вулканолога. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2005. – С. 167–174.
7. Викулин А.В., Водинчар Г.М. Волны миграции сейсмической энергии // Тектоника, глубинное строение и минерагения востока Азии: Материалы V Косыгинских чтений, Хабаровск, 24–27 января 2006 г. – Хабаровск, 2006. – С. 206–209.
8. Моделирование геодинамических процессов окраины Тихого океана / А.В. Викулин, Г.М. Водинчар, И.В. Мелекесцев и др. // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: Сб. докл. IV междунар. конф., Петропавловск-Камчатский, 14–17 августа 2007 г. – Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН. – 2007. – С. 275–280.
9. Голицын Г.С. Объяснение зависимости частота – объем извержений вулканов // ДАН. – 2003. – Т. 390. – № 3. – С. 394–396.
10. Гуценко И.И. Цикличность извержений вулканов мира // Вулканология и сейсмология. – 1985. – № 2. – С. 31–43.
11. Современная геодинамика и гелиогеодинамика: 500-летняя хронология аномальных явлений в природе и социуме Сибири и Монголии: Учеб. пособие для вузов. Кн. 2 / К.Г. Леви, Н.В. Задонина, Н.Е. Бердникова и др. – Иркутск: ИрГТУ, 2003. – 383 с.
12. Леонов В.Л. О некоторых закономерностях развития гидротермальной и вулканической деятельности на Камчатке // Вулканология и сейсмология. – 1991. – № 2. – С. 28–40.
13. Хаин В.Е., Халилов Э.Н. Пространственно-временные закономерности сейсмической и вулканической активности. – Бурнас: SWB, 2008. – 304 с.
14. Berg E., Sutton G.H. Dynamic interaction of seismic and volcanic activity of the Nazca plate edges // Phys. of the Earth and Plan. Inter. – 1974. – № 9. – P. 45–68.
15. Clague D.A., Dalrymple G.B. The Hawaiian – Emperor volcanic chain. P. I. Geologic Evolution // Volcanism in Hawaii. Chap. I. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 1350. – Washington, 1987. – P. 5–54.
16. Gresta S., Marzocchi W., Mulargia F. Is there a correlation between larger local earthquakes and the end eruptions at mount Etna volcano, Sicily // Geophys. J. Int. – 1994. – № 1. – P. 230–232.
17. Migration of volcanism in the San Francisco volcanic field, Arizona / L. Kenneth, E.M. Tanaka, G. Shoemaker et al // GSA Bulletin. February. – 1986. – Vol. 97. – № 2. – P. 129–141.
18. Lonsdale P. Geography and history of the Louisville hot spot chain in the southwest Pacific // J. Geophys. Res. – 1988. – Vol. 93. – № 34. – P. 3078–3104.
19. Sauer J. The westward migration of geophysical events in the Aleutians, 1986 // Cycles. – 1986. – № 9. – P. 203–204.

УДК 550.4

ПОВТОРЯЕМОСТЬ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И МИГРАЦИИ ИХ ОЧАГОВ ВДОЛЬ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПОЯСА

*А.В. Викулин, Д.Р. Акманова, Н.А. Осипова
(Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН),
С.В. Чебанюк, А.Ю. Михалина, Е.И. Сумакова, Е.В. Якимова (КамчатГТУ)*

С использованием большого объема данных выявлены периодичности планетарного сейсмического процесса. В результате спектрального Фурье-анализа получены периоды $T_0 \approx 116 \pm 1$, $2T_0 \approx 195 \pm 6$, $4T_0 \approx 388 \pm 4$, $8T_0 \approx 786 \pm 9$. «Четность» этого ряда, по-видимому, может быть связана с симметрией процесса – «замкнутостью» сейсмических поясов. Анализ пространственно-временных закономерностей сейсмического процесса окраины Тихого океана показал, что землетрясения с $M \geq 7$ имеют тенденцию мигрировать по часовой стрелке в направлении от Новой Зеландии до Южной Америки со скоростью около 300 км/год.

With the help of great scope of data periodicity of planetary seismic process has been revealed. As a result of spectral Fourier's analysis the periods equal $T_0 \approx 116 \pm 1$, $2T_0 \approx 195 \pm 6$, $4T_0 \approx 388 \pm 4$ and $8T_0 \approx 786 \pm 9$ were obtained. «Parity» of these periods can be connected with symmetry of process – «isolation» of seismic belts. The analysis of existential laws of seismic process of suburb of Pacific Ocean has shown, that earthquakes with $M \geq 7$ tend to migrate clockwise in a direction from New Zealand to the South America with a speed about 300 km/year.

Первые результаты исследования сейсмичности позволили выявить и продемонстрировать на достаточно большом материале такие свойства сейсмичности, как повторяемость землетрясений и их миграция – закономерное перемещение во времени и пространстве вдоль всего сейсмического пояса некоторой его части или отдельно взятых очагов сильнейших землетрясений (Тамразян, 1962; Рихтер, 1963; Duda, 1963; Mogi, 1968, 1969). Обзор таких данных на начало XXI в. содержится в работах (Викулин, 2001, 2003).

На основании анализа мировых баз данных (Соловьев, Го, 1974, 1975; Новый каталог ..., 1975; Викулин, Ким, 1983; Catalogue ..., 1958, 1966, 1968; Duda, 1965, 1992; Centennial Earthquake Catalog; ISC; JMA; NEIC) был составлен электронный каталог, включающий все известные (датированные) землетрясения (2150 г. до н. э. – август 2008 г.) «до начала инструментального периода» (до XX в.) и с $M \geq 6,0$, произошедшие в течение «инструментального периода» (с XX в. до настоящего времени). Сейсмические события в базе характеризуются следующими параметрами: время в очаге (год, месяц, день, час, минута, секунда), координаты очага (долгота и широта в градусах), глубина очага (в км) и магнитуда. Всего в базе приведены сведения о 12 145 землетрясениях (Акманова, Осипова, 2007; Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007).

Повторяемость землетрясений

Известно много примеров, свидетельствующих о повторяемости сильных землетрясений в одном месте через определенные интервалы времени. Для сильнейших ($M \geq 8$) тихоокеанских землетрясений выделяется период их повторения в одном месте: $T = 100 \pm 50$ лет.

Проведенный Фурье-анализ всего мирового каталога, а также Тихоокеанского и Альпийского каталогов землетрясений позволил выявить на большом сейсмологическом материале статистически значимые периоды сейсмического процесса. Значения выявленных периодов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения периодов сейсмического процесса, выявленных разными способами

Фурье-анализ			
Мировой, Тихоокеанский и Альпийский каталоги	Мировой каталог	Тихий океан	Альпийский разлом
1	2	3	4
116±1	110–130	100–120	110–130
195±6	180–200	180–220	180–210
			250–270

Окончание табл. 1

1	2	3	4
388±4	300–400	380–410	350–430
	430–470		510–530
786±9	780–800	760–790	770–790

Из данных, представленных в табл. 1, следует, что выявленные периоды расположены в большом диапазоне значений: от 100 до 800 лет. Приведенные цифры подтверждают результаты, полученные ранее в работах (Кириллова, 1957; Федотов, 1965; Филипас, 1965; Shimazaki, Nakata, 1980; Jacob, 1984; Викулин, Викулина, 1989). Как видим, выявленные периоды для выборки 1 (табл. 1) попадают в пределы трех других выборок (2–4).

Между выявленными периодами (в годах) существует очевидная взаимосвязь:

$$T_0 \approx 116 \pm 1;$$

$$2T_0 \approx 195 \pm 6;$$

$$4T_0 \approx 388 \pm 4;$$

$$8T_0 \approx 786 \pm 9.$$

Большая часть из выявленных периодов может быть интерпретирована «гармоническим» рядом $T_0, 2T_0, 4T_0, 8T_0$. «Четность» этого ряда, по-видимому, может быть связана с симметрией сейсмического процесса – «замкнутостью» поясов.

Полученные данные можно рассматривать как подтверждение выявленной структуры периодичности сейсмического процесса.

Миграция очагов землетрясений

Изучение миграционных процессов позволяет выявлять районы и интервал времени (в годах) возникновения потенциальных очагов землетрясений соответствующих магнитуд.

С целью изучения свойств миграции сейсмического процесса и проверки рассчитанных ранее значений скоростей миграции очагов землетрясений исследовались закономерности распределения в пространстве и времени очагов сильнейших ($M \geq 7$) землетрясений окраины Тихого океана с использованием разработанного авторами математического алгоритма (Mogi, 1968, 1974; Вилькович, Шнирман, 1982; Кузнецов, Кейлис-Борок, 1997; Акманова, Осипова, 2007; Викулин, Водинчар, Мелекесцев и др., 2007; Акманова, Викулин, Осипова, 2008). На основе данных, представленных в базе, формировались исходные выборки: землетрясения с эпицентрами вдоль окраины Тихого океана с глубинами очага от 0 до 100 км и с магнитудами $M \geq 7; 7,5; 8; 8,5$.

Исследование распределения тихоокеанских землетрясений в пространстве и времени проводилось на плоскости с осями «расстояние по дуге $0 \leq L \leq 45\,400$ км – время извержений t ». В качестве расстояния вдоль дуги была выбрана линия, примерно совпадающая с осями глубоководных желобов и границами тектонических плит. Общая протяженность окраины Тихого океана от острова Окленд в Новой Зеландии ($L_{\min} = 0$ км) до оконечности Южной Америки составляет $L_{\max} = 45\,400$ км. Математическое определение этой линии приведено в работах (Викулин, Водинчар, 2005; Викулин, Водинчар, 2006).

Алгоритм построения миграционной цепочки на плоскости $L - t$ в каждой из четырех сформированных совокупностей землетрясений сводился к следующему. Для каждого i -го землетрясения с координатой L_i и временем в очаге t_i в каталоге искали такое землетрясение $i + 1$, в очаге которого $L_{i+1} \geq L_i, t_{i+1} \geq t_i$. Землетрясение, попавшее хоть один раз в миграционную цепочку, исключалось из дальнейшего анализа. Примеры и параметры таких миграционных цепочек приведены на рис. 1–4 и в табл. 2–3.

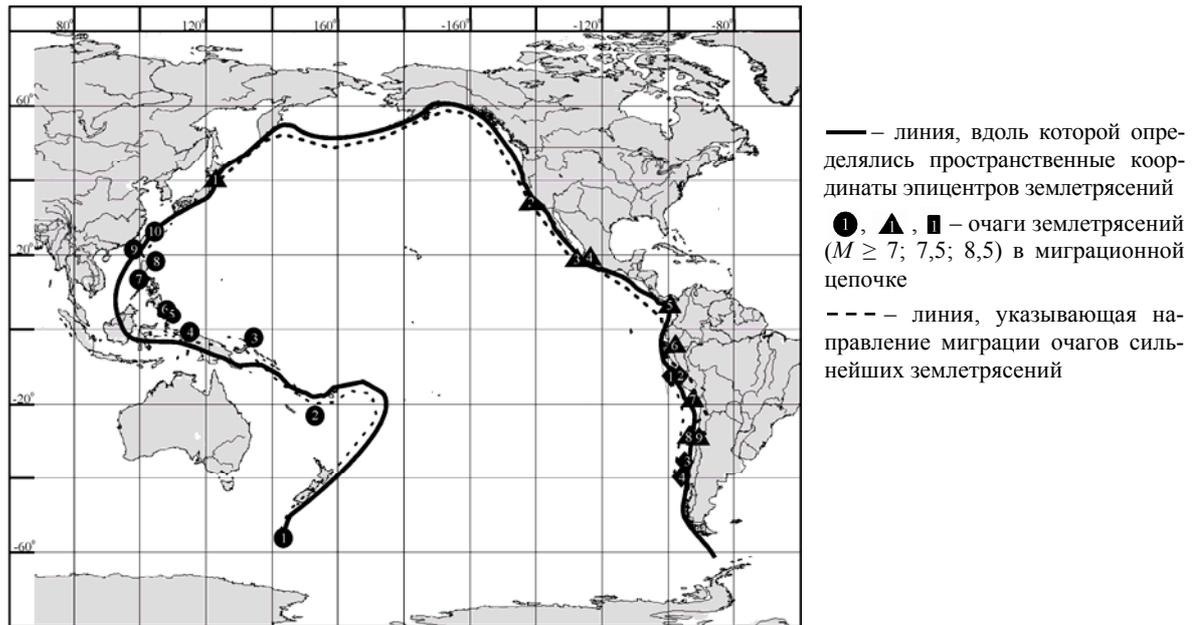


Рис. 1. Положение эпицентров тихоокеанских землетрясений

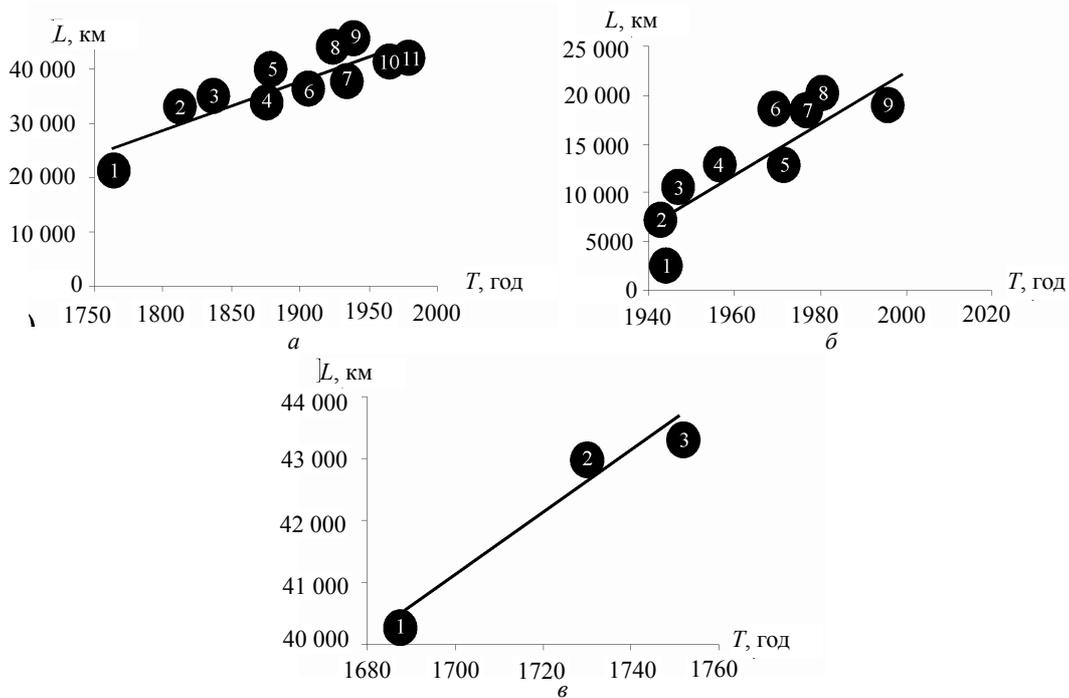


Рис. 2. Пример миграционных цепочек очагов сильнейших землетрясений с $M \geq 7,0$ (а), $M \geq 8,5$ (б), $M \geq 7,5$ (в)

Таблица 2

Параметры выявленных миграционных цепочек

$M \geq 7,0$				$M \geq 7,5$			$M \geq 8,5$		
p	M	T , год	L , км	M	T , год	L , км	M	T , год	L , км
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	7,4	1763	21 677	7,9	1943	1225	9,0	1687	40 312
2	7,0	1812	32 289	7,5	1943	7846	8,5	1730	42 896
3	7,7	1837	34 400	7,7	1946	10 624	8,7	1730	42 911
4	7,5	1875	34 527	7,5	1957	12 501	8,5	1751	43 333
5	8,0	1882	37 698	7,9	1969	13 621			
6	7,6	1906	37 933	7,5	1972	17 732			

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
7	7,3	1928	39 511	7,5	1977	18 053				
8	7,6	1933	41 390	8,0	1978	18 446				
9	7,3	1940	41 670	7,7	1999	18 477				
10	7,0	1956	42 089							
11	7,0	1965	42 100							
<i>a</i> , км/год			90	<i>a</i> , км/год			265	<i>a</i> , км/год		
ΔT , год			202	ΔT , год			56	ΔT , год		
ΔL , км			20 423	ΔL , км			17 252	ΔL , км		

Примечание. Символ *p* – порядковый номер землетрясения в цепочке; *M* – магнитуда; *T* – год землетрясения; *L* – расстояние вдоль дуги от L_{min} ; *a* – скорость миграции очагов; ΔT – продолжительность цепочки во времени; ΔL – протяженность цепочки в пространстве.

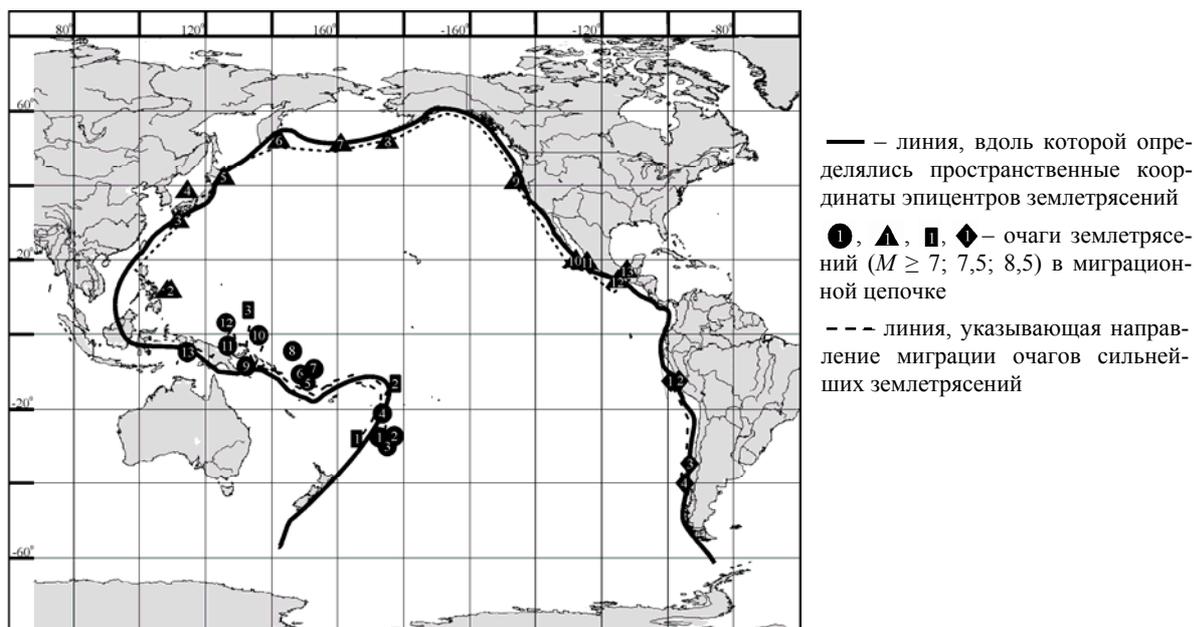


Рис. 3. Положение эпицентров тихоокеанских землетрясений

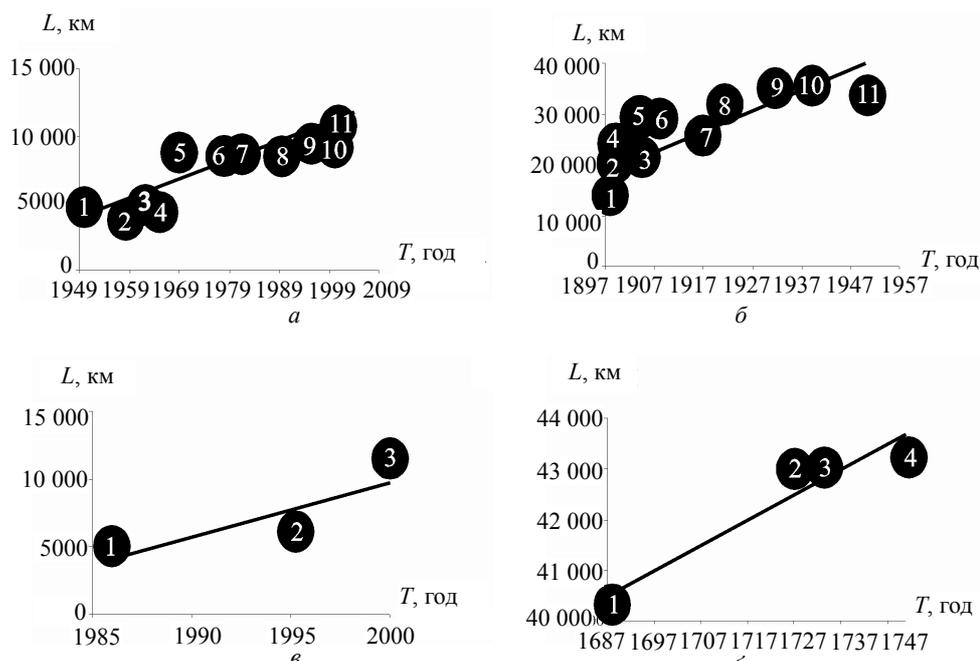


Рис. 4. Пример миграционных цепочек очагов сильнейших землетрясений с $M \geq 7,0$ (а), $M \geq 7,5$ (б), $M \geq 8,0$ (в), $M \geq 8,5$ (г)

Таблица 3

Параметры выявленных миграционных цепочек

$M \geq 7,0$				$M \geq 7,5$			$M \geq 8,0$			$M \geq 8,5$			
n	M	T , год	L , км	M	T , год	L , км	M	T , год	L , км	M	T , год	L , км	
1	7,0	1949	4655	8,1	1897	13 853	8,3	1986	4667	9,0	1687	40312	
2	7,7	1959	4608	7,9	1897	13 853	8,0	1995	6134	8,5	1730	42896	
3	7,5	1961	4679	7,8	1899	19 902	8,2	2000	10783	8,7	1730	42911	
4	7,4	1963	5003	7,8	1900	20 261				8,5	1751	43333	
5	7,5	1970	8741	7,6	1904	21 982							
6	7,8	1980	8929	7,8	1905	24 433							
7	7,5	1982	8941	8,0	1906	25 435							
8	7,1	1989	9405	7,8	1917	26 823							
9	7,5	1996	10 340	7,6	1922	31 342							
10	7,3	2000	10 742	8,1	1932	34 491							
11	8,2	2000	10 783	7,9	1932	34 552							
12	7,0	2001	10 932	7,7	1937	35 193							
13	7,2	2004	12 646	7,5	1950	35 219							
a , км/год			142	a , км/год		408	a , км/год		404	a , км/год			50
ΔT , год			55	ΔT , год		53	ΔT , год		14	ΔT , год			64
ΔL , км			7992	ΔL , км		21 366	ΔL , км		6116	ΔL , км			3021

Примечание. Символ p – порядковый номер землетрясения в цепочке; M – магнитуда; T – год землетрясения; L – расстояние вдоль дуги от L_{\min} ; a – скорость миграции очагов; ΔT – продолжительность цепочки во времени; ΔL – протяженность цепочки в пространстве.

В результате применения приведенного алгоритма в каталоге тихоокеанских землетрясений (684–2007 гг.) было выявлено достаточно большое количество миграционных цепочек очагов землетрясений.

Приведем количество миграционных цепочек землетрясений (N) разных магнитуд (M), выявленных в каталоге тихоокеанских землетрясений (684–2007 гг.):

M	N
$M \geq 7$	86
$M \geq 7,5$	56
$M \geq 8$	25
$M \geq 8,5$	9

Расчет средней миграционной цепочки

Средняя миграционная цепочка (СМЦ) – это цепочка со средними параметрами: скоростью (\bar{V} , км/год), количеством событий в цепочке (\bar{n}), продолжительностью цепочки ($\bar{\Delta T}$, год) и ее протяженностью вдоль дуги ($\bar{\Delta L}$, км). Параметры СМЦ для различных магнитудных диапазонов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Параметры средних миграционных цепочек для различных магнитудных диапазонов

Параметры СМЦ	Магнитудные диапазоны				Среднее значение
	$M \geq 7$	$M \geq 7,5$	$M \geq 8$	$M \geq 8,5$	
Скорость миграции \bar{V} , км/год	203	298	238	546	320 ± 112
Продолжительность миграции $\bar{\Delta T}$, год	162	168	239	256	206 ± 41
Протяженность $\bar{\Delta L}$, км	18 214	17 716	18 850	13219	$17 000 \pm 1890$
Число событий в цепочке \bar{n}	19	12	8	4	12 ± 5

Как видим, параметры (\bar{V} , $\bar{\Delta T}$, $\bar{\Delta L}$, \bar{n}) СМЦ не слишком зависят от магнитуд мигрирующих землетрясений. При этом среднюю скорость миграции очагов землетрясений можно принять за $V \approx 320$ км/год.

Вероятность появления средней миграционной цепочки

Известно, что очаги землетрясений группируются в пространстве, времени и по величине сейсмической энергии. Действительно, сильнейшие землетрясения в пределах окраины Тихого океана имеют тенденцию повторяться в одном месте с периодом около 100 лет, их очаги в течение сейсмического цикла не перекрывают друг друга, все землетрясения по величине сейсмической энергии распределены в соответствии с графиком повторяемости землетрясений. Наконец, очаги землетрясений мигрируют в пространстве – времени. Поэтому определение вероятности появления одной миграционной цепочки с параметрами \bar{V} , $\Delta\bar{T}$, $\Delta\bar{L}$, \bar{n} необходимо рассчитывать путем определения значений соответствующих условных вероятностей. Однако представляется, что наименьшее значение вероятности существования одной СМЦ будет соответствовать случаю, когда все параметры цепочки рассматриваются как независимые.

Расчет вероятностей (табл. 5) осуществлялся с использованием следующих параметров: количество событий (N), протяженность вдоль окраины Тихого океана (L , км), продолжительность временного интервала между последним и первым событием в выборке (T , лет), количество выявленных цепочек (N_c). Тогда вероятность появления одной СМЦ определяется по формуле

$$P = P_1 P_2 P_3, \tag{1}$$

где P_1 – вероятность появления цепочки с \bar{n} событиями в цепочке из общего числа событий N каталога:

$$P_1 = \frac{\bar{n}}{N}; \tag{2}$$

P_2 – вероятность появления цепочки длительностью $\Delta\bar{T}$ во всем временном интервале T каталога:

$$P_2 = \frac{\Delta\bar{T}}{T}; \tag{3}$$

P_3 – вероятность появления цепочки с пространственной протяженностью $\Delta\bar{L}$ в пределах окраины Тихого океана протяженностью L :

$$P_3 = \frac{\Delta\bar{L}}{L}. \tag{4}$$

Вероятность появления N_c таких цепочек рассчитывается как

$$P_{N_c} = P N_c. \tag{5}$$

Таблица 5

Параметры миграционных цепочек для расчета вероятности появления средней миграционной цепочки

Параметры	Магнитудный диапазон			
	$M \geq 7$	$M \geq 7,5$	$M \geq 8$	$M \geq 8,5$
N	1600	652	187	37
ΔL	45 300	45 300	43 697	43 697
ΔT	1359	1359	1359	1133
N_c	86	56	25	9

Примечание. Символ N – количество событий; ΔL – протяженность цепочки вдоль окраины Тихого океана; ΔT – продолжительность временного интервала выборки; N_c – количество выявленных цепочек.

Используя данные табл. 5, для вероятностей, рассчитанных с помощью соотношений (1)–(5), получили значения, приведенные в табл. 6. Как следует из табл. 5, значения вероятностей P , P_n , $P_{\Delta T}$ и $P_{\Delta L}$ различаются в зависимости от магнитуды землетрясения не более чем на порядок. Однако для всех магнитудных диапазонов значение P_N остается неизменным: $P_N \approx 0,1$.

Таблица 6

Значения, определяющие вероятности существования одной средней миграционной цепочки в случае, когда ее параметры считаются независимыми

Значения вероятностей	Магнитудный диапазон				
	$M \geq 7$	$M \geq 7,5$	$M \geq 8$	$M \geq 8,5$	Все магнитуды
P_1	0,01	0,02	0,04	0,11	0,01–0,1
P_2	0,12	0,12	0,18	0,23	0,1–0,2
P_3	0,40	0,39	0,43	0,30	0,3–0,4
P	0,0006	0,0008	0,003	0,007	0,001–0,01
P_N	0,05	0,05	0,08	0,06	$\approx 0,1$

Примечание. Символ P – вероятность появления одной цепочки; P_1 – вероятность появления цепочки с \bar{n} событиями в цепочке из общего числа событий N каталога; P_2 – вероятность появления цепочки длительностью $\Delta \bar{T}$ во всем временном интервале каталога T ; P_3 – вероятность появления цепочки с пространственной протяженностью $\Delta \bar{L}$ в пределах окраины Тихого океана протяженностью L ; P_{Nc} – вероятность появления Nc таких цепочек.

Как показывает анализ, в случае снятия ограничения (одно значение может только один раз попасть в миграционную цепочку) число выделяемых цепочек увеличивается на порядок (табл. 7). При этом параметры цепочек не слишком отличаются от параметров СМЦ, представленных в табл. 4. Это означает, что вероятность существования совокупности цепочек увеличивается в пределе $P_N \rightarrow 1$. Другими словами, объединение в цепочки очагов землетрясений с магнитудами $M \geq M_0$ в широком диапазоне магнитуд $M_0 \geq 7$ является не случайным, а закономерным явлением сейсмического процесса в пределах Тихого океана. При этом средняя скорость миграции очагов землетрясений с $M \geq 7,0$ должна составлять около 300 км/год, или 1 см/с, что подтверждает вывод, сделанный в работе (Викулин, 2003).

Таблица 7

Количество выявленных цепочек миграции очагов землетрясений в разных магнитудных диапазонах в случае, когда одно землетрясение может неоднократно быть составной частью миграционной цепочки

Магнитудный диапазон	N_1	N_2
$M \geq 7$	1546	86
$M \geq 7,5$	631	56
$M \geq 8$	181	25
$M \geq 8,5$	34	9
Всего	2392	176

Примечание. Символ N_1 – число выявленных цепочек при условии, что одно землетрясение может быть неоднократно составной частью миграционной цепочки; N_2 – число выявленных цепочек миграции землетрясений при условии, что землетрясение является составной частью цепочки только один раз.

Выводы

1. В результате проведенного Фурье-анализа данных мирового, Тихоокеанского и Альпийского каталогов землетрясений с использованием разработанного программного комплекса было показано существование периодичностей сейсмического процесса (в годах): $T_0 \approx 116 \pm 1$ лет, $2T_0 \approx 195 \pm 6$ лет, $4T_0 \approx 388 \pm 4$ лет, $8T_0 \approx 786 \pm 9$ лет.

2. В ходе работы, проведенной на основе сейсмологического материала 684–2007 гг., для всей окраины Тихого океана было подтверждено существование эффекта миграции очагов сильных землетрясений в пространстве и времени в широком магнитудном диапазоне.

3. Анализ пространственно-временных закономерностей сейсмического процесса окраины Тихого океана показал, что землетрясения с $M \geq 7$ имеют тенденцию мигрировать по часовой стрелке в направлении от Новой Зеландии до Южной Америки со скоростью около 300 км/год.

Расчеты сделаны студентами КамчатГТУ во время написания ими курсовых работ и прохождения преддипломной практики в лаборатории геодинамики переходных зон ИВиС ДВО РАН.

Литература

1. Акманова Д.Р. Особенности вулканической активности окраины Тихого океана за последние 12 тыс. лет // Пробл. комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России: Тез. докл. региональной науч.-техн. конф., Петропавловск-Камчатский, 11–17 ноября 2007 г. – Петропавловск-Камчатский: КФ ГС РАН, 2007. – С. 98.
2. Акманова Д.Р., Осипова Н.А. О взаимосвязи сейсмического и вулканического процессов на примере окраин Тихого океана // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2007. – № 10. – С. 144–155.
3. Акманова Д.Р., Викулин А.В., Осипова Н.А. Миграция сейсмической и вулканической активности как тектонофизический процесс // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Тез. докл. Всерос. конф., Москва, 13–17 октября 2008 г. – М.: ИФЗ РАН, 2008. – С. 205–207.
4. Викулин А.В. Миграции и осцилляции сейсмической активности и волновые движения земной коры // Пробл. геодинамики и прогноза землетрясений. – Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001. – С. 205–224.
5. Викулин А.В. Физика волнового сейсмического процесса. – Петропавловск-Камчатский: КГПУ, 2003. – 151 с.
6. Викулин А.В., Викулина С.А. Закономерности размещения очаговых областей сильнейших землетрясений в районе желоба Нанкай. – Петропавловск-Камчатский: КГС ИФЗ АН СССР, 1989. – Препринт № 5.
7. Викулин А.В., Водинчар Г.М. Спектр энергии потока сейсмичности // Материалы ежегод. конф., посвященной Дню вулканолога. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2005. – С. 167–174.
8. Викулин А.В., Водинчар Г.М. Волны миграции сейсмической энергии // Тектоника, глубинное строение и минерагения востока Азии: Тез. докл. V Косыгинских чтений, Хабаровск, 24–27 января 2006. – Хабаровск, 2006. – С. 206–209.
9. Моделирование геодинамических процессов окраины Тихого океана / А.В. Викулин, Г.М. Водинчар, И.В. Мелекесцев и др. // Солнечно-земные связи и предвестники землетрясений: Сб. докл. IV междунар. конф., Петропавловск-Камчатский, 14–17 августа 2007 г. – Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2007. – С. 275–280.
10. Викулин А.В., Ким Ч.У. Курило-Камчатские землетрясения: данные наблюдений. 1911–1952 гг. – М.: МЦДБ, 1983. – 82 с.
11. Викулин А.В., Ким Ч.У. Курило-Камчатские землетрясения: данные наблюдений. 1953–1961 гг. – М.: МЦДБ, 1983. – 84 с.
12. Вилькович Е.В., Шнирман М.Г. Математические модели строения Земли и прогноз землетрясений / Вычислительная сейсмология: Сб. науч. ст. – М.: Наука, 1982. – С. 27–37.
13. Кириллова И.В. О периодичности разрушительных землетрясений Кавказа и Турции // Докл. АН СССР. – 1957. – Т. 115. – № 4. – С. 771–773.
14. Кузнецов И.В., Кейлис-Борок В.И. Взаимосвязь землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса // Докл. РАН. – 1997. – Т. 355. – № 3. – С. 389–393.
15. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975 г. – М.: Наука, 1977. – 536 с.
16. Рихтер Ч. Элементарная сейсмология. – М.: Изд-во иностр. лит., 1963. – 670 с.
17. Соловьёв С.Л., Го Ч.Н. Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. – М.: Наука, 1974. – 309 с.
18. Соловьёв С.Л., Го Ч.Н. Каталог цунами на восточном побережье Тихого океана. – М.: Наука, 1975. – 203 с.
19. Тамразян Г.П. О периодичности сейсмической активности в течение последних полутора двух тысяч лет (на примере Армении) // Изв. АН СССР. Сер. «Геофизика». – 1962. – № 1. – С. 76–85.
20. Федотов С.А. О закономерностях распределения сильных землетрясений Камчатки, Курильских островов и Северо-Восточной Японии // Тр. ИФЗ АН СССР. – 1965. – № 203/36. – С. 66–93.
21. Филипас С.Ф. О некоторых закономерностях сейсмической активности северо-западной части Тихоокеанского пояса // Современные движения земной коры. – 1965. – № 2. – С. 366–375.
22. Catalogue of Major Earthquakes which occurred in and near Japan (1926–1956) // Seismol. Bull. Japan Meteorolog. Agency. Suppl. 1. – Tokyo, 1958. – 91 p.

23. Catalogue of Major Earthquakes which occurred in and near Japan (1957–1962) // Seismol. Bull. Japan Meteorolog. Agency. Suppl. 2. – Tokyo, 1966. – 47 p.
24. Catalogue of Major Earthquakes which occurred in and near Japan (1963–1967) // Seismol. Bull. Japan Meteorolog. Agency. Suppl. 3. – Tokyo, 1968. – 61 p.
25. Centennial Earthquake Catalog: (<http://earthquake.usgs.gov/research/data/centennial.php>).
26. Duda S.J. Strain release in the Circum-Pacific belt, Chile 1960 // J. Geophys. Res. – 1963. – № 68. – P. 5531–5544.
27. Duda S.J. Secular seismic energy release circum-pacific belt // Tectonophysics. – 1965. – № 2(5). – P. 409–452.
28. Duda S.J. Global earthquakes 1903–1985. – Hamburg F.R.Germany: NEIC, 1992. – 183 p.
29. ISC: (<http://www.isc.ac.uk/Bulletin/rectang.htm>).
30. Jacob K.H. Estimates of long-term probabilities for future great earthquakes in the Aleutians // Geophys. Res. Lett. – 1984. – № 4. – P. 295–298.
31. JMA: (<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>).
32. Mogi K. Migration of Seismic Activity // Bulletin of the Earthquake Research Institute. – 1968. – Vol. 46. – P. 53–74.
33. 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. – Vol. 47. – P. 395–417.
34. Mogi K. Active periods in the world's shief belts // Tectonophysics. – 1974. – Vol. 22. – № 3–4. – P. 265–282.
35. NEIC: (<http://neic.usgs.gov/neis/epic/epicglobal.html>).
36. Shimazaki K., Nakata T. Time-predictable recurrence model for large earthquakes // Geophys. Res. Lett. – 1980. – № 4. – P. 279–282.

УДК 551.594

ВЛИЯНИЕ ВЕТРА НА УРОВЕНЬ ЕСТЕСТВЕННОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОНЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Г.И. Дружин, Д. В. Санников, В. Н. Уваров (ИКИР ДВО РАН)

Рассматривается влияние скорости ветра в приземном слое на амплитуду принимаемого электромагнитного излучения естественного происхождения в диапазоне частот от 30 Гц до 6,5 кГц. На основе корреляционного анализа показано, что ветер оказывает наиболее значительное влияние на электрическую составляющую поля в диапазоне частот от 30 Гц до 2 кГц за 10–25 дней до его прихода в пункт наблюдения.

The influence of wind velocity in the ground layer is considered on the amplitude of received electromagnetic radiation of natural origin in the range frequency from 30 Hz up to 6.5 kHz. On the basis of correlation analysis it is shown, that most considerable influence of the wind on electrical component of the field has occurred in the range from 30 Hz up to 2 kHz before 10–25 days up to its arrival to the observation point.

Введение

К диапазону очень низких частот (ОНЧ) обычно относят диапазон от 3 до 30 кГц. Иногда под ОНЧ-диапазоном подразумевают и более широкий диапазон частот (< 30 кГц, включая частоты ниже 3 кГц). В данной статье будем понимать под ОНЧ расширенный частотный диапазон.

Естественное электромагнитное ОНЧ-излучение определяется грозowymi, ионосферно-магнитосферными и литосферными источниками [1–6]. Тем не менее следует отметить, что структура источников излучения, их вклад в общую интенсивность поля и их связь с различными геофизическими факторами исследованы недостаточно полно. Необходимость этих исследований обусловлена тем, что они могут служить источником информации о процессах космического, планетарного и регионального масштаба. Полученная информация может