

УДК 550.34

© 1997 г. ГУСЕВ А.А., ПЕТУХИН А.Г.

### О ВОЗМОЖНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ЛУНЫ 18,6-ЛЕТНИМ ЦИКЛОМ, ЕГО ДОЛЯМИ И КРАТНЫМИ

Проведено сопоставление временных рядов сильнейших землетрясений с 18,6-летним периодом прецессии лунной орбиты, а также его долями и кратными. Изучены каталоги ряда зон субдукции Тихоокеанского кольца. После объединения землетрясений в кластеры данные каталогов представлены для каждого из изучаемых значений длительности цикла в виде распределения точек по кольцу. Отклонение от равномерности для таких распределений проверяли с помощью критерия Куипера. Подтверждены известные и выявлены новые периодичности с значениями периода  $T = T_0/3, T_0/2, T_0, 3T_0/2$  и  $3T_0$ , где  $T_0 = 18,6$  лет. Наиболее выражены периоды  $3T_0/2 \approx 28$  лет (Аляска, Мексика и Вальпараисо, Чили) и  $3T_0 \approx 56$  лет (Камчатка, Курилы). Для некоторых регионов проведена экстраполяция активности сильнейших землетрясений на ближайшие годы.

ON POSSIBLE SYNCHRONIZATION OF LARGE EARTHQUAKES BY 18.6-YEAR LUNAR CYCLE, ITS FRACTIONS AND MULTIPLES, by Gusev A. A. and Petukhin A. G. The relation is reexamined between seismicity, based on statistics of the largest earthquakes, and the 18.6-year cycle of precession of lunar orbit, and its fractions and multiples also. Catalogues of these were studied for a few Pacific regions. The catalogues were declustered and, for each cycle duration value studied, were converted into a point distribution over a ring. The break of uniformity of the distribution was checked by Kuiper's test. Periodicities with cycle durations of  $T_0/3, T_0/2, T_0, 3T_0/2$  and  $3T_0$  where  $T_0 = 18.613$  yr were found anew or confirmed for some data sequences. The most expressed are the  $3T_0/2$  (28 yr) period observed for Alaska, Mexico and Valparaiso, Chili, and the  $3T_0$  (56 yr) period observed for Kamchatka and Kuriles. Long-period forecasts are formulated based on some of the patterns.

(Received October 14, 1996)

*Institute of Volcanic Geology and Geochemistry, Far East Division, Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006, Russia*

На связь землетрясений с лунными циклами указано еще в середине прошлого века [23]. Синхронизация сильных землетрясений 18,6-летним лунным циклом выявлена для Байкальского региона [3], для Камчатки и Курил [11, 16] и для Южной Америки [10]; авторы работы [17] обнаружили подобное явление для Южной Калифорнии при невысоком магнитудном пороге. Наряду с циклом длительностью  $T = T_0 = 18,613$  года обнаружена [13] выраженная синхронизация на периоде  $T_0/3 = 6,204$  года и дан долгосрочный прогноз землетрясений с  $M \geq 7,0$  и  $\geq 7,8$ . В работе [13] рассмотрены также циклы с  $T = T_0/2$  и  $T_0/T$ , но при магнитудном пороге  $M = 7,0$  значимых цикличностей не обнаружено. Цикл длиной 85 лет, близкий к  $9T_0/2 = 83,8$  лет, отмечен для сильных землетрясений района Вальпараисо, Чили [18]. Период 30 лет, близкий к  $3T_0/2 = 27,92$  лет, отмечен для Мексики [24].

Величина  $T_0 = 18,613$  лет есть период оборота линии узлов лунной орбиты, т.е. период вращения плоскости, в которой Луна и Земля обращаются вокруг общего

центра масс (барицентра), относительно оси, проходящей через барицентр перпендикулярно эклиптике; плоскость наклонена под углом  $\sim 5^\circ$  к эклиптике. По этой причине амплитуда месячных изменений склонения Луны периодически колеблется между крайними значениями  $18$  и  $28^\circ$ , что ведет к соответствующему изменению относительных и абсолютных амплитуд различных составляющих земного прилива [5], в первую очередь полусуточной и суточной компонент. Для объяснения связи 18,6-летнего лунного цикла с сейсмичностью высказывались гипотезы о "триггерном" влиянии земных приливов на землетрясения и об участии приливов в длительном процессе подготовки сильного землетрясения. Обе гипотезы имеют скорее умерительный характер; в сущности сколько-нибудь убедительного объяснения пока нет.

Настоящая работа продолжает выявление эмпирических циклических особенностей описанного рода на примере ряда регионов Тихоокеанского кольца. Ее акцент – на параллельном анализе ряда избранных регионов и ряда периодов по единой схеме анализа значимости на основе каталогов за достаточно длительные периоды времени.

**Методика и принципы отбора исходных данных.** Сущность методики состоит в отображении каталога на кольцо и далее – в анализе степени неравномерности размещения точек-событий по кольцу. При выраженной, статистически значимой неравномерности считаем вероятным наличие цикличности. Для любого конкретного изучаемого цикла с периодом  $T$  положение изображающей точки на кольце определяется значением условной фазы цикла  $\Phi$  ( $0 \leq \Phi < 1$ ) на дату землетрясения. Последняя вычислена по формуле

$$\Phi = (t - t_0)/T_{mm} - \text{Entier}((t - t_0)/T_{mm}),$$

где  $t$  – юлианская дата землетрясения;  $t_0$  – юлианская дата некоторого определенного прохождения восходящим узлом орбиты Луны точки весеннего равноденствия;  $\text{Entier}$  – "целая часть". В качестве  $t_0$  использовали дату 10 апреля 1727 г., полученную на основе формулы Брауна [11]. Значения  $T$  периода исследуемого цикла имели вид  $T = T_{mm} = (m/n)T_0$ , где  $T_0 = 18,613$  юлианских лет [5];  $m$  и  $n$  – наибольшие натуральные числа. За время  $T_{mm}$  значение  $\Phi$  меняется на единицу. Таким образом, момент каждого землетрясения отображается в точку на кольце, т.е. на полуинтервале  $[0,1)$  с отождествленными концами.

Представив землетрясения в виде подобных точек, далее вели статистический анализ, проверяя, какова вероятность реализации фактического распределения точек по кольцу в условиях нулевой гипотезы – равномерного закона распределения. Такой закон обязан иметь место, если анализируемый период времени равен целому числу полных циклов и поток землетрясений – пуассоновский. Фактически оба условия не были строго выполнены. В частности, анализируемый период времени выбирался независимо от задания длины цикла и момент начала счета циклов. Возможные искажения результатов по этой причине оценивались – они относительно невелики.

Гораздо более опасным потенциальным источником искажений в анализе является отклонение потока событий от пуассоновности. Для каталогов землетрясений наиболее четкий вид такого отклонения – возникновение событий в виде кластеров (афтершоки, рои, группы и т.п.). Эта тенденция легко может имитировать эффекты искомой периодичности, приводя к неравномерному распределению точек по кольцу. В этой связи всю обработку вели в двух вариантах – по основному каталогу и по каталогу кластеров. Кластеры образовывали по следующему неформальному критерию: события со взаимным запаздыванием не более года и взаимным удалением порядка размера очага (оцененного по их магнитуде) считаются компонентами кластера; момент образования кластера считается момент его сильнейшего компонента. В большинстве случаев это нестрогое правило дает однозначный результат; для устранения вопросов далее просто приводится сделанный выбор кластеров.

Для проверки равномерности распределения на интервале удобно применять критерий Колмогорова. В рассматриваемом случае, однако, точки фактически распределены не на интервале, а на кольце (так как 0 и 1 – одна и та же точка).

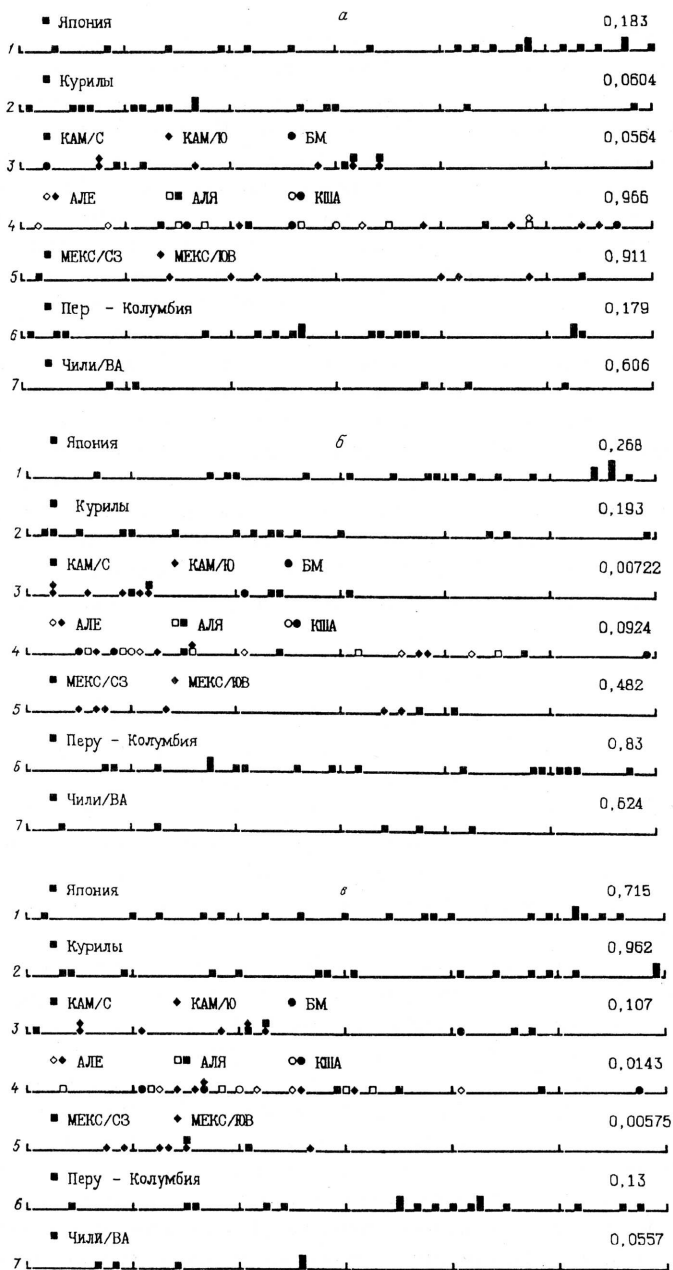


Рис. 1, а-в

Модификация критерия Колмогорова для этого случая сделана Куипером [4]. Использованный алгоритм расчета вероятности (т.е. уровня значимости  $P$ ) для распределения Куипера мог давать ошибку:  $\leq 1\%$  при объеме выборки 10 и более,  $\leq 2,5\%$  при объеме выборки 5-10; такая точность сочтена приемлемой.

Критерий Куипера недостаточно мощен при отклонениях от равномерности типа периодичности, поэтому в отдельных случаях в дополнение к нему применяли биномиальный критерий. Использование биномиального критерия сводится к явному разбиению интервала на "плотно" и "редко" засеянные области, подсчету числа

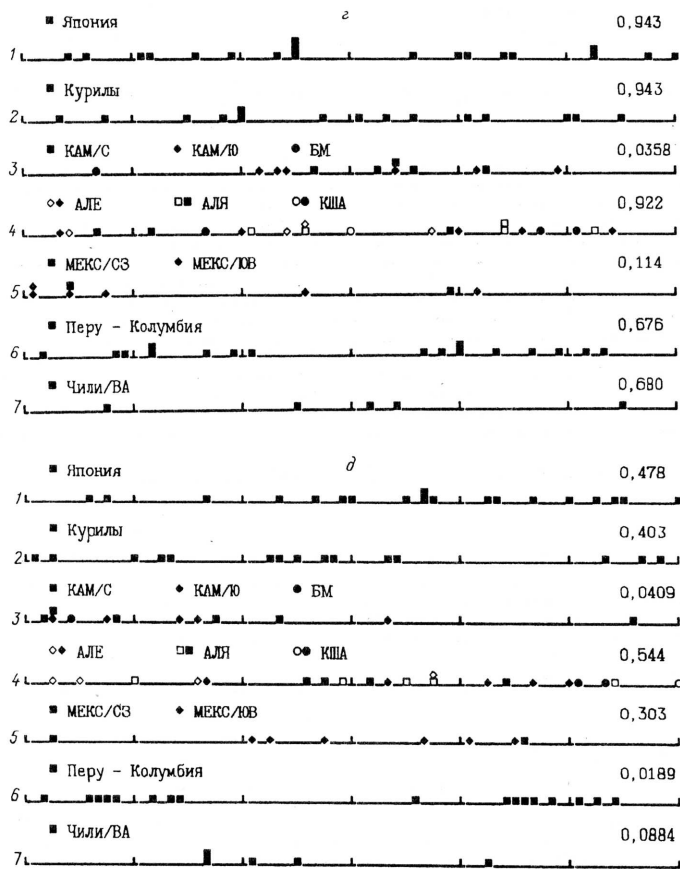


Рис. 1. Суммарные региональные развертки кластеров по периоду (лет):  $a - T_0 = 18,613$ ;  $b - 3T_0$ ;  $c - 3T_0/2$ ;  $d - T_0/2$ . Цифры справа – значения  $P$ ;  $M = 8 +$  и  $7,8 +$  ( $1$  и  $6$  соответственно);  $M_{НК} = 7,6 +$  ( $2$  и  $3$ );  $M_s = 7,7 +$  ( $4$  и  $7$ );  $M_w = 7,6 +$  ( $5$ ). Пояснения см. в тексте

событий в областях двух типов, а затем определению вероятности такого расклада в предположении равномерного исходного закона. При этом для корректной оценки значимости необходимо скомпенсировать произвол при выборе разбиения [12, т. 1, гл. 2, зад. 13]. Отсутствие необходимости выбора разбиения интерпретатором – большое преимущество критерия Куипера.

Отбор исходных данных для анализа включает два этапа: выбор региона и интервала глубин и выбор пороговой магнитуды. В настоящей работе изучали следующие регионы: Камчатку, Курилы, Аляску и Алеуты, Японию, Мексику и район Вальпараисо в Чили (по литературе здесь отмечались периоды, близкие к  $T_0/3$ ,  $2T_0$ ,  $3T_0$  и  $9T_0/2$ ), а также Перу и Курилы. Изучали сильнейшие мелкофокусные землетрясения с порогом по магнитуде  $7,6-7,9$ . Внутри регионов выделены субрегионы, данные которых отмечены на графиках, чтобы сделать наглядной синхронность или асинхронность отклонений от равномерности в разных субрегионах одного региона.

Авторы старались по возможности использовать опубликованные каталоги землетрясений; это не всегда удавалось. Собственно анализ проводили для следующих циклов:  $T_0 = 18,613$  лет,  $3T_0 = 55,84$  лет,  $3T_0/2 = 27,92$  лет,  $T_0/2 = 9,306$  лет и  $T_0/3 = 6,204$  лет. Некоторые другие варианты, например  $2T_0$ ,  $T_0/4$ ,  $T_0/5$ , также опробованы, но не дали интересных результатов. Графические результаты представлены в основном как расположение изображающих точек цикла (рис. 1); в качестве детальных примеров на рис. 2 дана полная временная развертка.



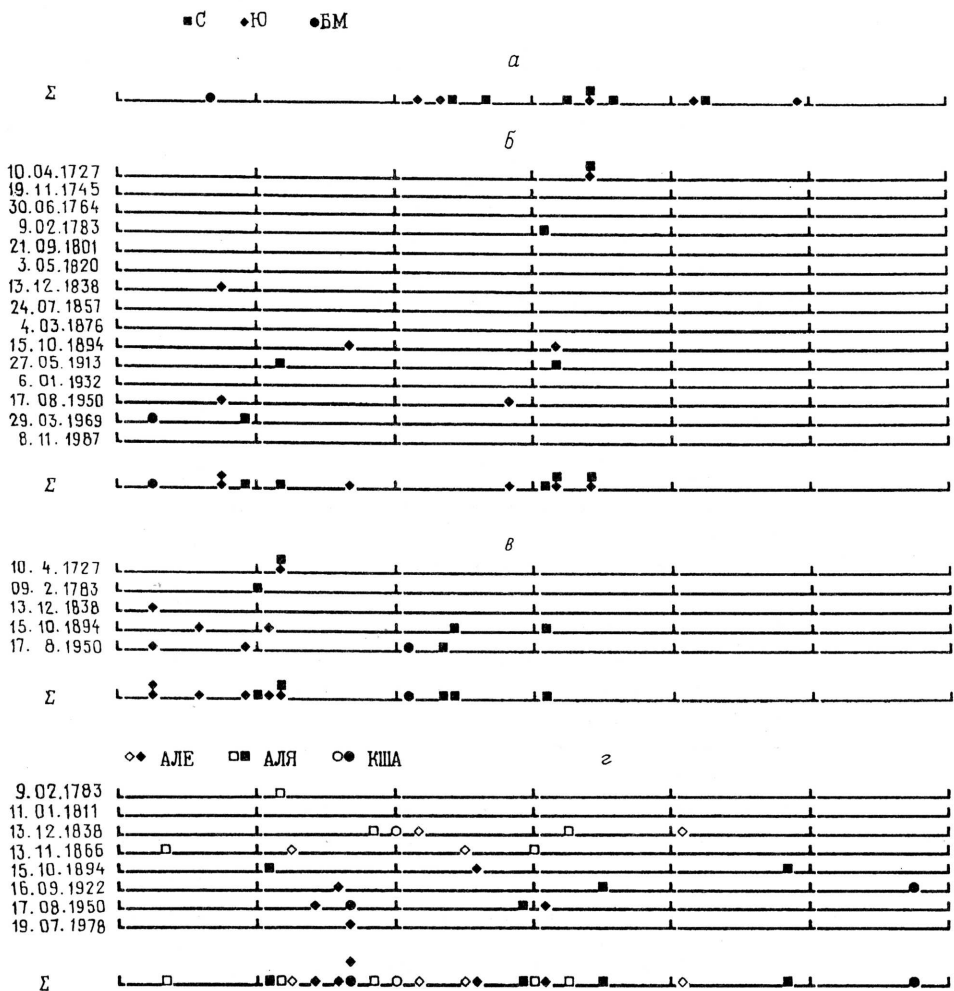


Рис. 2. Полные и суммарные временные развертки распределения кластеров сильных землетрясений по периодам  $T_0/3$ ,  $T_0$  и  $3T_0$  для Камчатки (а-в соответственно) и по периоду  $3T_0/2$  для Аляски (г).  $M_{HK} = 7,6 + (a-\vartheta)$ ;  $M_S = 7,7 +$ . Значения  $P$ : а - 0,0358, б - 0,0564, в - 0,00682, г - 0,0143.

**Анализ данных по регионам. Камчатка.** Каталог сильных землетрясений Камчатки составлен на основе "Нового каталога..." [6]. Отобраны толчки с глубинами  $H = 0 \dots 80$  км и  $M_{HK} \geq 7,6$  ( $M_{HK}$  - магнитуда по "Новому каталогу" (НК)), севернее  $50^\circ$  с.ш. из каталога "Курилы" и все из каталога "Камчатка", с 1737 по 1974 г. В 1974-1993 гг. толчков с  $M \geq 7,6$  здесь не происходило. События разделены на три субрегиона: "Ю" - южнее м. Шипунского ( $53^\circ$  с.ш.), "С" - (северные) от м. Шипунского до м. Камчатского ( $56,5^\circ$  с.ш.), "Б" - (берингоморские) севернее м. Камчатского. Последняя группа включала лишь одно событие 22.11.1969 г. Затем было проведено выделение кластеров. Приводим использованный каталог со следующей системой обозначений; кластеры объединены скобками; "г" означает главный толчок кластера, "С", "Ю" и "Б" - субрегионы; месяц и день указаны (через дробную черту), только если надо избежать путаницы:

1737/10-Ю; 1737/11-С; 1792-С; 1841-Ю; 1899-Ю; (1904/06/25-Ю-г, 1904/06/25-Ю); 1947-С; (1923/02/03-С-г; 1923/02/24-С); 1952-Ю; 1959-С; 1969-Б; 1971/12-С.

Вероятность  $P$  получения наблюдаемых значений статистики Купера при равномерном распределении

Каталог	Дополнительные условия	Количество землетрясений	$P$				
			18,6	6	9	28	56
Камчатка, 1937–1991 г.; $M_{нк} = 7,6 +$	–	14	0,020	0,0081	0,0068	0,078	0,0047
	к	12	<u>0,056</u>	<u>0,036</u>	<u>0,041</u>	0,25	<u>0,0068</u>
	Б69	11	0,014	<u>0,0099</u>	0,090	0,11	<u>0,0072</u>
Курилы, 1737–1991 г.; $M_{нк} = 7,6 +$	–	18	0,031	0,76	0,36	0,52	0,061
	к	15	<u>0,060</u>	0,94	0,40	0,96	0,19
Япония, 684–1968 г.; $M = 8 +$	–	20	0,10	0,98	0,35	0,61	0,41
	к	19	<u>0,18</u>	0,94	0,48	0,72	0,27
Аляска, 1786–1991 г.; $M_5 = 7,7 +$	–	24	0,61	0,71	0,22	0,0030	0,0081
	к	21	0,97	0,92	0,54	<u>0,014</u>	0,092
Аляска, 1898–1991 г.; $M_5 = 7,7 +$	–	14	0,23	0,39	0,028	0,033	0,026
	к	11	0,88	0,66	<u>0,12</u>	<u>0,20</u>	0,36
Мексика, 1808–1985 г.; $M_w = 7,7 +$	–	9	0,80	0,033	0,64	0,0025	0,24
	к	8	0,91	0,11	0,30	<u>0,0058</u>	0,48
Перу, 1586–1974 г.; $M = 7,8 +$ Вальпараисо, 1647–1985 г.; $M_5 = 7,7 +$	–	17	0,18	0,68	<u>0,019</u>	0,13	0,83
	–	5	0,61	0,68	0,088	<u>0,056</u>	0,62

Примечание. Дополнительные условия: "–" – все события учитываются отдельно; "к" – кластеры событий рассматриваются как одно событие; "Б69" – землетрясение 1969 г. не учитывается.

Суммарно это 14 событий, образующих 12 кластеров (одиночное событие также считаем кластером). Событие 1792 г. отнесено к региону "С" в известной мере формально. Его очаг, вероятно, захватывал и часть субрегиона "Ю".

На рис. 2, а видно распределение кластеров: по циклам  $T_0$  и  $3T_0$  – на временной развертке, для  $T_0$ ,  $3T_0$  и  $T_0/3$  – суммарно. Рисунки следует рассматривать вместе с таблицей 1, где даны значения  $P$  уровня значимости критерия Куипера для вариантов каталога: 1 – полный; 2 – только кластеры (основной вариант). Для Камчатки дан вариант 3 – только кластеры, без события 1969 г. Графики рис. 2, а для  $T_0$  и  $T_0/3$  воспроизводят результат Широкова [16]: первый, второй и шестой годы шестилетнего ( $T_0/3$ ) цикла и третья шестилетка 18,6-летнего цикла лишены сильных землетрясений для субрегионов "С" и "Ю". Значения  $P$  для  $T_0$  и  $T_0/3$  близки к 5%. Результат для 56-летнего цикла ( $P < 1\%$ ) новый; он сводится к отсутствию событий во всей второй половине этого цикла. Значимым ( $P < 5\%$ ) оказался также цикл  $T_0/2$ . Лишь берингоморское событие 1969 г., вне зоны Беньофа островной дуги, нарушает закономерность для шестилетнего цикла; при его исключении  $P < 1\%$ .

Дополнительно проверили значимость картины для 56-летнего цикла по биномиальному критерию. Фактически выделены четыре опасных интервала длиной  $T_0/6$  в цикле длиной  $3T_0$ . Суммарная относительная длина опасных интервалов равна  $4(T_0/6)/3T_0 = 0,222$ . Они содержат 11 из 12 кластеров; вероятность такого расклада по биномиальному закону

$$P = C_m^n p^n (1-p)^{m-n}$$

при  $p = 0,222$ ,  $m = 12$ ,  $n = 11$  равна  $6,1 \cdot 10^{-7}$ . С учетом того что при нулевой гипотезе сделанный выбор четырех из 18 интервалов произволен, возникает поправочный множитель  $C_{18}^4 = 3060$ , так что уровень значимости равен 0,0019 (см. обсуждение логики такого подхода в работе [12]). Как и следовало ожидать, биномиальный критерий в данном случае более мощный, он подтверждает вывод о высокой значимости отклонения от равномерности, полученный по критерию Куипера. Если толчок 1969 г. вне зоны Беньофа отбросить, то  $P$  падает до  $6,7 \cdot 10^{-8}$ , а уровень значимости – до 0,00021.

Проведена неформальная проверка обнаруженной закономерности по дополнительным данным. Далее указаны важные сейсмические события на Камчатке, не удовлетворяющие первоначальному критерию отбора ( $M_{\text{НК}} \geq 7,6$ ) и приведенные на основе работ [1, 2, 6]; их попадание в выделенные 4/18 от 56-летнего цикла помечено как (+), непопадание как (–):

- (+) 1756-С –  $I = 8$  баллов в Нижне-Камчатском остроге;
- (+) 1971/04/5-С – цунами (5 м?) в устье р. Камчатка;
- (–) 1827/08/09-Ю – цунами (2–5 м?) в Авачинском заливе и  $I = 7 \dots 8$  в Петропавловске-Камчатском (отсутствует в НК);
- (+) 1848/06-Ю – цунами (5–10 м?) в Авачинском заливе (отсутствует в НК);
- (+) 1866/09/06-Ю –  $I > 7$  баллов в Петропавловске-Камчатском;
- (+) 1923/04/13 –  $M_{\text{НК}} = 7,3$ , цунами 11 м в устье р. Камчатка;
- (–) 1927/12/28-С –  $M_{\text{НК}} = 7,1$ , цунами 0,3–0,6 м на Гавайях;
- (+) 1971/11/24-Ю –  $M_{\text{НК}} = 7,2$ ,  $h = 100$  км,  $M_w = 7,65$ .

На дополнительных данных обнаруженная закономерность подтверждается (шесть случаев против двух).

Курилы (включая Хоккайдо). Каталог мелкофокусных землетрясений Курил составлен по НК с теми же критериями, что и для Камчатки; добавлен кластер 1978 г.:

1843; 1894; 1896; 1904; 1915; 1916; (1918/9-г, 1918/11); 1935; 1937; 1952; 1958; 1963; 1969; 1973; (1978/3/22, 1978/3/22, 1978/3/24-г).

Всего 18 событий и 15 кластеров с 1742 по 1991 г.

Результаты анализа по критерию Куипера видны на рис. 1 и в табл. 1. Значимое (6%) отклонение от равномерности выявлено только для 18,6-летнего цикла. Как и для Камчатки, активна первая половина цикла.

*Япония.* В регион "Япония" включили события Японской дуги – на тихоокеанском побережье о-вов Хонсю и Сикоку. Каталог сильнейших событий ( $M = 7,9 +$ ) составлен на основе каталогов цунами [8] и макросеймики [25] и включал следующие события (в квадратных скобках указан источник с кодом  $S$  – каталог цунами,  $M$  – каталог макросеймики):

684/11/27-[ $S$ ]; 869/7/13-[ $S$ ]; 887/8/26-[ $S$ ]; 1096/12/17-[ $S$ ]; 1099-[ $M$ ];  
1361/8/3-[ $S$ ]; 1498/9/20-[ $S$ ]; 1605/1/31-[ $S$ ]; 1611/12/02-[ $S$ ]; 1677/4/13-[ $S$ ];  
1677/4/13-[ $S$ ]; 1703/12/31-[ $S$ ]; 1707/10/28-[ $S$ ]; (1854/12/23-[ $S$ ]; -г, 1854/12/24-[ $S$ ]);  
1891-[ $M$ ]; 1891-[ $M$ ]; 1923/9/1-[ $S$ ]; 1933/3/3-[ $S$ ]; 1944/12/7-[ $S$ ]; 1968/5/16-[ $S$ ].

Всего 20 событий, 19 кластеров. Выразительной цикличности не видно. Мало значимые результаты ( $P = 18\%$ ) получились для цикла 18,6 г. В отличие от Камчатки события группируются в последней трети цикла.

*Аляска.* Район "Аляска" включает субрегионы Алеутских о-вов (АЛЕ) от  $170^\circ$  в.д. до  $165^\circ$  з.д. (о-в Унимак), собственно Аляски (АЛЯ) ( $165^\circ$  з.д. –  $147^\circ$  з.д.) (до пролива Принца Вильяма) и о-вов Королевы Шарлотты (КША) ( $147^\circ$  з.д. –  $130^\circ$  з.д.). Каталог сильнейших землетрясений доинструментального периода (до 1898 г.) скомпонован на основе работ [8,21]; он включал следующие события (в квадратных скобках указан источник кодом  $N$  – Nishenko и Jacob,  $S$  – Соловьев и Го):

1788-АЛЯ-[ $S$ ]; 1847-АЛЯ-[ $N$ ]; 1848-КША-[ $N$ ]; 1849-АЛЕ-[ $N$ ]; 1854-АЛЯ-[ $S$ ];  
1858-АЛЕ-[ $N$ ]; 1868-АЛЯ-[ $S$ ]; 1872-АЛЕ-[ $N$ ]; 1878-АЛЕ-[ $S$ ]; 1880-АЛЯ-[ $N$ ].

Всего 10 событий.

Каталог инструментального периода составлен на основе каталогов Абе и соавт. по сводке работы [22]; в качестве пороговой взята магнитуда  $M_s = 7,7$ :

(1899/7/4, 1899/9/4, 1899/9/10 г. 1900); 1906; 1917; 1929; 1938; 1949; 1957; 1958; 1974; 1986.

Всего 14 событий, 11 кластеров. Результаты анализа см. на рис. 1 и 2, а и в табл. 1. Цикличность с периодом 18,6 г., отмеченная Широковым [11] по толчкам с  $M \geq 7$ , четко не проявляется; но выражен цикл  $3T_0/2 = 27,92$  лет ( $P = 1,5\%$ ). Он был бы выражен еще резче ( $P = 0,3\%$ ), если бы были исключены события 1949, 1858 и 1849 гг., относящиеся к периферийным районам о-вов Королевы Шарлотты и Командорских. Для контроля надежности выделения данного периода анализ провели только для надежных данных 1898–1992 гг. Для этого случая значимость ухудшается до 20%, что можно считать приемлемым в условиях двукратного снижения объема данных. На графиках видно общее согласие характера неравномерности распределения землетрясений внутри цикла для подгрупп данных, выделенных по периодам 1787–1896, 1897–1992 гг. и по субрегионам АЛЯ и АЛЕ; с регионом США полной ясности нет.

*Мексика.* Каталог землетрясений построен на основе каталога Андерсона и др. [15] за 1806–1985 гг. для глубин 0–80 км. Значения  $M_0$  пересчитали в  $M_w$ , за порог выбрали  $M_w = 7,7$ . Исключили события в ЮВ от перешейка Теуантепек; оставшаяся квази-

однородная зона была разделена на СЗ и ЮВ субрегионы с границей между ними в районе зоны разломов Ороско ( $18^\circ$  с.ш.,  $102^\circ$  з.д.). Каталог содержит девять событий и восемь кластеров:

1845/4/7; 1870/5/11; 1899/1/24; 1907/4/15; 1928/6/17; (1932/6/3, 1932/6/18);  
1957/7/28; 1985/9/19.

Как и для Аляски, четко проявлена цикличность с периодом  $3T_0/2$ . Дополнительно цикличность подтверждается попаданием в активный период 28-летнего цикла кластера из двух промежуточных ( $h \approx 100$  км) землетрясений 1928 г. с  $M_w > 7,7$  каждое.

*Перу, Эквадор, Колумбия.* Каталог мелкофокусных землетрясений этого региона с  $M \geq 7,8$  составлен на основе работ [9, 19, 22] и включает в себя следующие события (S – Соловьев и Го, N – Nishenko, A – каталог Абе [22]):

1586-[S]; 1604-[S]; 1664-[N]; 1678-[S]; 1687-[S]; 1725-[N]; 1746-[S]; 1821-[N];  
1868-[S]; 1906-[A]; 1913-[A]; 1940-[A]; 1942/5/14-[A]; 1942/8/24-[A]; 1958-[N];  
1966-[A]; 1974-[N].

Всего 17 событий. По каталогу [22] землетрясения 1958 и 1974 гг. имеют магнитуду  $M_s = 7,3$  и  $7,6$  соответственно. Это ниже принятого порога  $M = 7,8$ , но в работе [19] указанные толчки рассматриваются как сильнейшие и включены в рабочий каталог.

В работах [9] и [19] упоминается сильное землетрясение в Южном Перу в 1590 г., но точная дата и оценка магнитуды не приводятся; это событие не включено в рабочий каталог.

Для региона оказался значимым цикл  $T_0/2 = 9,306$  лет ( $P = 2\%$ ) с активным периодом в первой и последней четвертях цикла (рис. 1, д). Если исключить из каталога события 1958 и 1974 гг. и добавить землетрясение 1590 г., датировав его самой "нехорошей" для цикла  $T_0/2$  датой – 31 декабря 1590 г., получим  $P = 3\%$ .

*Чили, район Вальпараисо.* Этот район (обозначенный С-5 [19]) привлечен как известный пример цикличности. Он включает события

1647,5/13; 1730/7/8; 1822/11/19; 1906/8/16; 1985/3/3.

Как и следовало ожидать, он дал значимый ( $P = 6\%$ ) результат для периода  $3T_0/2 = 27,92$  лет. Фактически длина цикла здесь близка к  $9T_0/2 = 83,7$  лет.

**Анализ данных в совокупности.** Совместный анализ данных по регионам позволяет отметить следующее.

1. Собственно лунный цикл (18,613 лет) выявляется лишь для Камчатки и Курил. В.А. Широков [11] отмечает такой цикл для Аляски – Алеут, для  $M \geq 7$ ; в настоящем анализе (с другим порогом) он не подтвердился.

2. Цикл  $T_0/3 = 6,204$  лет не выявлен нигде, кроме Камчатки (гипотетичен для Мексики).

3. Цикл  $3T_0/2$  обнаруживается ( $P < 6\%$ ) для Алеут, Мексики и Чили и может быть заподозрен ( $P < 15\%$ ) для Камчатки и Перу, т.е. в пяти из семи изученных районах. Активная фаза этого цикла примерно совпадает в четырех случаях (кроме Перу); это первая половина цикла (в принятой схеме отсчета фазы от 1727/4/10).

4. Цикл  $3T_0$  четко проявляется на Камчатке ( $P < 1\%$ ) и малозначим ( $P = 20\%$ ) на Курилах, при этом он синфазен в указанных двух регионах. Он также заметен ( $P = 10\%$ ) для Алеут, где, по-видимому, не имеет самостоятельного значения – просто выявляется неравномерность распределения за счет двух последовательных 28-летних циклов.

5. Примечательна синфазность цикличности в пределах отдельных регионов. В условиях малых объемов выборок и невысокого уровня значимости такая син-

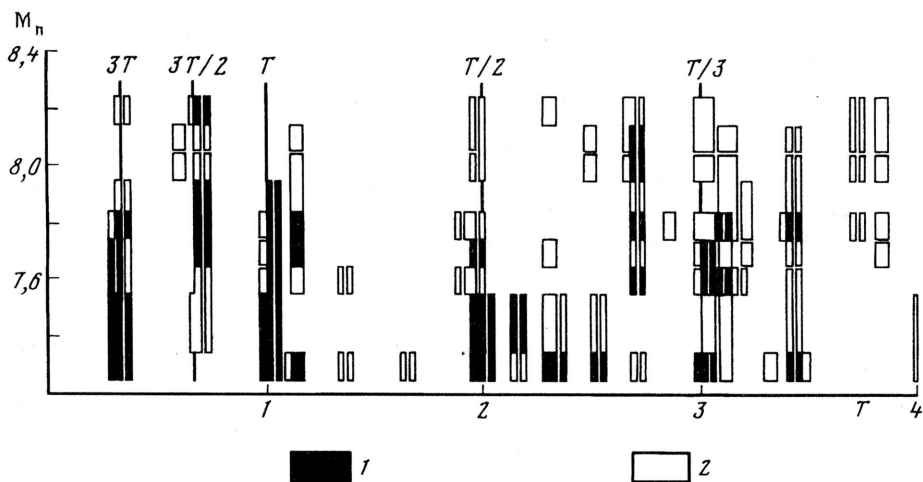


Рис. 3. Результаты "спектрального" анализа каталога кластеров для Камчатки; 1, 2 – уровень значимости по Куиперу  $< 2,5$  и  $< 10\%$  соответственно для определенной комбинации пороговой магнитуды  $M_{II}$  (ордината) и периода  $T$  цикла. Абсцисса – значение частоты  $F = 1/T$  в единицах  $1/T_0 = 1/18,613$  года. Ширина прямоугольника равна  $1/12 T_0$  и примерно соответствует разрешению по частоте для длительности каталога 250 лет. Объем каталога меняется по вертикали и составляет 21 событие при наименьшем пороге  $M_{II} = 7,3$  и пять событий при наивысшем  $M_{II} = 8,3$ . Видна четкая выраженность ранее выделенных циклов

фазность является важным дополнительным подтверждением реальности изучаемых цикличностей. Наиболее четко видна синфазность при сопоставлении Камчатки и Курил, а также Аляски и Алеут.

**"Спектральный" анализ.** Определенной методической слабостью примененного подхода является анализ весьма ограниченного списка возможных периодов, а также определенный произвол в выборе магнитудного порога. Для дополнительного контроля данные каталога Камчатки проанализированы со сплошным перебором длительностей цикла и магнитудных порогов. Точнее, перебирали все частоты в интервале от  $1/5T_0$  до  $4T_0$  с шагом  $1/12T_0$ . Выбранный шаг по частоте соответствует длине имеющегося каталога, обратное значение которой определяет возможное разрешение спектрального анализа. Результаты (рис. 3) наглядно показывают фактическую независимость сделанного здесь вывода о значимой периодичности от выбора магнитудного порога. Рассмотрение рис. 3 наводит на мысль, что видимые там периодичности, не связанные с лунным 18,6-летним циклом, либо выражены слабее, либо просто отсутствуют реально, а видимые выбросы в последнем случае имеют характер случайных флуктуаций.

### Обсуждение результатов

1. *О магнитудном пороге.* Выбранный магнитудный порог  $M = 7,6 \dots 7,7$  формально произволен. Фактически поднять его нельзя, так как объем статистики катастрофически упадет и выводы потеряют достоверность. Опустить порог можно; это постепенно ухудшает четкость и, соответственно, значимость результатов во всех регионах, кроме Аляски, где период 28 лет четко виден даже при пороге  $M_s = 6,7$ .

2. *Дополнительным подтверждением* реальности изучаемого явления является обнаружение циклов, кратных 18,6 лет, в исследованиях других каталогов и других авторов. Так, в табл. 1 работы [20] для субрегиона Концепсон (Чили) средний период по пяти интервалам равен  $92,3 \pm 8$  лет ( $5T_0 \approx 93$  лет). Для Мексики аналогичные результаты получены в работе [24]: табл. 5 работы [24] содержит следующие зна-

чения средних периодов для отдельных субрегионов: Оахака II – 54 года ( $\approx 3T_0$ ), Оахака III – 38 лет ( $\approx 2T_0$ ), Сан-Маркос – 56 лет ( $\approx 3T_0$ ), Петатлан – 36 лет ( $\approx 2T_0$ ). Подчеркнем, что приводимые дополнительные данные для Мексики в существенной мере опираются на землетрясения с магнитудой ниже порога, принятого здесь для этих регионов, поэтому несут почти независимую информацию.

3. *О гипотетическом механизме цикличности.* Требования к этому механизму очень жесткие. Он должен объяснить наличие весьма разнообразных циклов ( $T_0/3$ ,  $T_0/2$ ,  $T_0$ ,  $3T_0/2$ ,  $3T_0$  и  $9T_0/2$ ) при отсутствии в списке их небольшого общего делителя  $T_0/6$  и нерезкой проявленности основного цикла  $T_0$ . Кроме того, само явление цикличности выступает в разном качестве: как тенденция, когда примерно половина длительности цикла активна, либо как довольно строгая периодичность: в последнем случае землетрясения могут повторяться в каждом цикле (Чили) либо с пропусками (Камчатка). В этой связи ограничимся весьма общими соображениями. Хорошо известно явление синхронизации нелинейного осциллятора внешним периодическим воздействием. Сейсмическая зона является таким осциллятором. Синхронизация осциллятора легко достигается на основном и на кратных периодах воздействия, например  $3T_0$ . Остальные периоды менее понятны. Надо также учесть, что период 18,613 лет – это период изменения амплитуды приливов (период модуляции). Для формирования длиннопериодного воздействия необходим еще один нелинейный элемент – демодулятор. В качестве такового может выступать процесс вибрационного ускорения течения в астеносфере под действием земного прилива. Изменение амплитуды прилива меняет скорость течения, а с ней и мгновенную тектоническую нагрузку. Заметим, что простейшая квадратическая нелинейность порождает период  $T_0/2$  (9 лет), а все замеченные периоды, кроме  $T_0/3$ , кратны  $T_0/2$ .

4. *Присутствие* в каталогах землетрясений кратных частот (дробных периодов) совместно с частотой/периодом внешнего воздействия обнаружены в работах [7, 14] для 11-летнего солнечного цикла, который уверенно выделили для сейсмичности периода 1946–1974 гг. в районе Курил. Вместе с периодом 11 лет присутствуют также 5,5- и 2,75-летний периоды. Анализ настоящей работы также выявил очень четкий 5,5-летний период ( $P = 0,00598$ ) для землетрясений Курил с  $H = 80 \dots 600$  км,  $M_{\text{НК}} = 7,4+$ .

5. *Исключение кластеров* в ряде случаев заметно снизило расчетный уровень значимости и тем самым определенно уменьшило вероятность самообмана.

6. *Возможность экстраполяции.* Попытка экстраполяции выявленных закономерностей в будущее напрашивается сама собой. Однако в силу их чисто эмпирического характера строго оценить надежность подобной экстраполяции невозможно. Закономерности наблюдались на протяжении нескольких циклов; это позволяет надеяться на успех, но не дает никакой гарантии. Известно, что нелинейные осцилляторы могут вести себя квазипериодически в течение нескольких циклов (или даже десятков циклов), что не мешает им сменить фазу или период, а также вообще перейти в хаотический режим. Наличие внешней синхронизации не меняет дела. Можно все же сделать попытку экстраполяции, опираясь на высокозначимые циклы.

7. *Экстраполяции для регионов.* К а м ч а т к а. 56-летний цикл позволяет ожидать здесь повышенной активности (для  $M = 7,6+$ ) в 2006–2043 гг.; 18,6- и 6-летний циклы позволяют дополнительно уточнить этот вывод. С учетом высокой значимости выявленной цикличности на Камчатке результаты оформлены как долгосрочный прогноз (см. в *Приложении*).

К у р и л ы и Х о к к а й д о. По 18,6-летней цикличности повышенная активность (для  $M = 7,6+$ ) здесь ожидается с настоящего времени до 1997 г. и в 2006–2015 гг.

А л е у т ы и А л ь с к а, М е к с и к а. 28-летний период дает для обоих регионов следующие периоды повышенной активности (для  $M = 7,7+$ ): 1983–1996, 2010–2024 гг.



Перу, Эквадор и Колумбия. Цикл  $T_0/2$  дает для этого региона период повышенной активности (для  $M = 7,8+$ ) в 1994–1999 гг.

8. Проверка *post factum*. Для демонстрации возможности прогнозирования сильных толчков на основе лунных циклов проверена результативность ранее опубликованного прогноза В.А. Широкого [13], составленного в 1972 г. на период после 01.01.1974 г. Авторы настоящей работы сопоставили произошедшие в 1974–1995 гг. события с объявленными там (на основе 18,6-летнего цикла) интервалами тревоги для землетрясений Камчатки, Курил и северо-востока Японии с  $M \geq 7,8$ , а именно 01.1974–02.1981 и 03.1988–09.1999 г. В эти интервалы попадает четыре события из четырех с  $M \geq 7,8$ , имевших место на конец 1995 г.: 23–24.03.1978 г. (кластер из трех событий); 12.07.1993, 04.10.1994 и 03.12.1995 г. (кластер из трех событий, дающих суммарно  $M = 7,8$ ). При суммарном времени тревоги 15 из 22 лет и гипотезе равномерности вероятность такого расклада 22%. Таким образом, результат вполне успешен, хотя значимость его невелика (22 года – недостаточный срок для надежной проверки). Толчок 08.12.1978 г. с  $M = 8$  на Южных Курилах на глубине 160 км также следует прогнозу, объявленному для глубин 0–100 км.

**Выводы.** Подтверждены известные и выявлены новые виды цикличности сильных землетрясений нескольких регионов Тихоокеанского кольца, с периодами, связанными с лунным циклом  $T_0 = 18,613$  лет. Наиболее выражены периоды  $3T_0/2 \approx 28$  лет и  $3T_0 \approx 56$  лет. Период 28 лет наблюдается в четырех из семи изученных регионов, наиболее четко для Аляски – Алеут и Мексики, а также для района Вальпараисо (Чили), где он является гармоникой известного цикла 85 лет ( $\approx 9T_0/2$ ), и для Камчатки. Активная фаза цикла синфазна по всем указанным регионам. Период 56 лет также наблюдается в четырех из семи изученных регионов, но в двух случаях это просто двукратное повторение 28-летнего цикла. Для Камчатки и Курил 56-летний цикл имеет одну общую, совпадающую в этих регионах активную фазу. На основе полученных результатов составлен долгосрочный прогноз сильных землетрясений и цунами на 1993–2062 гг. для Камчатки.

Авторы благодарны Ю.Н. Авсюку за полезные замечания.

Приложение

### Долгосрочный прогноз землетрясений и цунами на Камчатке (Районы Петропавловска-Камчатского и Усть-Камчатска)

Долгосрочный прогноз составлен (в 1991 г.) для двух районов Камчатки: побережья Авачинского залива с Петропавловском-Камчатским и Елизово (субрегион "Ю"); побережья Камчатского залива с пос. Усть-Камчатск (субрегион "С") (табл. 2 и 3). Прогноз составлен в предположении, что выявленные цикличности (с периодами  $T_0/3$ ,  $T_0$  и  $3T_0$ ) будут иметь место и в будущем, причем неактивные части циклов (в долях цикла: 0,0000–0,3333 и 0,8333–1,000 для периода  $T_0/3$ ; 0,6666–1,000 для  $T_0$  для  $T_0$  и 0,6666–1,000 для  $3T_0$ ) сохранят свой неактивный характер. Оставшиеся четыре интервала в пределах 56-летнего цикла, каждый длительностью  $T_0/6 = 3,1$  года, считаются "опасными".

В табл. 2 и 3 отражена ситуация для ближайших четырех "опасных" интервалов; все они принадлежат следующему 56-летнему циклу, который начинается в 2006 г. Для каждого интервала указаны "события-аналоги", произошедшие на 56, 112, ... лет ранее этого интервала, соответствующие значения балльности в Петропавловске-Камчатском и Усть-Камчатске и высоты цунами для побережья заливов Авачинского и Камчатского.



**Опасные периоды в течение 1991–2060 гг. для района Петропавловска-Камчатского  
по долгосрочному прогнозу на основе 56-летнего цикла**

Номер периода	Период, годы	Известные события в периодах-аналогах*					$p_M$	$p_I$	$p_h$
		год	$M_{нк}$	$M_y$	$I$ , балл	$h_{ц}$ , м			
1	2008,6–2011,7	1841	8,4	–	8–9	15	37	22	26
		1899	7,9	7,4	–	–			
		1952	8,5	–	7	15			
2	2014,8–2017,9	1737	8,3	–	8–9	30	43	42	26
		1792	8,4	–	8–9	2–5?			
		1848	–	–	–	5–10?			
		1904	7,7	7,2	8	–			
		1904	7,7	7,4	8	2–5?			
		1959	7,9	–	7–8	–			
3	2027,1–2030,2	–	–	–	–	16	14	09	
4	2033,3–2036,4	1866	–	–	8–9?	–	16	22	09
		1923	8,5	–	6–7	2–5			
		1827	–	–	7–8	2–5?			
Вне периодов-аналогов		1827	–	–	7–8	2–5?			

*Примечание.* Для каждого периода оценены вероятности хотя бы одного землетрясения с магнитудой  $M_{нк} \geq 7,6$  в субрегионе "Ю" (Юг Камчатки);  $p_I$  – хотя бы одного землетрясения силой  $I \geq 8$  баллов на средних грунтах в Петропавловске-Камчатском и Елизово;  $p_h$  – хотя бы одного цунами высотой  $h_{ц} \geq 5$  м на берегах Авачинского залива. Вне указанных опасных периодов, в частности с 1991 по 2007 г. вероятность возникновения подобных событий мала.

\* Примечательные землетрясения в Петропавловске-Камчатском и цунами на побережье Авачинского залива в течение периодов-аналогов, имевших место на  $55, 84, 2 \cdot 55,84 = 111,68...$  лет ранее данного опасного периода.

Таблица 3

**Опасные периоды в течение 1993–2060 гг. для района Усть-Камчатска  
по долгосрочному прогнозу на основе 56-летнего цикла**

Номер периода	Период, годы	Известные события в периодах-аналогах*					$p_M$	$p_I$	$p_h$
		год	$M_{нк}$	$M$	$I$ , балл	$h_{ц}$ , м			
1	2008,5–2011,7	–	–	–	–	–	11	09	03
2	2014,8–2017,9	1737	7,8	–	8–9	–	27	26	03
		1791	6,8	–	8	2–5?			
		1792	8,4	–	10	2–5?			
3	2027,1–2030,2	1915	7,3	7,6**	–	–	27	09	03
		1917	8,1	–	5–6	–			
		1971	7,8	–	7	0,5			
4	2033,3–2036,4	1756	–	–	8	–	20	26	12
		1923	8,5	–	7	–			
		1923	7,3	8,2***	8–9	11			
Вне периодов-аналогов		1936	5,7	–	8–9	–			

*Примечание.* Вероятности  $p_M$ ,  $p_I$  и  $p_h$  относятся к субрегиону "С", Усть-Камчатску и Камчатскому заливу соответственно.

\* Примечательные землетрясения вблизи Усть-Камчатска и цунами на побережье Камчатского залива в течение периодов-аналогов, имевших место на  $55, 84, 2 \cdot 55,84 = 111,68...$  лет ранее данного периода.

\*\* Значение  $M_y$ .

\*\*\* Значение  $M_r$ .

Оценка числа и вероятности землетрясений за 1993–2062 гг. и цунами для районов Петропавловска-Камчатского и Усть-Камчатска в течение четырех опасных периодов (см. табл. 2 и 3)

Место	Событие	Числа событий за 256 лет (1737–1992 гг.)					вне опасных периодов	Прогнозируемые на 1993–2062 гг.		
		в опасный период				сумма опасных периодов			N, сумма по опасным периодам	P (N > 0)
		1	2	3	4					
Субрегтон "Ю"	$M_{\text{нк}} \geq 7,6$	3	4	0	0	7	0	1,4(0–3)	0,75	
Субрегтон "С"	$M_{\text{нк}} \geq 7,6$	0	2	2	1	5	0	1,0(0–2)	0,63	
"Ю" + "С"	$M_{\text{нк}} \geq 7,6$	3	6	2	1	12	0	2,4(1–4)	0,91	
Петропавловск-Камчатский	$I \geq 8^*$	1	4	0	1	6	0	1,2(0–2)	0,70	
Усть-Камчатск	$I \geq 8$	0	2	0	2	4	1	0,8(0–2)	0,55	
Авачинский залив	$h_{\text{ц}} \geq 5^{**}$	2	2	0	0	4	0	0,8(0–2)	0,55	
Камчатский залив	$h_{\text{ц}} \geq 5$	0	0	0	1	1	0	0,2(0–1)	0,18	

Примечание. В скобках указан ожидаемый диапазон N за 2008–2036 гг.

\* Интенсивность землетрясений (балл).

\*\* Высота цунами (м).

В табл. 4 сведены числа событий, "превышение порога" по магнитуде ( $\geq 7,6$ ), баллу ( $\geq 8$ ) и высоте цунами ( $\geq 5$  м) для каждого из четырех интервалов, суммированные за 256 лет. Событие 1792 г. с учетом его описания [6] считали 2 раза – для "С" и "Ю". На основе приведенных данных рассчитана оценка математического ожидания  $\nu$  числа таких событий в каждом из четырех опасных интервалов. Оценка получена путем усреднения двух оценок, сделанных на основе двух гипотез – А и Б. По гипотезе А, ожидаемое число событий в каждом из четырех опасных интервалов одинаково: например, для событий  $M_{\text{нм}} = 7,6+$  и субрегиона "Ю" имеем семь событий за пять циклов, 1,4 события на цикл и 0,35 события в каждом опасном интервале. По гипотезе Б, события считаются раздельно для каждого опасного интервала: для тех же событий имеем в четырех периодах раздельно 3, 4, 0 и 0 событий за пять циклов, или среднее число событий 0,6; 0,8; 0,0 и 0,0. На основе оценок  $\nu$  определены значения вероятности  $P$  осуществления хотя бы одного события за конкретный опасный период, полученные по формуле, верной для отрезка пуассоновского процесса:

$$P = 1 - \exp(-\lambda t_0),$$

где  $\lambda t_0 \equiv \nu$  – математическое ожидание числа событий за время  $t_0 = 3,102$  года; оценки  $P$  даны в табл. 2 и 3.

Собственно прогноз формулируется в виде следующих утверждений.

1. События, описанные в табл. 4 ( $M \geq 7,6$ ;  $I \geq 8$  и  $h_{\text{ц}} \geq 5$  м), будут в течение 1992–2062 гг. происходить главным образом в периоды, указанные в табл. 2 и 3. С учетом общей неопределенности, ожидается, что в эти периоды произойдет не менее 80% таких событий за 1992–2062 гг.

2. Суммарное число таких событий за 2008–2036 гг. будет близко к значениям  $N$  (табл. 4). Даны оценки вероятности возникновения хотя бы одного события за весь период прогноза. Значения вероятностей  $P$  для каждого отдельного опасного периода (табл. 2 и 3) имеют чисто ориентировочный характер; надежность этих значений низкая.

Данный прогноз не распространяется на районы Берингова моря, Командорских о-вов, на слабые толчки ( $I < 7-8$  баллов), слабые цунами ( $h_{\text{ц}} < 5$  м), а также на промежуточные землетрясения. Отметим, что текущий период 1991–2008 гг. является периодом пониженной вероятности сильных землетрясений и цунами на тихоокеанском побережье Камчатки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каталог цунами на Камчатке. Обнинск: ВНИИГМИ-МПД, 1987. 51 с.
2. Кириллов Ф.А. Каталог землетрясений Курило-Камчатской зоны. Отчет. М.: Фонды ИФЗ АН СССР, 1962. 171 с.
3. Ламакин В.В. О периодичности байкальских землетрясений // Докл. АН СССР. 1966. Т. 170. № 2. С. 410–413.
4. Мардиа К. Статистический анализ угловых наблюдений. М.: Наука, 1978. 177 с.
5. Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир, 1968. 482 с.
6. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1977. 535 с.
7. Одинец М.Г. Статистический анализ последовательностей землетрясений на примере Дальнего Востока и Средней Азии // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1983. № 8. С. 20–29.
8. Соловьев С.Л., Го Ц.Н. Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. М.: Наука, 1974. 310 с.
9. Соловьев С.Л., Го Ц.Н. Каталог цунами на восточном побережье Тихого океана. М.: Наука, 1975. 203 с.
10. Тамразян Т.П. Периодичны ли землетрясения // Природа. 1975. № 12. С. 96–99.
11. Федотов С.А., Соболев Г.А. Долгосрочный и пробный краткосрочный прогноз камчатских землетрясений // Поиски предвестников землетрясений. Ташкент: ФАН, 1976. С. 49–61.

12. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т. 1. М.: Мир, 1984. 527 с.
13. Широков В.А. Влияние космических факторов на геодинамическую обстановку и ее долгосрочный прогноз для северо-западного участка Тихоокеанской тектонической зоны // Вулканизм и геодинамика. М.: Наука, 1977. С. 103–115.
14. Шурыгин А.М., Одинец М.Г. Долгосрочный статистический прогноз пространственно-временной плотности сильных землетрясений для Курильских островов // Вулканология и сейсмология. 1984. № 6. С. 92–102.
15. Anderson J.G., Singh S.K., Espindola J.V., Yamamoto J. Seismic strain release in the Mexican subduction thrust // Phys. Earth. and Planet. Inter. 1989. V. 58. P. 307–322.
16. Fedotov S.A., Sobolev G.A., Boldyrev S.A. et al. Long- and Short-term Earthquake Prediction in Kamchatka // Tectonophysics. 1977. V. 37. P. 305–321.
17. Kilston S., Knopoff L. Lunar-solar periodicities of large earthquakes in southern California // Nature. 1983. V. 304. № 7.
18. Nishenko S.P. Seismic Potential for Large and Great Interplate Earthquakes along the Chilean and Southern Peruvian Margins of south America: A Quantitative Reappraisal // J. Geophys. Res. 1985. V. 90. P. 3589–3615.
19. Nishenko S.P. Circum-Pacific Seismic Potential: 1989–1999 // PAGEOPH. 1991. V. 35. № 2. P. 169–259.
20. Nishenko S.P., Buland R. A Generic Recurrence Interval Distribution for Earthquake Forecasting // BSSA. 1987. V. 77. P. 1382–1399.
21. Nishenko S.P., Jacob K.H. Seismic Potential of the Queen Charlotte – Alaska – Aleutian Seismic Zone // J. Geophys. Res. 1990. V. 5. № B3. P. 2511–2532.
22. Pacheco J.F., Sykes L.R. Seismic Moment Catalog of Large Shallow Earthquakes, 1900 to 1989 // BSSA. 1992. V. 82. № 3. P. 1306–1349.
23. Perrey A.C. Memoire sur les rapports qui peuvent exister enterla frequence des tremblements de Terreet l'age de la Lune // Compt. Rend. Acad. Sci. 1853. V. 36. № 12.
24. Singh S.K., Astiz L., Havskov J. Seismic Gaps and Recurrence Periods of Large Earthquakes Along the Mexican Subduction Zone: A Reexamination // BSSA. 1981. V. 71. № 3. P. 827–844.
25. Usami T. Descriptive Catalogue of Disaster Earthquakes in Japan. Tokyo: Univ. Tokyo Press, 1975.

Институт вулканической геологии  
и геохимии ДВО РАН,  
Петропавловск-Камчатский

Поступила в редакцию  
14.10.1996