

УДК 550.34

## О РЕАЛЬНОСТИ 56-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА И ПОВЫШЕННОЙ ВЕРОЯТНОСТИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ПЕТРОПАВЛОВСКЕ- КАМЧАТСКОМ В 2008–2011 гг. СОГЛАСНО ЛУННОЙ ЦИКЛИЧНОСТИ

© 2008 г. А. А. Гусев

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006*

Поступила в редакцию 05.05.2008 г.

Ранее была отмечена 56-летняя цикличность сильных землетрясений на Камчатке. Эта цикличность – еще одно проявление выявленной в 1974 г. В.А. Широковым тенденции к синхронизации моментов сильных землетрясений Камчатки циклами, связанными с периодом  $T_0$  вращения линии узлов орбиты Луны. Широков выявил циклы 18.6 года  $= T_0$  и 6.2 года  $= T_0/3$ , а цикл в 56 лет имеет период  $3T_0$ . В связи с возникновением на Камчатке в конце 1997 г., в нарушение 56-летней цикличности, сильного ( $M_w = 7.8$ ) землетрясения, ее реальность следовало перепроверить. Оказалось, что хотя степень четкости 56-летнего цикла снизилась после 1997 г., сам факт цикличности сохранил статистическую значимость. Попутно уточнен прогноз опасности землетрясений на Камчатке. Такое уточнение необходимо в связи с приближением сроков опасного периода 2008–2011 гг. Обнаружено, что в предположении неизменности упомянутых эмпирических тенденций, повторяемость сильных землетрясений у берегов Камчатки будет в период август 2008 г.–октябрь 2011 г. повышена примерно в четыре раза относительно многолетней средней. Впервые делается прогноз опасности в терминах макросейсмической интенсивности для определенных грунтовых условий (средний грунт) в определенном пункте (г. Петропавловск-Камчатский). Для этих условий, оценка вероятности хотя бы одного сотрясения интенсивностью 7 баллов и выше в указанный период равна  $0.39 \pm 0.15$ . Ожидаемое число одиночных событий или групп событий с магнитудой  $M_w \geq 7.6$  на Камчатке в указанный период составляет  $0.76 \pm 0.25$ .

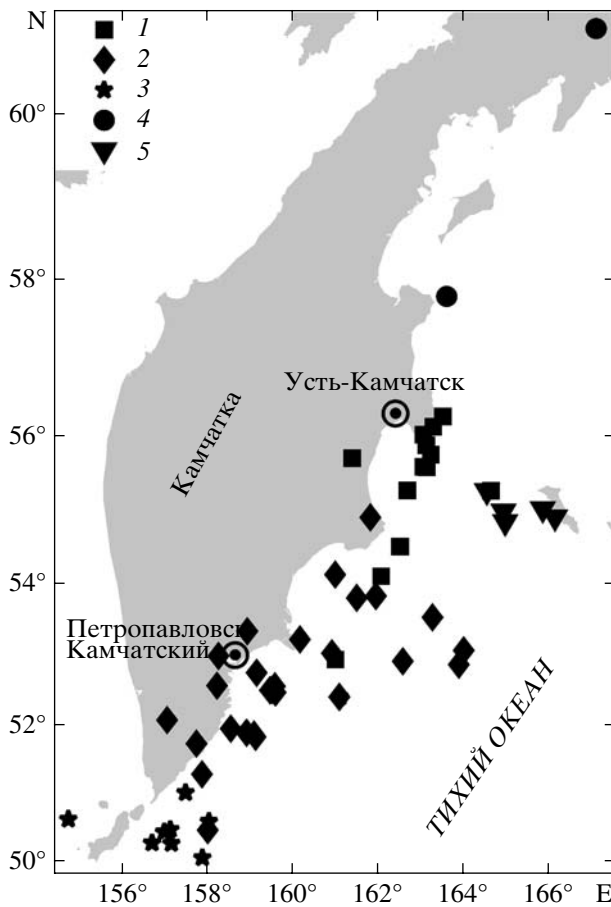
### ВВЕДЕНИЕ

Ранее неоднократно отмечалась связь землетрясений с лунными циклами и конкретно с периодом обращения линии узлов орбиты Луны  $T = T_0 = 18.613 \approx 18.6$  года. В ряде случаев замечалась также тенденция к цикличности землетрясений с периодами, близкими к  $kT_0/2$ , а именно 9.3 года, 27–28 лет, 37 лет и т.п., но эти периоды не ассоциировались с Луной. Литературу по данному вопросу и краткий обзор см. в [5]. Синхронизация сильных землетрясений Камчатки и Курил 18.6-летним циклом выявлена на эмпирической основе и использована для долгосрочного прогноза В.А. Широковым [12, 13, 15]. Наряду с циклом длительностью 18.6 г., Широков также обнаружил [15] выраженную синхронизацию для региона Камчатки на периоде  $T_0/3 = 6.204 \approx 6.2$  г. Позднее Гусев и Петухин [5] обнаружили в этом регионе дополнительную синхронизацию на периоде  $3T_0 = 55.84 \approx 56$  лет. Они также выборочно изучили каталоги сильных землетрясений ( $M = 7.6–7.7$  и более) ряда секторов Тихоокеанского пояса и в ряде случаев выявили или подтвердили подобную синхронизацию и в других местах. Оказалось, однако, что степень выраженности данного явления на Камчатке необычно велика.

Поясним, что  $T_0$  – это период вращения линии узлов лунной орбиты, т.е. линии, по которой плоскость орбиты Луны сечет эклиптику (плоскость ор-

биты Луны наклонена под углом  $\sim 5^\circ$  к эклиптике). По этой причине, с периодичностью 18.6 года, происходят изменения размаха (амплитуды) месячных изменений склонения Луны. Поскольку экватор наклонен под  $23^\circ$  к эклиптике, указанный размах периодически колеблется между крайними значениями  $18^\circ$  и  $28^\circ$ . В результате меняются, в абсолютном и относительном смысле, амплитуды различных составляющих земного прилива [8]. На натурфилософском уровне, подмеченные тенденции к цикличности наводят на мысль о связи землетрясений с Луной, скорее всего через приливные эффекты. Однако физические механизмы подобной связи пока не предложены, и анализ далее ведется на чисто эмпирической основе.

В [5] на основе проведенного статистического исследования лунной цикличности был сформулирован прогноз сейсмической опасности на период 1997–2060 гг. В 1997 г. на Камчатке произошло сильное ( $M_w = 7.8$ ) землетрясение в противоречии с этим прогнозом. Конкретно, была нарушена именно тенденция к 56-летней цикличности. Однако лунные цикличности в принципе имеют лишь вероятностную природу и могут иногда нарушаться. Цикличность, к тому же, имеет пороговый характер: ниже некоторого магнитудного порога, различного для разных регионов, значимая цикличность исчезает, несмотря на рост объема выборок. Поэтому следовало выяснить, в какой мере вывод о реально-



**Рис. 1** Эпицентры землетрясений, изучавшихся в работе, см. табл. 1. Обозначения секторов: 1 – Усть-Камчатск (У); 2 – Петропавловск-Камчатский (П); 3 – мыс Лопатка (Л); 4 – зал. Озерной и Корьякия (О); 5 – о-ва Беринга и Медный (Б). Эпицентры смещены на 10–20 км, чтобы сделать видимыми несколько эпицентров с совпадающими координатами в каталоге.

сти 56-летнего цикла сохранится при дополнительном учете события 1997 г. Заодно было полезно уточнить сделанный в 1997 г. прогноз ближайшего периода повышенной вероятности сильных землетрясений на Камчатке. А именно, была поставлена задача сформулировать прогноз землетрясений социально ориентированным образом – в терминах макросейсмической интенсивности (“балльности”) на среднем грунте в определенном пункте.

#### УТОЧНЕННАЯ СВОДКА ДАННЫХ О КАМЧАТСКИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯХ

Для уточнения долгосрочного прогноза были изучены и сведены материалы о сильных землетрясениях на Камчатке, с учетом пересмотра магнитуд в [4, 6]. Эпицентрия и макросейсмические данные взяты в основном из [7, 9]. Рабочий каталог приведен в виде табл. 1. В нем и далее используются только моментные магнитуды  $M_w$  согласно [4, 6], далее обозначает-

мые просто  $M$ . В табл. 1 приводятся все известные с 1727 г. землетрясения Камчатки, Северных Курил, Командорских о-вов и сейсмического пояса Камчатский пролив – Корьякия, с  $M \geq 7.4$  (рис. 1), а также выборочно ряд событий меньшей магнитуды, в случаях, когда их балльность превышала 6. При рассмотрении табл. 1 и рис. 1 следует иметь в виду, что эпицентры до 1900 г. гипотетические, оценены по макросейсмическим данным и данным о цунами. После 1900 г. эпицентры – инструментальные и отражают точку начала очагового процесса; однако эпицентры 1904–1923 гг. имеют точность не лучше 100 км. Во всех случаях координаты точки – эпицентра не дают полного представления о положении протяженного очага, длина которого вполне может достигать 500–600 км, возможно, более. Вероятное размещение протяженных очагов после 1900 г. см. [4]. Глубины очагов  $H$  также достаточно условны, их точность до 1960 г. не лучше 30 км. Кроме того, при  $M \geq 7.4$  вертикальная протяженность очага обычно 20–30 км и более, что делает саму точечную оценку глубины условной.

При составлении табл. 1 была впервые сделана попытка привести данные о сотрясениях в конкретных местах к условному среднему грунту. Практически, речь идет о двух местах: 1 – пара близких населенных пунктов Нижне-Камчатск (оставлен) и Усть-Камчатск; 2 – Петропавловск-Камчатский и его окрестности. Для Нижне-Камчатска названное приведение выполнить трудно, так как территория Нижне-Камчатска (как и Усть-Камчатска) с точки зрения сейсмологических свойств грунтов никогда не изучалась. Однако судя по данным обследования последствий землетрясений последних десятилетий, нет явных оснований приписывать Усть-Камчатску поправку +1 балл за обводненные грунты. То же можно ожидать и для основной части территории Нижне-Камчатска, кроме прибрежной полосы. С учетом всех факторов, поправка к наблюдениям в Нижне-Камчатске (для приведения к среднему грунту Усть-Камчатска) принята равной –0.5 балла. (Посящим, что в работе систематически используются оценки балльности с точностью полбалла [2]; таким образом, наше обозначение 7.5 балла соответствует традиционному VII–VIII).

Поправка за грунтовые условия должна быть также внесена и в данные о проявлениях землетрясений в историческом Петропавловске-Камчатском. Как следует из тщательного исследования [1], участки современного города, на которых располагалась застройка исторического “порта Петропавловск на Камчатке” систематически имеют балльность ниже, чем средние грунты. Конкретно, для участков № 61, 64–66 получены приращения балльности относительно среднего грунта, равные, соответственно, –0.3, –0.7, +0.1 и –0.4 балла. При этом лишь небольшая часть участка 65 относится к зоне исторической застройки. Осредняя оценки по остальным трем участкам, получаем –0.47, или

Таблица 1. Исходный рабочий каталог землетрясений

Сектор	Дата	$\lambda$	$\varphi$	$H$	$M_w$	$I$ (Пп)	$I$ (ПК)	$I$ (НК)	$I$ (УК)
П, Л	1737.10.17	50.50	158.00	40	9.2		8.5		
У	1737.11.04	55.50	163.00	20	8.0			8	7.5
Л	1737.12.17*	50.00	157.00	50	–				
Л	1742.11.18	50.50	157.00	40	7.5				
У	1756.07.01	55.50	163.00	20	7.5			8	7.5
У	1790.12.02	54.00	162.00	20	7.5				
У	1791.04.15	56.00	163.00	20	7.5			7.5	7
У, П	1792.08.22*	54.00	162.00	20	8.8		8	9.5	9
Б	1827.06.01*	55.00	165.00	20	7.4				
П	1827.07.01*	53.10	158.50	15	7.0	6.5	7		
П	1841.05.17	52.50	159.50	30	9.0		8		
П	1848.07.01	52.50	159.50	30	7.5				
Б	1849.10.28	55.00	166.00	20	7.7				
Л	1854.06.27*	50.50	157.00	40	7.7				
Б	1858.01.22	55.00	166.00	20	7.5				
П	1866.09.06*	52.50	159.50	30	7.4		7.5		
П	1899.11.23*	53.00	159.00	20	7.6				
П	1904.06.25*	52.00	159.00	30	7.4	7.5	8		
П	1904.06.25*	52.00	159.00	30	7.5	7.5	8		
П	1904.06.27	52.00	159.00	30	7.3	6.5	7		
П	1904.07.24	52.00	159.00	30	7.0				
П	1905.09.15	53.00	164.00	30	7.5				
П	1907.08.17	52.00	157.00	120	7.0		7		
У	1915.07.31	53.50	163.30	20	7.8				
У	1917.01.30	55.20	164.50	20	8.0				
П	1923.02.02	52.50	160.50	20	7.4				
П, У	1923.02.03*	53.00	161.00	20	8.5		6		7
У	1923.02.24	55.00	162.40	20	7.6				
У	1923.04.13*	55.40	162.80	20	7.7				
П	1927.12.28	53.80	161.40	20	7.5				
Л	1929.01.13	50.60	154.70	135	7.7				
П	1931.05.12*	52.60	158.20	10	5.8		7		
У	1933.03.17	54.40	162.50	20	7.2				
Б	1936.06.30	55.00	165.00	20	7.6				
У	1936.11.13	56.20	163.30	20	7.3				7
У	1937.10.28	56.00	163.00	20	5.7				7
У	1944.09.23	53.00	162.50	20	7.4				
П, Л	1952.11.04	52.30	161.00	20	9.0		7		
П	1955.03.18	54.00	161.00	70	7.4				

Таблица 1. Окончание

Сектор	Дата	$\lambda$	$\phi$	$H$	$M_w$	$I$ (Пп)	$I$ (ПК)	$I$ (НК)	$I$ (УК)
П	1959.05.04	53.10	160.30	20	8.0		8		
П	1960.07.25	53.50	158.90	120	7.4				
О	1969.11.22	57.80	163.60	20	7.7				
П	1971.11.24	52.67	159.50	125	7.5		7		
У	1971.12.15	55.91	163.37	30	7.8		7		
Л	1973.02.28	50.36	156.70	70	7.4				
П	1993.06.08	51.25	157.77	54	7.5				
У	1997.12.05	54.88	161.95	33	7.8				
О	2006.04.20	60.98	167.37	12	7.6				

Примечание. Обозначения секторов: П – Петропавловск, У – Усть-Камчатск, Л – мыс Лопатка, Б – о-ва Беринга и Медный, О – зал. Озерной и Корякия, некоторые очаги настолько протяженные, что имеют двойную привязку;  $\lambda$  – долгота и  $\phi$  – широта – координаты эпицентра,  $H$  – глубина км;  $M_w$  – моментная магнитуда,  $I$  (Пп) – балл в Петропавловском порту,  $I$  (ПК) – балл на ср. грунте в Петропавловске,  $I$  (НК) – балл в Нижне-Камчатске,  $I$  (УК) – балл на ср. грунте в районе Усть-Камчатска. Звездочкой помечены события, по которым имеются следующие примечания: 1737.12.17 – сочтено повторным упоминанием' события 1737.11.17, исключено 1792 – балл  $I = 8-9$  в Паратунке вблизи Петропавловска, принято  $I$  (ПК) = 8 б. 1827.06.01 – в июне землетрясение и небольшое цунами на о. Беринга [7], нет в Новом Каталоге [9]. Магнитуда по минимуму. 1827.08.10 – балл  $I$  (Пп) 6.5 (очень сильный испуг) в Петропавловском порту, принято  $I$  (ПК) = 7 б. с поправкой +0.5. В “селе Авача” – 8–8.5 балла, это современное Елизово; не путать с современным пос. Авача. Нет в Новом Каталоге [9]. Магнитуда по минимуму. 1841 – балл  $I$  (ПК) не менее 8 по общему описанию;  $I$  (Пп) = 7–8 б., в Петропавловском порту, принято  $I$  (ПК) = 8 б. с поправкой +0.5 б. 1854 – время из [9] – фактически, по ст. стилю. Координаты [9] подправлены. 1866 – нет уверенности в привязке к району Петропавловска. Балльность неуверенна, магнитуда и балльность приняты по минимуму. 1899 – инструментальный эпицентр крайне неточен, привязка к району Петропавловска условна. При подсчетах значимости и повторяемости исключено. 1904.06.25 – первое событие в 14 ч 45 м, второе в 21 ч 00 м. Описание сотрясений не указывает на полные 8 б.; в частности, не отмечено разрушение печей. Принято 7–8 б. в историческом Петропавловске 8 б. на ср. грунте. 1923.02.03 – эпицентр и очаговая зона в южной и средней части Кроноцкого залива [4, 9, 10] плохо согласуются с картиной балльности, которая ниже в более близком Петропавловске (6 б.) и выше в более удаленном Усть-Камчатске (7 б.). Возможен эффект направленности излучения, или же очаг фактически охватывал и Кроноцкий п-ов ([10]). 1923.04.13 – магнитуда неуверенная: по поверхностным волнам  $M_s = 7.2$ ; по мощи цунами,  $M_t = 8.2$ , принято среднее из этих оценок. 1931 – сведений из собственно Петропавловска нет. В Паратунке 7 б., на Петропавловском маяке 7 б.

округленно –0.5 балла. Данный факт был учтен при пересмотре исторической макросейсмологии при подготовке табл. 1. Радикальных изменений нет, так как многие описания землетрясений дают макросейсмические сведения из окружающих пунктов. Отметим, что сам этот факт неявно свидетельствует о том, что проявления землетрясений в Петропавловском порту были менее выражены, чем в соседних пунктах, и тем самым подтверждает необходимость внесения обсуждаемой поправки.

Исторические материалы позволяют думать, что на Камчатке период 1727–1855 гг. относительно равномерно охвачен наблюдениями, хотя для событий с  $M < 8$  пропуски вполне вероятны. Для периода 1855–1900 гг., от закрытия Петропавловского порта до начала экономического оживления, степень неполноты данных намного выше, и здесь вполне могло быть пропущено более половины сильных землетрясений. Особенно вероятны для доинструментального периода пропуски для районов Кроноцкого п-ова, Командорских о-вов и особенно Корякии, но и для района Усть-Камчатска полноты ожидать не приходится.

После 1900 г. для уровня  $M \geq 8$ , а примерно с 1912 г. для уровня  $M \geq 7.4$ , по-видимому, серьезных пропусков в каталогах нет. Для грубых оценок

можно предположить следующие значения для доли пропусков: (1) – для порога  $M = 7.4$ : 25–40% в 1727–1855 гг. и 50–80% в 1856–1903 гг.; (2) – для порога  $M = 8.0$ : 0–15% в 1727–1855 гг. и 30–50% в 1856–1903 гг. При пересчете на период 1727–2007 гг., длительностью 280 лет, эти пропуски можно представить как потерю примерно 20–30% событий этого периода для порога  $M = 7.4$ , или около 5–10% событий для порога  $M = 8.0$ . В принципе, соответствующие поправки следовало бы внести в оценки повторяемости, но для увеличения надежности результатов это не делалось.

Следует сделать особое замечание по поводу данных о цунами в Усть-Камчатске. Можно думать, что выбор ительменами для поселения пункта, где был затем поставлен Нижне-Камчатский острог (позднее – Нижне-Камчатск) в 10 км вверх от устья р. Камчатка связан как раз с известной им высокой цунамиопасностью самого устья. Пос. Усть-Камчатск возник как сезонная рыбопромысловая база в самом конце XIX в., до этого в устье р. Камчатка населенных пунктов не было. Сведения о цунами в собственно устье Камчатки поэтому отрывочны, и следует ожидать, что статистика цунами здесь страдает существенными пропусками.

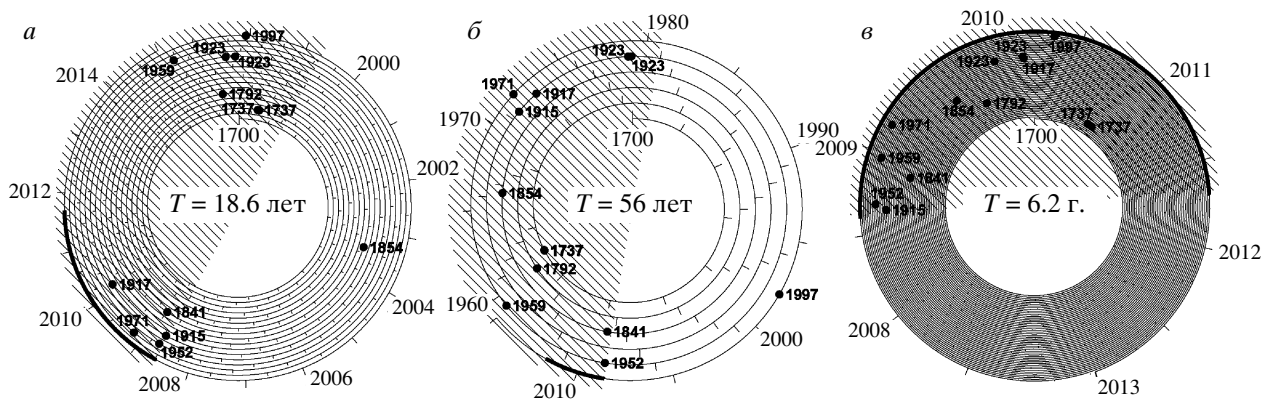


Рис. 2. Спиральные диаграммы для циклов длительностью 18.6 года (а), 56 лет (б) и 6.2 года (в) для землетрясений у берегов Камчатки ( $M \geq 7.6$ ,  $H = 0-70$  км) за 1727–2006 гг. Заштрихованы “опасные” половины циклов. Жирная дуга – опасный 3.1-летний интервал август 2008 г.– октябрь 2011 г.

Для анализа влияния на результаты пространственного фактора были выделены пять районов (секторов) отбора очагов: секторы Усть-Камчатска (У), Петропавловска (П) и мыса Лопатка (Л) в Курило-Камчатской дуге; сектор о. Беринга–о. Медный (Б) в Алеутской дуге; и сектор п-ова Озерной-Корякия (О). Привязка очагов к районам ясна из рис. 1 и табл. 1. По поводу выбора сектора (Л) поясним, что напротив южной оконечности п-ова Камчатка (мыс Лопатка) находится средняя часть очага землетрясения 04.10.1952 г. (и весьма вероятно, также 17.10.1737 г.), поэтому граница рассматриваемого “Камчатского” региона была смещена на юг, до южной оконечности о. Парамушир.

#### РЕАЛЬНОСТЬ ЗНАЧИМОСТЬ 56-ЛЕТНЕГО ЦИКЛА, ЭМПИРИЧЕСКИЙ ПРОГНОЗ МАГНИТУД

**Спиральные диаграммы.** Одной из побочных задач работы был выбор удобного способа представления результатов. Обычно при анализе данных о цикличности точки, изображающие моменты событий на оси времени, сначала отображаются на кольцо с длиной, равной периоду цикла. Далее это кольцо либо приводится на графике, либо чаще разрезается и развертывается в сегмент, где событие с датой  $t_i$  изображается своим значением фазы  $\varphi$  в интервале (0.1):

$$u = (t_i - t_0)T; \quad \varphi = u - \text{Entier}(u),$$

где  $\text{Entier}(\cdot)$  – целая часть,  $t_0$  условное начальное время,  $T$  – период цикла. Более наглядна диаграмма, в которой время развертывается в виде спирали, а фазы представлены как полярные углы ( $2\pi\varphi$ ).

**Цикличности и их значимость.** На рис. 2 приведена спиральная диаграмма мелкофокусных ( $H < 70$  км) землетрясений с  $M \geq 7.6$  за 1727–2007 гг. суммарно для трех условно выделенных секторов

Курило-Камчатской дуги (Л, П, У). Как и в [5], чтобы избежать возможного самообмана, тесную по времени и пространству группу считали за единичное событие. Конкретно, были объединены в группы события июня 1904 г. и февраля 1923 г.

Для данного региона четкое распределение событий по фазам циклов 18.6 лет и 6.2 года отмечено ранее В.А. Широковым [12, 13, 15], а для цикла в 56 лет – в [5]. Там же на основе 56-летнего цикла предполагалось, что период 1980–2007 гг. является периодом пониженной вероятности сильных землетрясений. Этот прогноз не оправдался: в 1997 г. произошло Кроноцкое землетрясение с  $M = 7.8$ . Поэтому, хотя статистический анализ цикличности уже был проведен в [5], он будет здесь повторен в минимальном объеме.

Реальность цикличности проверялась по слегка модифицированному классическому критерию Шустера. Критерий Шустера говорит, какова вероятность следующей нулевой гипотезы: асимметричное расположение наблюдений на вышеупомянутом кольце порождено случайным сгущением изображающих точек на одной из его сторон. Каждая из  $N$  точек представляется вектором единичной длины, проведенным к ней из начала координат. Сумма таких векторов – это случайное блуждание с постоянным шагом. Уход точки от начала координат – это дискретный диффузионный процесс, асимптотически хорошо описываемый через нормальный закон (по Шустеру), что и позволяет рассчитать пороговые значения критерия. Однако при малых  $N$ , что обычно в нашем случае, нужны поправки к асимптотике. Поэтому использовали метод Монте-Карло, моделируя 100000 реализаций из  $N$  точек, случайно равномерно разбросанных по кольцу. В результате получали с достаточной точностью модельный закон распределения для любых  $N$ , по которому и оценивали уровень значимости для суммарного вектора, отображающего наблюдения. Преимуществом критерия Шустера в сравнении с использованным

**Таблица 2.** Уровни значимости  $Q$  для гипотезы цикличности при отборе данных по эпицентру и магнитуде

Цикл	Критерий отбора			Геом. среднее.
	$M_{\min} = 8$	$M_{\min} = 7.6$	$M_{\min} = 7.4$	
Секторы УПЛ; $H < 70$ км; $n = 8/13/23$ ,				
$T_0$	0.24	0.38	0.031	0.14
$3T_0$	0.039	0.053	0.047	0.046
$[3T_0]^*$	0.035	0.014	0.019	0.022
$T_0/3$	0.012	0.00028	0.00022	0.0009
$T_0/18$	0.016	0.24	0.070	0.064
Секторы УПЛ; $H < 200$ км; $n = 8/14/28$				
$T_0$	0.24	0.59	0.080	0.22
$3T_0$	0.038	0.11	0.019	0.043
$T_0/3$	0.012	0.00005	0.00002	0.0002
Сектор У; $n = 4/6/8$ ,				
$3T_0$	0.21	0.062	0.055	–
Сектор П; $n = 6/8/15$				
$3T_0$	0.074	0.18	0.28	–
Сектор Л; $n = 2/3/4$ ,				
$3T_0$	–	–	0.061	–
Сектор Б; $n = 0/2/5$ ,				
$T_0$	–	–	0.37	–
$3T_0$	–	–	0.87	–
$T_0/3$	–	–	0.69	–

Примечание. Три числа после  $n =$  – это числа событий для каждого из трех указанных магнитудных порогов. \* – условная проверка “по состоянию” на 1996 г. с исключением события 1997 г.

ранее в [5] критерием Кушпера является отсутствие “паразитной” чувствительности к дробным периодам, длиной в  $1/2, 1/3, \dots$  от основного.

В табл. 2 приведены уровни значимости  $Q$  для циклов 18.6, 56 и 6.2 лет для ряда вариантов набора событий: для объединения секторов Л, П, У (далее обозначается как “сектор” ЛПУ), для  $H = 0-70$  км и  $H = 0-200$  км, и раздельно для секторов Л, П, У и Б. Проиллюстрирован также вариант с исключением события 1997 г. Вариант “ЛПУ,  $M_{\min} = 7.6, H = 0-70$  км” далее упоминается как “базовый”. По возможности использован набор магнитудных порогов  $M_{\min} = 8.0, 7.6$  и  $7.4$ , кроме случаев недостатка данных. Поскольку зависимость  $Q(M_{\min})$  испытывает сильные статистические флуктуации, в качестве обобщения трех оценок  $Q$  для разных вариантов магнитудного порога дается также геометрическое среднее этих оценок. Из табл. 2 видно, что:

– цикл 6.2 года выражен особо резко, демонстрируя уровни значимости порядка  $10^{-3}$ ;

– 56-летний цикл выделяется на уровне значимости от 2 до 11% для всех вариантов обработки дан-

ных по секторам Л, П и У, кроме сектора П отдельно при  $M_{\min} = 7.6$  и  $7.4$ . При этом, хотя возникновение очага 1997 г. заметно ухудшило значимость для 56-летнего цикла, но он все же продолжает устойчиво выделяться;

– цикл 18.6 года выражен слабее всех, и, взятый сам по себе, мог бы быть сомнителен;

– в секторе Б изучаемые цикличности отсутствуют (это верно и для объединения секторов Б + О).

В отношении цикла 56 лет можно сделать вывод, что допустимо продолжать использовать эту цикличность в практике прогноза.

**Формулировка прогнозов в терминах повышения частоты событий.** Собственно прогноз удобно формулировать, выделяя относительно опасные периоды. (Для оценки значимости этот подход неудобен.) Опасные периоды будем описывать через следующие параметры. Обозначим через  $K$  “коэффициент концентрации”, то есть превышение частоты событий в пределах опасного периода над многолетней средней частотой. Этот параметр идентичен введенной в [3] “эффективности прогноза”, но используется здесь не для проверки реальности и оценки качества метода прогнозирования, а для формулировки собственно прогноза. Введем также “идеальный коэффициент концентрации”  $K_0$  для того идеального случая, когда все опасные события возникают исключительно в пределах опасных периодов. Отношение  $K/K_0 \leq 1$  – это коэффициент, отражающий неидеальность прогноза, обозначим его  $q$ . (В сущности,  $1 - q$  – это вероятность пропуска.)

Из рис. 2 видно, что для каждой из трех диаграмм можно выделить более и менее опасные половины цикла. Поскольку длительности циклов кратные, нетрудно комбинировать разные виды информации. Начнем со случая, когда менее опасная половина каждого из циклов полностью лишена событий. Тогда плотность событий на опасной половине 6.2-летнего цикла вдвое выше средней. Далее, половины 6.2-летнего цикла присутствуют как три  $1/6$  доли в 18.6-летнем цикле. Из этих трех долей опасны лишь две (попадающие в опасную половину 18.6-летнего цикла). Таким образом, плотность событий на этих двух долях увеличена в  $2 \times (3/2) = 3$  раза относительно средней. Аналогично, из трех опасных половин 18.6-летних циклов в пределах 56-летнего цикла, две попадают в его активную половину. В их пределах плотность событий увеличена еще в  $3/2$  раза. Суммарно,  $K_0 = 2 \times (3/2) \times (3/2) = 4.5$ . Тот же результат можно вывести, заметив, что опасны четыре 3.1-летних периода в пределах 56-летнего цикла, то есть  $2/9$  его длительности.

Фактически концентрация вероятности на каждом шаге не абсолютная. Рассмотрим “базовый” вариант с 13 событиями. Событие 1997 г. не попало в опасную половину 56-летнего цикла, а событие 1854 г. – в опасную половину 18.6-летнего цикла.

Таблица 3. Прогнозные оценки параметров сейсмической опасности

События	$n$	$n_+$	$\lambda$	$q$	$\lambda_{\text{оп}}$	$R$	$P$	$\delta, \%$
З, $M \geq 8$	8	8	0.029	1	0.131	0.46	0.37	40
З, $M \geq 7.6$	13	11	{0.067}	0.85	0.245	0.76	0.53	30
З, $M \geq 7.4$	23	16	0.082	0.70	0.26	0.80	0.55	25
СГПК, $I \geq 7.5$	6	6	0.028	1	0.121	0.37	0.31	45
СГПК, $I \geq 7$	11	8	0.049	0.73	0.161	0.50	0.39	35
СГУК, $I \geq 7.5$	3	3	0.0134	1.000	0.0603	0.1868	0.1704	60
СГУК, $I \geq 7$	8	6	0.0386	0.750	0.1302	0.4036	0.3321	40
ЦУК, $H_{\text{ц}} > 5$ м	1	1	[0.0045]	1.000	[0.0201]	[0.0623]	[0.0604]	–
ЦУК, $H_{\text{ц}} > 2$ м	3	2	[0.0145]	0.666	[0.0434]	[0.1345]	[0.1259]	–

Примечание. Коды видов событий: З – очаги землетрясений в “секторе” ЛПУ при разных порогах  $M$ ; СГПК и СГУК – сотрясения на среднем грунте в Петропавловске и Усть-Камчатске для заданного порога балльности; ЦУК – превышение волной цунами в Усть-Камчатске заданного порогового уровня высоты  $H_{\text{ц}}$ . Остальные обозначения см. текст. Значения в квадратных скобках ненадежны, реальные цифры должны быть заметно выше. В фигурных скобках – принятое в дальнейших расчетах подправленное значение; оно заменяет эмпирическую оценку 0.046 (пояснения в тексте).

Значения  $q$  для каждой из этих неидеальных цикличностей равны:

$$q = n_+/n,$$

где  $n_+ = 12$  – число событий, попавших на активную часть цикла, из их полного числа  $n = 13$ . Перемножая значения  $q$  для трех цикличностей, равные 1, 12/13 и 12/13, получим  $q = 0.852$ , так что плотность событий в течение опасных 3.1-летних периодов здесь увеличена не в 4.5, а только в  $K = q K_0 = 3.83$  раза.

Ясно, что степень неопределенности полученных оценок велика, но все же можно сделать вывод об увеличении плотности событий в опасный 3.1-летний период приблизительно вчетверо относительно многолетней средней. Очередной 3.1-летний опасный период для побережья Камчатки и Северных Курил, как видно из рис. 2 – это август 2008 г.–октябрь 2011 г.

Отметим, что описанная схема расчета аккуратно учитывает коррелированный характер информации, доставляемой наличием цикличности на нескольких циклах с кратной длительностью. Если бы информация была независимой, попадание событий в каждом из трех различных циклов только на одну из двух половин цикла привело бы к нарастанию числа событий в  $K_0 = (1/2)^{-3} = 8$  раз, вместо 4.5 раза.

**Формулировка прогнозов в терминах числа и вероятности событий.** Кроме коэффициента концентрации, найдем непосредственно оценки годовой плотности событий для опасного периода. Начнем с оценки стационарной плотности  $\lambda$ . Для магнитудных порогов 8.0, 7.6 и 7.4 имеем для глубин 0–70 км и “сектора” ЛПУ 8, 13 и 23 события за 280 лет. Это дает оценки плотности  $\lambda = 0.029, 0.046$  и  $0.082$  соб./год.

Однако, полученное различие оценок плотностей для близких значений  $M_{\text{мин}} = 7.6$  и  $7.4$  почти вдвое – неправдоподобно резкое; скорее всего оно отражает искусственное занижение магнитуд при

“осторожной” интерпретации ненадежных исторических данных. (То есть, значение  $M = 7.4$  в каталоге на самом деле следует понимать как “не менее 7.4”). Поэтому данные выровняли в предположении справедливости закона Гутенберга-Рихтера с  $b = 1$  с сохранением полного числа событий (23); в результате  $\lambda(7.6)$  подняли до 0.067.

Дальнейшие шаги проиллюстрируем на примере базового варианта ( $M = 7.6$ ). Оценка плотности событий  $\lambda(t) = \lambda_{\text{оп}}$  в течение опасного периода составляет:

$$\lambda_{\text{оп}} = K\lambda = 3.8 \times 0.067 = 0.245 \text{ соб./г.}$$

Это и есть искомая оценка годовой плотности событий в течение опасного периода.

Отсюда легко получить производные оценки – для ожидаемого числа событий  $R$  за опасный период длительностью  $T_{\text{оп}} = 3.1$  года, и для вероятности  $P$  осуществления хотя бы одного события за время  $T_{\text{оп}}$ . Эти оценки равны:

$$R = \lambda_{\text{оп}} T_{\text{оп}} = 0.245 \times 3.1 = 0.76,$$

$$P = 1 - \exp(-R) = 0.53.$$

Эти формулы верны в предположении пуассоновского процесса, что сочтено приемлемым для наших целей. Аналогичные цифры для других  $M_{\text{мин}}$  см. в табл. 3.

Формальную точность полученных значений  $\lambda_{\text{оп}}$ ,  $R$  и  $P$  можно определить, исходя из точности для  $n$  (в предположении пуассоновского потока около  $n^{0.5}$ ) и точности для  $K$  (получается из точности для  $n^+$  при заданном  $n$ ; в предположении распределения Бернулли, не хуже  $0.5 n^{0.5}$ ), что дает в предположении независимости этих двух ошибок суммарную относительную точность  $R$  около  $1.1 n^{-0.5}$ . Соответствующие оценки даны в округленном виде в столбце  $\delta$  (табл. 3), они приложимы ко всем трем столбцам  $\lambda_{\text{оп}}$ ,

**Таблица 4.** Уровни значимости по критерию Шустера для гипотезы цикличности, для детально не изучавшихся циклов, “сектор” ЛПУ,  $H < 70$  км

Цикл	Критерий отбора			Геом. среднее
	$M_{\min} = 7.9$	$M_{\min} = 7.6$	$M_{\min} = 7.4$	
$T_0/18$	0.016	0.24	0.070	0.064
$T_{\text{сарос}}/4 = 4.508$ г.*	0.054	0.067	0.059	0.0598
1/4 года (солнечного)	0.0034	0.1537	0.9176	0.0783
1/20 года (солнечного)	0.0101	0.0092	0.0005	0.0036
$T_{\text{драк}}/6 = 0.0124$ г.**	0.0133	0.0021	0.033	0.0097
$2 \cdot T^{(C1)} = 43/6$ г.***	0.032	0.041	0.16	0.059
$2 \cdot T^{(C2)} = 42.5$ г.***	0.056	0.070	0.11	0.077

Примечание. \*  $T_{\text{сарос}} = 18.03$  г.; сарос – цикл затмений Луны и Солнца. \*\*  $T_{\text{драк}} = 27.21$  сут – драконический месяц, период прохождения Луны через определенный узел своей орбиты.

\*\*\*  $T^{(C)} \approx 22$  года – период двукратной инверсии направления магнитного поля Солнца. Данная периодичность нестрогая. Расчет сделан в двух вариантах, следуя [14]: на основе оценки  $T^{(C1)} = 21.8$  за последние 300 лет и оценки  $T^{(C2)} = 21.25$  за период после 1900 г.

*R* и *P*. Реальная точность ниже, так как включает еще учет степени надежности всех сделанных предположений (о стационарности  $\lambda$ , о стабильности цикличности и др.); формально ее оценить невозможно.

**Другие циклы.** Задачей данной работы была избрана проверка значимости 56-летнего цикла после события 1997 г. и формулировка прогноза в терминах повторяемости сотрясений, на основе трех уже известных циклов, кратных 18.6 года. Однако попутно для ранее изученного варианта набора данных (“Сектор” ЛПУ,  $H < 70$  км) обнаружилось наличие еще ряда цикличностей. В табл. 4 для ряда вариантов длины цикла указаны уровни значимости для критерия Шустера для трех вариантов  $M_{\min} = 8.0, 7.6$  и  $7.4$ , а также их среднее геометрическое. Следует отметить особо цикл  $T_0/18$ , равный 1/6 доле от наиболее уверенно выделенного ранее цикла  $T_0/3$ . Допуская реальность цикла  $T_0/18$ , получим, что ближайшие опасные периоды – это 05.08.2008–15.02.2009 гг., 15.08.2009–25.02.2010 гг. и 01.09.2011–10.03.2011 гг., длительностью по 0.517 года каждый. Указанные в табл. 4 уровни значимости любопытны, однако отличить здесь реальность от случайных совпадений почти невозможно. Заметим, что в случае 18.6-летнего цикла гипотеза его реальности в существенной мере поддерживается его статистически значимыми проявлениями во многих других сейсмоактивных зонах [5].

### ПРОГНОЗ СОТРЯСЕНИЯ ГРУНТА

Частота сотрясений грунта называется сотрясаемостью, или сейсмической опасностью в узком смысле (“seismic hazard”). Обычно рассматривают независимые от времени (стационарные) оценки сотрясаемости, используемые при сейсмическом районировании. Если измерять сотрясения баллами мак-

росейсмической интенсивности  $I$ , то сотрясаемость  $B(I)$  – это годовая повторяемость (частота) сотрясений с баллом  $I \geq I$ . Прогноз землетрясений во времени должен в простейшем случае формулироваться для потребителя как переменная во времени (нестационарная) сотрясаемость. Прогноз землетрясений во времени для пункта А может быть сформулирован как утверждение, что сотрясаемость в пункте А в течение определенного интервала времени в определенное число раз отличается от средней. Прогноз в узком смысле, то есть прогноз опасного периода – это случай, когда прогнозируемая сотрясаемость заметно превышает среднюю.

Долговременная наблюденная сотрясаемость для г. Петропавловска-Камчатского была оценена ранее [11], и равна  $0.07 \text{ год}^{-1}$  для  $I \geq 7$  и  $0.018 \text{ год}^{-1}$  для  $I \geq 8$ . Однако использовать эти оценки напрямую было нежелательно из-за их нечеткой привязки к грунтам. Был выполнен пересмотр оценок исторического каталога, отраженный выше в табл. 1, примечаниях и комментариях к ней. Данные столбца  $I$  (ПК) этой таблицы относятся к средним грунтам г. Петропавловска-Камчатского (СГПК). К этим грунтам в результате и будет относиться выполненный прогноз. Для СГПК, новые оценки  $B(I)$  даны в табл. 3 ( $B(I) = \lambda$ ). Для порога  $I = 7.5$  (что соответствует порогу  $I = 7-8$  в традиционных обозначениях) долговременная  $B(I)$  составляет  $0.028 \text{ год}^{-1}$ . Аналогичные оценки даны для порога  $I = 7$ , а также, для тех же двух порогов – для среднего грунта района пос. Усть-Камчатск (СГУК).

Приводятся также формальные оценки параметров повторяемости цунами в Усть-Камчатске для значений пороговой высоты 5 и 2 м. Эти оценки относительно низки: за 270–280 лет для Усть-Камчатска есть всего одно цунами с заплеском выше 5 м (13.04.1923), причем в XX в., против трех–четырех таких цунами напротив Петропавловска (1737, 1841,



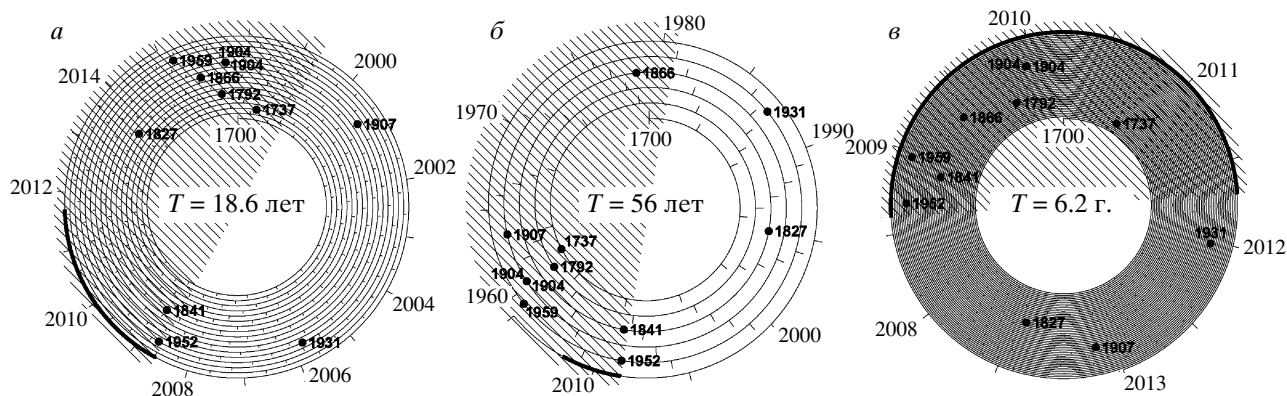


Рис. 3. Спиральные диаграммы для циклов длительностью 18.6 года (а), 56 лет (б) и 6.2 года (в) для землетрясений с интенсивностью 7 и более баллов на средних грунтах г. Петропавловск-Камчатский за 1727–2006 гг. Обозн. см. на рис. 2.

1952, плюс 1848 неуверенно). Сейсмичность относительно однородна вдоль Курило-Камчатской зоны; это позволяет предполагать, что угроза цунами в обоих пунктах, скорее всего, сопоставима. С точки зрения автора, полученные цифры средней повторяемости цунами в Усть-Камчатске занижены относительно реальности, ориентировочно в 2–3 раза, из-за неполноты статистики (см. выше).

На рис. 3 приведены спиральные диаграммы для сотрясений  $I$  (ПК)  $\geq I_{\text{мин}} = 7.5$ . В табл. 5 даны значения уровня значимости по критерию Шустера для различных вариантов подбора данных для СГПК и СГУК. Формально, эти результаты в основном дублируют табл. 2. Однако есть серьезная причина использовать оба подхода параллельно. Для исторического каталога балльность  $I$  это относительно надежный материал, в то время как процедура оценивания магнитуды опирается на ряд трудно проверяемых предположений и ее результаты могут быть спорными. Поэтому анализ цикличности исключительно по данным о балльности в пункте имеет содержательный смысл, показывая независимость вывода о реальности цикличности от допущений, сделанных при оценке магнитуды исторических землетрясений.

По описанной ранее схеме также выполнены оценки прогнозных параметров  $q$ ,  $\lambda_{\text{оп}}$  от  $R$  и  $P$  (табл. 3). При этом для цунами в Усть-Камчатске  $\lambda_{\text{оп}}$ , опирающаяся на оценку  $\lambda$ , скорее всего снова

существенно занижена. Материалы табл. 3 составляют основной практический результат прогнозной части работы.

### ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Степень достоверности сделанного прогноза трудно оценить аккуратно. Хорошо известно, что синхронизация нелинейного осциллятора внешним воздействием может сбиваться. (В нашем случае нелинейный осциллятор – это сеисмогенная зона, а внешнее воздействие – земной и морской прилив переменной амплитуды.) Отметим также широко известный сбой периодичности в случае Паркфилдских землетрясений в США. Можно полагать для ориентировки, что вероятность ошибки – порядка обратной величины числа наблюдаемых циклов. Для случая 56-летнего цикла наблюдалось 5 циклов, поэтому в [5] предложена оценка вероятности ошибки прогноза 20%, эту цифру можно использовать и далее как грубую оценку. Поясним, что ошибкой прогноза в строгом смысле следует считать исчезновение цикличности, либо существенный сдвиг фазы цикла. Для установления этого факта нужно ждать как минимум 56 лет, и этот вопрос обсуждать рано. В менее строгом смысле, ошибкой прогноза следует считать возникновение события в период ожидаемой для него пониженной вероятности. Так и случилось, когда опубликованный в [5] прогноз низкой вероятности на 1992–2007 г. (первый вариант прогноза выполнялся в 1991 г.) оказался нарушен событием 1997 г. Пока неясно, о чем говорит этот факт – о реализации одиночного события в период низкой вероятности таких событий (что предполагается в данной работе) или об исчезновении, или перестройке цикличности.

Что же касается конкретного случая прогноза периода повышенной опасности: август 2008–октябрь 2011 год, то отсутствие событий с  $M \geq 7.6$  в этот период ожидается, согласно табл. 3, с вероятностью  $1 - P = 0.47$ , поэтому такое отсутствие, если оно

Таблица 5. Уровни значимости для гипотезы цикличности при отборе данных по макросейсмической интенсивности в пункте Петропавловск

цикл	Критерий отбора, $n$	
	$I \geq 7/n = 6$	$I \geq 7.5/n = 11$
$T_0$	0.046	0.14
$3T_0$	0.084	0.043
$T_0/3$	0.014	0.21

осуществится, не должно будет считаться ошибкой прогноза. Эта ситуация – проявление общей асимметрии в данной проблеме: прогноз отсутствия редкого события опровергается фактом события, а прогноз возникновения такого события не может быть опровергнут его отсутствием. (Скорее всего, именно поэтому прогнозы отсутствия событий публикуются так редко.)

В [5] была сделана попытка уточнить прогноз по эмпирическим данным, оценив раздельно плотности событий по отдельности в каждом из четырех 3.1-летних опасных интервалов в пределах 56-летнего цикла, а именно 2008.6–2011.7 гг., 2014.8–2017.9 гг., 2027.1–2030.2 гг. и 2033.3–2036.4 гг. Рис. 2б показывает, что при такой логике для Петропавловска наименее опасен третий от настоящего времени интервал, наиболее опасен второй, а на четвертом и первом (ближайшем), плотность близка к средней. По этой причине, а также с учетом того, что уровень надежности подобного уточнения невелик, было принято, что плотности событий во всех четырех типах интервалов одинаковы.

В.А. Широков и Ю.К. Серафимова [14] предложили развитие прогнозной методики Широкова [12, 13, 15] с совместным учетом 18.6-летнего лунного цикла и солнечного “магнитного” 22-летнего цикла, в виде комбинации опасных фаз каждого из двух названных циклов. При этом для солнечного цикла использовали фактические даты наступления фаз высокой и низкой солнечной активности и не исходили из идеализированной строгой периодичности. С учетом предполагаемой солнечной цикличности [14] сделан вывод, что опасность землетрясений в период 2008.6–2011.7 гг. относительно невысока, а очередной период существенного повышения вероятности – это 2014.8–2017.9 гг. Достоверность этого вывода может быть, однако, поставлена под сомнение. Вообще, степень статистической обоснованности выводов [14] уязвима. Это, однако, не может быть поводом для серьезной критики, так как при малом объеме выборок принятие решения о том, что конкретная особенность данных является свойством Природы, а не случайным совпадением, неизбежно несет элемент субъективности. Проблема в другом. Из 14 анализируемых [14] событий, два события 1923 г. не укладываются в предлагаемую там относительно простую закономерность. Если же брать только события с  $M \geq 8.0$ , то не укладывается одно событие из семи. Для объяснения этого отклонения от простой цикличности предлагается особая дополнительная модель. Использование двух дополняющих друг друга моделей для интерпретации набора данных столь малого объема, на взгляд автора, существенно снижает убедительность полученных результатов. Любопытно, что для обоих упомянутых в [14] вариантов оценки точного “магнитного” солнечного периода –  $T^{(C)} = 21.8$  года и  $T^{(C)} = 21.25$  года, период  $2T^{(C)}$  дает для “сектора ЛПУ” значимую по критерию Шустера цикличность без исключений

(табл. 4). Согласно такому циклу длиной 42.5–43.6 года, период 2008.6–2011.7 гг. следует скорее относить к числу опасных, хотя и нет большой уверенности в надежности экстраполяции данной эмпирической тенденции.

Принципиально новым результатом данной работы является прогноз сотрясений в терминах балла макросейсмической интенсивности на среднем грунте в определенном пункте – г. Петропавловске-Камчатском. Этот род прогноза является дополнительным к более обычной формулировке прогноза на языке магнитуд и эпицентров, и наиболее приемлем для восприятия конечным пользователем (жители и лица, принимающие решения).

Подтверждено, что все три отмеченные ранее цикличности статистически значимы, включая 56-летний цикл, однократно нарушенный событием 1997 г. К сожалению, вся работа выполнена на чисто эмпирической основе, никаких указаний на механизм лунной цикличности не выявлено.

Автор благодарит В.А. Широкова и В.А. Салтыкова за полезные замечания.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранников Л.Б., Борисова К.С, Еришов И.А. и др. Макросейсмическое обследование последствий землетрясения 24(25) ноября 1971 г. на территории г. Петропавловска-Камчатского // Сильные камчатские землетрясения 1971 г. / Под ред. С.А. Федотова, Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1975. С. 15–62.
2. Гусев А.А. О сейсмологической основе норм сейсмостойкого строительства в России // Физика Земли. 2002. № 12. С. 35–44.
3. Гусев А.А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность, сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке / Под ред. Федотова С.А. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109–119.
4. Гусев А.А. Сильные землетрясения Камчатки: расположение очагов в инструментальный период // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 39–42.
5. Гусев А.А., Петухин А.Г. О возможной синхронизации сильных землетрясений 18.6-летним лунным циклом, его долями и кратными // Вулканология и сейсмология. 1997. № 3. С. 64–79.
6. Гусев А.А., Шумилина Л.С. Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. 2004. № 3. С. 34–42.
7. Кириллов Ф.А. Каталог землетрясений Курило-Камчатской зоны. М: Фонды ИФЗ АН СССР, 1962. 171 с.
8. Мельхиор П. Земные приливы. М: Мир, 1968. 482 с.
9. Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука, 1977. 535 с.
10. Федотов С.А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 121–150.

11. Федотов С.А., Шумилина Л.С., Зобин В.М. и др. Камчатка и Командорские о-ва // Сейсмическое районирование территории СССР. Гл. 31. М.: Наука, 1980. С. 269–283
12. Федотов С.А., Соболев Г.А., Болдырев С.А. и др. Долгосрочный и пробный краткосрочный прогноз камчатских землетрясений // Поиски предвестников землетрясений. Ташкент: ФАН, 1976. С. 49–61.
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. Широков В.А., Серафимова Ю.К. О связи 19-летнего лунного и 22-летнего солнечного циклов с сильными землетрясениями и долгосрочный сейсмический прогноз для северо-западной части Тихоокеанского пояса // Вестник КРАУНЦ, Сер. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. 8. С. 120–133.
15. 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.

## On the Real Existence of the 56–Year Cycle and Increased Probability of Large Earthquakes for Petropavlovsk–Kamchatskii during 2008–2011 according to the Lunar Cyclicity

A.A. Gusev

*Institute of Volcanology and Seismology, Far East Division, Russian Academy of Sciences,  
Petropavlovsk-Kamchatskii, 683006, Russia*

A 56-year cyclicity in the occurrence of large Kamchatka earthquakes has been detected previously. This is another manifestation of the tendency for the timing of large Kamchatka earthquakes to be synchronized by the cycles related to the period  $T_0$  of rotation of the line of nodes found by V.A. Shirokov in 1974. He identified the cycles of 18.6 years =  $T_0$  and 6.2 years =  $T_0/3$ , while the period of the 56-year cycle is  $3T_0$ . The reality of that phenomenon had to be revised in connection with the occurrence of a large ( $M_w = 7.8$ ) earthquake in Kamchatka at the end of 1997, in violation of the 56-year cyclicity. It has turned out that, even though the 56-year cycle has become less distinct after the 1997 event, the cyclicity itself has remained statistically significant. A by-product is an updated forecast of earthquake hazard for Kamchatka. The update has been necessary in connection with the approaching hazardous period of 2008–2011. It is found that, assuming the validity of these empirical tendencies, the expected rate of large earthquakes off Kamchatka for the period of August 2008 to October 2011 will be four times as high as the long-term mean value. We derive the first-ever estimate of future hazard in terms of felt intensity for specified soil conditions (the so-called average soil) at a specified site (the town of Petropavlovsk-Kamchatskii). For these soil conditions, the estimated probability of at least one shock of intensity VII or greater during the period specified above is equal to  $0.39 \pm 0.15$ . The expected rate of single events or sets of events with magnitude  $M_w 7.6$  in Kamchatka during this period is  $0.76 \pm 0.25$ .