

УДК 550.343.6

О СВЯЗИ СИЛЬНЫХ ($M_w \geq 7.5$) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ С ВАРИАЦИЯМИ ЧИСЕЛ ВОЛЬФА

© 2005 Ю. К. Серафимова

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, бульвар Пийна, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006
Адрес для переписки: 683006, Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийна, 9, КФ ГС РАН;
тел. (415-22)-5-73-21; факс (415-22)-5-73-21; e-mail: yulka@emsd.iks.ru*

Проводится исследование связи возникновения сильных ($M_w \geq 7.5$) землетрясений Камчатки с вариациями чисел Вольфа. Оценка этой связи проводится для четырех выделенных фаз в 11-летнем солнечном цикле. Выявлено, что связь существует и наиболее значимо проявляется для фаз, соответствующих максимуму и минимуму цикла солнечной активности. Ретроспективный анализ эффективности прогноза землетрясений по фазам цикла солнечной активности показывает, что наличие фаз, соответствующих максимуму и минимуму цикла солнечной активности, может служить качественным дополнительным критерием при среднесрочном прогнозировании сильных камчатских землетрясений в реальном времени.

Среди всех видов природных катастроф землетрясения занимают одно из первых мест по своим разрушительным последствиям, количеству жертв и материальному ущербу. Предотвратить землетрясения невозможно, но изучение процессов, связанных с их подготовкой, и разработка методов прогноза может значительно уменьшить их разрушительные последствия.

Камчатка является одним из наиболее сейсмоопасных регионов России, поэтому разработка методов прогнозирования сильных камчатских землетрясений на основе поиска дополнительных прогностических критериев, которые могли бы использоваться в комплексе с уже имеющимися методами, является актуальной научной задачей и представляет практический интерес.

Для сейсмичности Камчатки характерна группированность сильных землетрясений на временных интервалах продолжительностью в первые годы (Сильные..., 1975). В качестве одной из возможных причин такой группированности рассматривается воздействие космических факторов, в частности, солнечной активности, которая обычно характеризуется числами Вольфа (W).

Вопрос о связи сейсмичности Земли и отдельных регионов с 11-летним циклом солнечной активности (СА) рассматривался многими авторами.

В работах (Сытинский, 1982, 1989) не только показана, но и статистически подтверждена зависимость общей сейсмичности Земли и отдельных

ее регионов от фазы цикла солнечной активности. В частности, А.Д. Сытинский показал, что наиболее высокая сейсмичность Курило-Камчатской зоны наблюдается в эпохи максимума и минимума в 11-летнем солнечном цикле.

По данным (Бузевич, Смирнов, 2000; Бузевич, 2004) для Камчатского региона пик сейсмичности наступает непосредственно после достижения максимума солнечной активности, на первый и третий годы.

Не противоречащие результаты получены и в других работах (Барляева, Морозова и др., 2000; Шестопапов, Харин, 2004).

Анализ вышеперечисленных работ позволяет сделать следующие выводы: 1) связь между сейсмичностью Земли и фазами 11-летнего цикла солнечной активности существует и статистически значима; 2) сейсмическая активность в отдельных регионах мира также связана с фазами цикла солнечной активности; 3) наиболее высокий уровень сейсмической активности для Земли в целом и для отдельных регионов приходится на фазы максимума и минимума 11-летнего цикла солнечной активности.

По мнению А.Д. Сытинского (1982), зависимость сейсмичности Земли от фазы 11-летнего цикла солнечной активности имеет прогностическое значение. На основании этой зависимости предполагается решение не только задач долгосрочного прогноза уровня сейсмичности всей

Земли, но и разработка прогнозных оценок в отдельных регионах.

Данная работа посвящена изучению связи возникновения сильных и сильнейших камчатских землетрясений с фазами цикла солнечной активности и оценке возможности использования этой связи для их среднесрочного прогнозирования в реальном времени. С этой целью проводится ретроспективный анализ эффективности прогностического метода, в котором в качестве прогностического признака рассматривается наличие определенной фазы цикла солнечной активности.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1. Каталог сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд с 1737 г., впервые опубликованный в работе (Гусев, Шумилина, 2004). Рассматривались землетрясения с магнитудой $M_w \geq 7.5$. Их количество составляет 29 событий, из которых девять событий имеют магнитуду $M_w \geq 8.0$. Каталог рассматриваемых землетрясений представлен в табл. 1.

2. В качестве меры солнечной активности использовались среднемесячные и среднегодовые значения чисел Вольфа (W).

Число Вольфа W – это один из распространенных показателей солнечной активности, который определяется по формуле:

$$W = k(10g + f), \quad (1)$$

где g – число групп пятен на диске Солнца в день наблюдения; f – число отдельных пятен; k – коэффициент, характеризующий наблюдательный прибор. Обычно $k \gg 1$.

Нами использовались среднемесячные и среднегодовые значения чисел Вольфа по данным Королевской обсерватории Бельгии [<http://sidc.oma.be/html/sunspot.html>], сведения о которых имеются с января 1749 г. и с 1733 г. соответственно. Рассматривались 25 полных циклов солнечной активности. При этом для двадцати трех циклов (с 1749 г.) использовались среднемесячные значения чисел Вольфа, а для двух циклов (с 1734 г.) использовались их среднегодовые значения.

Таблица 1. Каталог землетрясений Камчатки за период 1737-2005 гг., $M_w \geq 7.5$ (Гусев, Шумилина, 2004)

№ п/п	Дата ггггммдд	Время чч:мм:сс	Координаты		Глубина, км	Магнитуда, M_w
			λ , °N	φ , °E		
1	17371017	15:30:00	50.50	158.00	40	9.2
2	17371104	08:00:00	55.50	163.00	20	7.8
3	17371217	00:00:00	50.00	157.00	50	8.0
4	17421118	00:00:00	50.50	157.00	40	7.5
5	17901202	01:00:00	54.00	162.00	20	7.5
6	17910415	07:00:00	56.00	163.00	20	7.5
7	17920822	18:00:00	54.00	162.00	20	8.8
8	18410517	21:00:00	52.50	159.50	30	9.0
9	18480601	00:00:00	52.50	159.50	0	7.5
10	18491028	09:00:00	55.00	166.00	20	7.5
11	18540627	00:00:00	51.00	158.00	40	7.5
12	18580122	00:00:00	55.00	166.00	20	7.5
13	18991123	09:40:00	53.00	159.00	20	7.6
14	19050915	06:02:46	53.00	164.00	30	7.5
15	19150731	01:31:23	53.50	163.30	20	7.8
16	19170130	02:45:30	55.20	164.50	20	8.0
17	19230203	16:01:46	53.00	161.00	20	8.5
18	19230224	07:34:30	55.00	162.40	20	7.5
19	19230413	15:30:57	55.40	162.80	20	8.2
20	19271228	18:20:15	53.80	161.40	20	7.5
21	19290113	00:00:00	50.60	154.70	135	7.7
22	19360630	15:06:40	55.00	165.00	20	7.6
23	19521104	16:58:22	52.30	161.00	20	9.0
24	19590504	07:15:40	53.10	160.30	20	8.0
25	19691122	23:09:00	57.80	163.60	20	7.7
26	19711124	19:35:30	52.67	159.50	125	7.5
27	19711215	08:29:55	55.91	163.37	30	7.8
28	19930608	13:03:37	51.25	157.77	54	7.5
29	19971205	11:26:51	54.88	161.95	33	7.9

Примечание. Жирным шрифтом выделены землетрясения с $M_w \geq 8.0$.

3. Данные о датах минимумов и максимумов отдельных циклов СА [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR_DATA/SUNSPOT_NUMBERS/]. Эти сведения необходимы для определения длительности циклов солнечной активности, а также для определения продолжительности их стадий роста и спада. Солнечная активность имеет циклические вариации со средним периодом 11.1 года. Продолжительности отдельных циклов СА варьируют от 8.2 до 15 лет.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для каждого цикла солнечной активности двумя способами выделялись четыре фазы (рис. 1).

При первом способе (рис. 1 а) деление проводилось по стадиям роста и спада циклов СА с определением середин каждой стадии. Даты

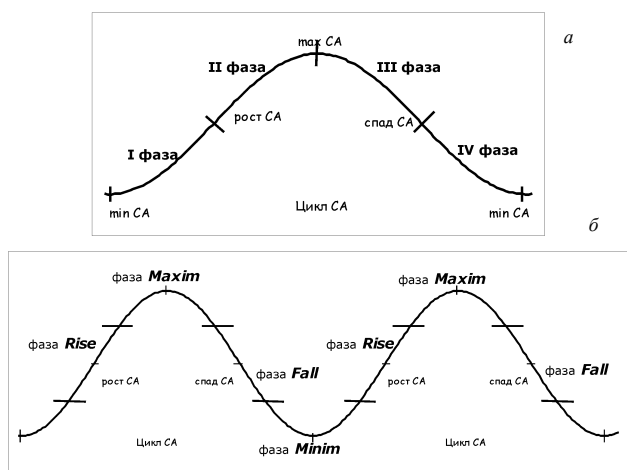


Рис. 1. Схема выделения четырех фаз в циклах солнечной активности: а - строго от максимума до минимума с определением середины стадий роста и спада – фазы I - IV; б - с выделением фазы роста “Rise”, фазы максимума “Maxim” и фазы спада “Fall” в циклах солнечной активности, а также фазы минимума “Minim” в двух соседних циклах.

середин стадий роста и спада определялись путем вычитания из даты максимума даты минимума с точностью до месяца и делением полученного интервала времени пополам. Выделены четыре фазы цикла – фаза I, фаза II, фаза III и фаза IV.

При втором способе (рис. 1 б) определялись фазы максимума “Maxim”, роста “Rise” и спада “Fall” циклов СА, а также фаза минимума “Minim”, включающая в себя части двух соседних циклов. Даты границ фаз определялись делением стадий роста и спада на четыре отрезка. Фазы складываются из двух соседних интервалов времени. Таким образом, фаза минимума “Minim” складывается из последней четверти стадии спада предыдущего цикла и первой четверти стадии роста последующего цикла СА. Фаза роста “Rise” включает вторую

и третью четверти стадии роста, а фаза спада “Fall” - вторую и третью четверти стадии спада. Фаза максимума “Maxim” складывается из последней четверти стадии роста и первой четверти стадии спада.

Ряд среднемесячных значений чисел Вольфа сопоставлялся с моментами сильных и сильнейших камчатских землетрясений для определения числа событий, попадающих в каждую фазу цикла солнечной активности (рис. 2). Такое сопоставление позволило: 1) определить статистическую связь между возникновением землетрясений и выделенными фазами цикла солнечной активности и 2) оценить ретроспективную эффективность прогнозирования землетрясений в конкретные фазы цикла СА.

Определение связи между возникновением землетрясения и фазами цикла, а также оценка эффективности прогнозирования проводились по методике А.А. Гусева (1974).

За меру эффективности прогноза принималось следующее отношение:

$$J = \frac{P(\text{землетрясение} / \text{прогноз})}{P_{\text{безусл}}(\text{землетрясение})}, \quad (2)$$

где $P(\text{землетрясение}/\text{прогноз})$ - вероятность возникновения землетрясений в прогнозируемые интервалы времени. В нашем случае такие интервалы времени соответствуют конкретным фазам цикла СА, $P_{\text{безусл}}(\text{землетрясение})$ - средняя вероятность возникновения землетрясений.

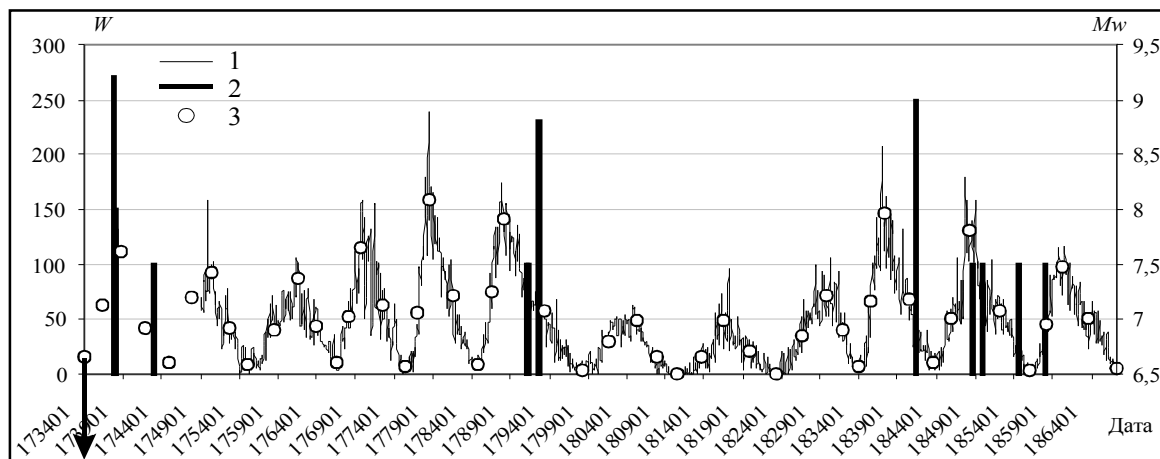
Как указывалось выше, фазы отдельных циклов имеют разную продолжительность по времени. Кроме этого, фазы, соответствующие стадии спада, в основном длиннее фаз, соответствующих стадии роста (табл. 2). Поэтому формула (2) несколько видоизменяется за счет введения параметра, характеризующего продолжительность фаз:

$$J = \frac{N_{\phi}}{N_{\text{общ}} \cdot \frac{t}{T}}, \quad (3)$$

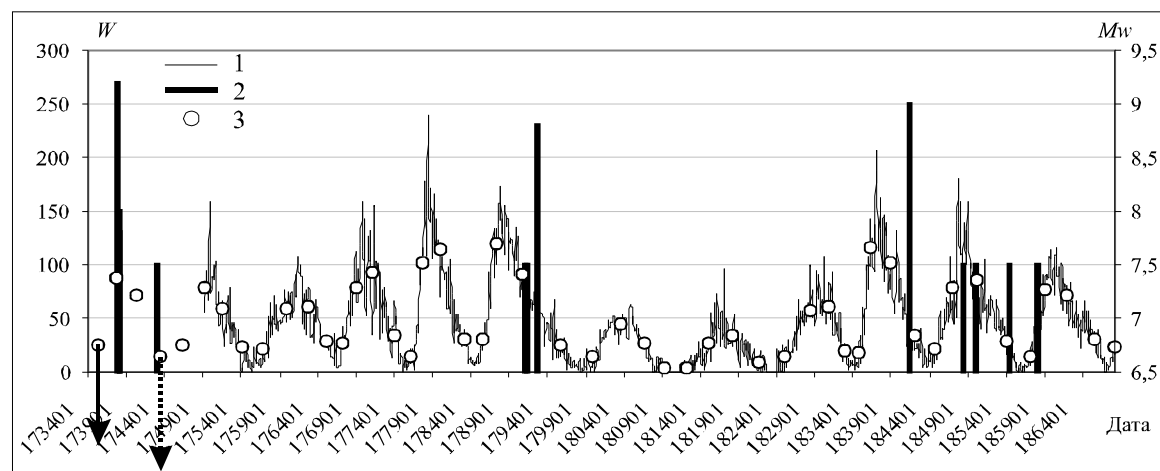
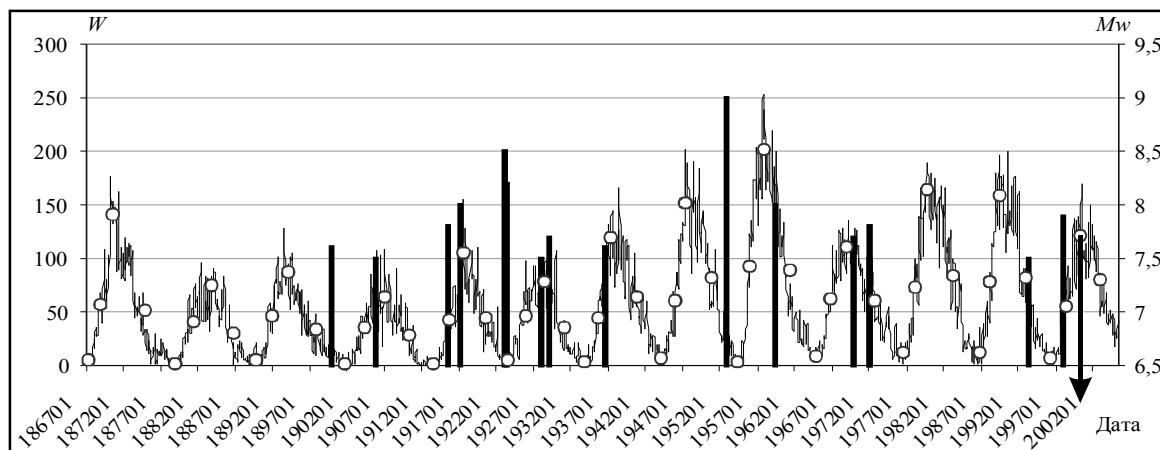
где N_{ϕ} - количество землетрясений, произошедших в рассматриваемой фазе; $N_{\text{общ}}$ - общее количество землетрясений; t - суммарная длительность конкретной фазы цикла СА; T - суммарная

Рис. 2. Сопоставление вариаций чисел Вольфа (W) и моментов сильных землетрясений Камчатки ($M_w \geq 7.5$): а - при первом способе деления циклов СА на фазы; б - при втором способе деления циклов СА на фазы. 1 - среднемесячные значения чисел Вольфа; 2 - моменты землетрясений Камчатки с $M_w \geq 7.5$; 3 - границы фаз. Пунктирными стрелками показаны границы временного интервала T , использованного при оценке эффективности для фаз “Minim”. Черными стрелками показаны границы временного интервала T для всех остальных фаз.

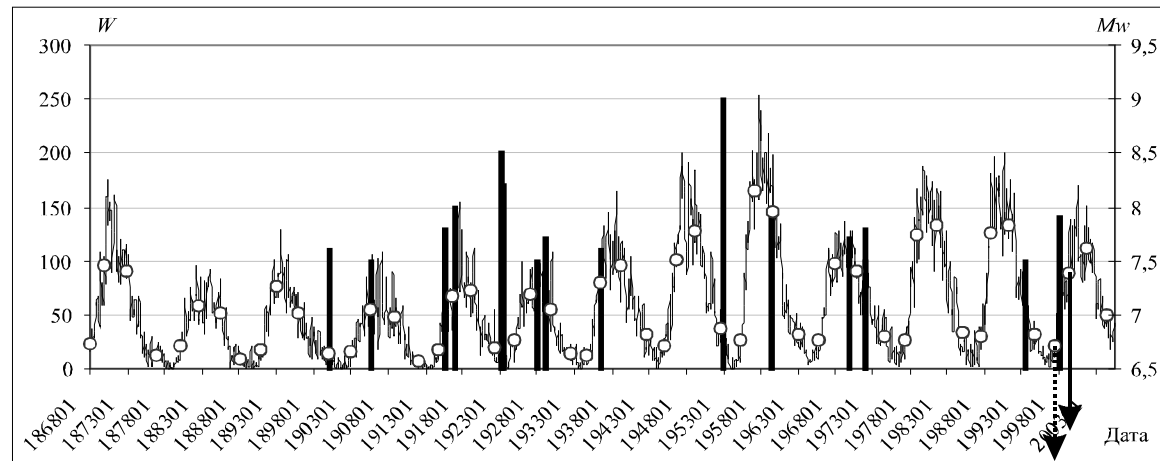
О СВЯЗИ СИЛЬНЫХ ($M_w \geq 7.5$) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ С ВАРИАЦИЯМИ ЧИСЕЛ ВОЛЬФА



а



б



длительность всех циклов солнечной активности. При определении t и T неполные фазы не учитывались в определении суммарной продолжительности.

В формуле (3) знаменатель дроби отражает среднее число землетрясений за время t в случае отсутствия связи между возникновением землетрясений и фазой цикла солнечной активности. Соответственно, эффективность J показывает, во сколько раз количество произошедших в фазе землетрясений превышает их число, попавшее в эту фазу случайным образом. При случайном совпадении землетрясений и фаз СА $J \leq 1$. Отсюда значения $J \leq 1$ указывают на отсутствие статистической связи между возникновением землетрясения и фазой цикла солнечной активности. При значениях $J > 1$ можно говорить о наличии связи между возникновением землетрясений и фазой цикла.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты ретроспективной оценки эффективности прогнозирования представлены в табл. 2. При первом способе деления циклов СА на фазы, величина J превышает единицу для фазы II для землетрясений с $M_w \geq 7.5$ и для фаз II и IV для землетрясений $M_w \geq 8.0$. Фаза II соотносится с максимумом, а фаза IV – с минимумом цикла солнечной активности.

При втором способе деления цикла солнечной активности, величина J превышает единицу для фаз “Maxim” для землетрясений $M_w \geq 7.5$ и для

фаз “Minim” и “Maxim” для землетрясений $M_w \geq 8.0$. Фазы соотносятся с максимумом и минимумом СА согласно названиям (рис. 3).

Второй способ деления цикла солнечной активности на фазы представляется более удачным, так как значения J для фаз, соответствующих максимумам и минимумам циклов, несколько выше, чем при первом способе деления. Это же показывает и распределение землетрясений в фазах (рис. 3).

Следует отметить, что землетрясения происходили не во всех 11-летних циклах солнечной активности, а только в четырнадцати из рассматриваемых двадцати пяти циклов. Это может быть обусловлено как неоднородностью каталога, особенно в период до 1900 г., так и влиянием других периодичностей в солнечной активности (например, 22 и 80-90 - летний периоды). Но оценка связи возникновения землетрясений с другими периодичностями выходит за рамки данной работы.

Очевидно и то, что только максимальное увеличение или минимальное уменьшение солнечной активности не является единственным триггерным фактором возникновения землетрясений. Вероятнее всего, статистическая связь между фазами СА и землетрясениями обусловлена комплексом факторов. Такими факторами могут быть, например, вспышки на Солнце, изменение параметров солнечного ветра и других, интенсивность которых изменяется в фазы максимума и минимума (Сытинский, 1989; Кузьмин, Широков, 1990). Кроме этого, триггерным механизмом может служить наложение фаз с повышенной веро-

Таблица 2. Характеристика выделенных фаз солнечной активности и результаты ретроспективной оценки эффективности прогнозирования землетрясений с $M_w \geq 7.5$ и с $M_w \geq 8.0$

Фазы цикла СА	Средняя продолжительность фазы, мес.	Стандартное отклонение, мес.	Максимальная продолжительность фазы, мес.	Минимальная продолжительность фазы, мес.	Суммарная продолжительность фазы, мес.	$M_w \geq 7.5$		$M_w \geq 8.0$	
						Всего землетрясений в фазе, шт.	Эффективность прогнозирования, J	Всего землетрясений в фазе, шт.	Эффективность прогнозирования, J
Фаза I	26.4	6.9	42	17	660	3	0.5	-	-
Фаза II	25.8	6.9	41	17	644	7	1.2	3	1.7
Фаза III	39.7	7.6	61	24	953	10	1.1	2	0.7
Фаза IV	39.1	7.6	61	24	938	9	1.1	4	1.5
Minim	32.5	5.6	50	22	782	5	0.8	3	1.7
Rise	26.2	7.0	43	17	655	5	0.8	-	-
Maxim	32.7	3.7	41	27	786	10	1.4	4	1.8
Fall	39.4	7.7	61	24	947	9	1.0	2	0.7

Примечание. Жирным шрифтом выделены фазы, для которых значения J превышают 1.

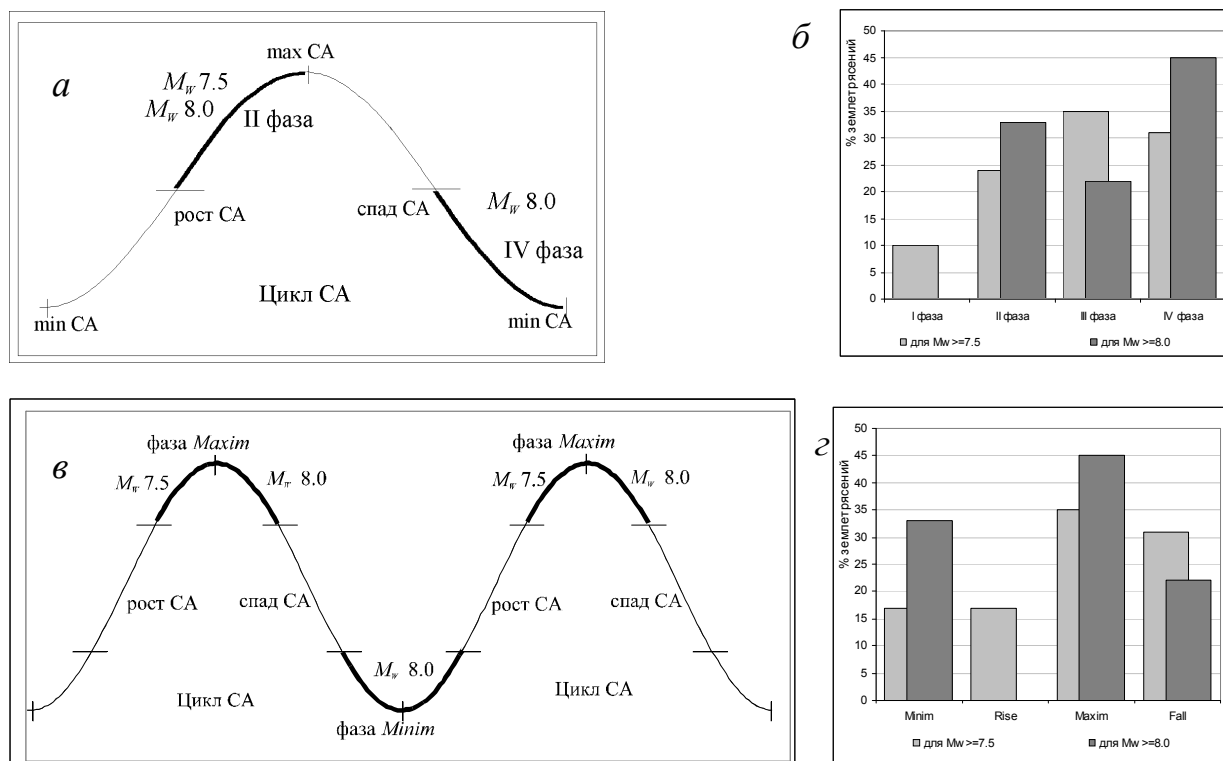


Рис. 3. Характеристика связи фаз циклов солнечной активности с сильными ($M_w \geq 7.5$) и сильнейшими ($M_w \geq 8.0$) камчатскими землетрясениями: а-б – при первом способе выделения фаз СА, в-г – при втором способе выделения фаз СА. На диаграммах а и в жирными линиями показаны фазы, для которых $J > 1$ (табл. 2). На диаграммах б и г показано распределение землетрясений с $M_w \geq 7.5$ и с $M_w \geq 8.0$ по выделенным фазам в % по отношению к общему числу.

ятностью сильных землетрясений, выявленных в других природных процессах, например в 18.6-летнем лунном цикле (Широков, 1977).

Числа Вольфа являются качественными характеристиками СА, полученными по данным наблюдений за пятнами на Солнце. При их определении не учитываются конкретные физические процессы, происходящие на Солнце. В связи с этим, установленная связь между возникновением землетрясений и фазами 11-летнего солнечного цикла может служить качественным прогностическим критерием, использовать который можно только в комплексе с другими методами прогноза.

ВЫВОДЫ

1. Связь между выделенными фазами цикла солнечной активности и возникновением сильных ($M_w \geq 7.5$) землетрясений Камчатки существует. Наиболее значимо она проявляется для фаз, соответствующих максимуму и минимуму 11-летнего цикла солнечной активности.

2. Ретроспективный анализ эффективности прогноза камчатских землетрясений с $M_w \geq 7.5$ и с

$M_w \geq 8.0$, по четырем фазам цикла солнечной активности, показал невысокую статистическую значимость такого прогностического метода. Величины эффективности прогнозирования для фаз минимума и максимума СА составляют 1.2 - 1.8.

3. Установленная связь между возникновением землетрясений и выделенными фазами цикла солнечной активности может служить качественным дополнительным критерием при среднесрочном прогнозировании сильных ($M_w \geq 7.5$) камчатских землетрясений в реальном времени.

Список литературы

- Барляева Т.В., Морозова А.Л., Пудовкин М.И. Влияние космических факторов на развитие землетрясений // Геофизические методы исследования Земли и недр. Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов "Геофизика99", Санкт-Петербург, 9-12 ноября 1999 г. Москва, 2000. С. 8-19.
- Бузевич А.В. Солнечная активность и сейсмичность на Камчатке // Сборник докладов III международной конференции "Солнечноземные связи и электромагнитные предвестники землетря-

сений”, с. Паратунка, 16-21 августа, 2004 г. [http://www.kcs.iks.ru/ikir/Russian/Science/Science_2004_book.htm].

Бузевич А.В., Смирнов С.Э. Метод прогноза камчатских землетрясений по вариациям геомагнитного и атмосферного электрического полей Земли на фоне гелиомагнитосферных процессов // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений. I Российско-Японский семинар, Хабаровск, 26-29 сентября 2000 г. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001, С. 179-186.

Гусев А.А. Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности // Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке. Новосибирск: Наука, 1974. С. 109-119.

Гусев А.А., Шумилина Л.С. Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. 2004. № 3. С. 34-42.

Кузьмин Ю.Д., Широков В.А. О влиянии космических факторов на сейсмичность и вулканизм Камчатки // Вопросы географии Камчатки. 1990. Вып. 10. С. 90-98.

Сильные камчатские землетрясения 1971 года / Под. ред. С.А. Федотова. Владивосток, 1975. 152 с.

Сытинский А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью // Физика Земли. 1989. № 2. С. 13-30.

Сытинский А.Д. О зависимости глобальной и региональной сейсмичности Земли от фазы 11-летнего цикла солнечной активности // Докл. АН СССР. 1982. Т. 265. № 6. С.1350-1353.

Шестопалов И.П., Харин Е.П. О связи сейсмичности Земли с солнечной и геомагнитной активностью // Сборник докладов III международной конференции “Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений”, с. Паратунка, 16-21 августа, 2004 г. [http://www.kcs.iks.ru/ikir/Russian/Science/Science_2004_book.htm].

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.

ON RELATION BETWEEN POWERFUL EARTHQUAKES ($M_w \geq 7.5$) AND SUNSPOT NUMBER VARIATIONS

Yu. K. Serafimova

*Kamchatkan Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences
683006, Petropavlovsk-Kamchatsky, Piip Avenue 9, Russia*

A research is conducted of interrelation between powerful earthquakes ($M_w \geq 7.5$) taken place in Kamchatka with sunspot number variations. An evaluation of this relation is made for four phases designated in 11-year sun's activity cycle. It has been revealed that such a relation exists and is mostly evident for phases corresponding to maximum and minimum of sun's activity cycle. A retrospective analysis of earthquake forecast efficiency on phases of sun's activity cycle shows that presence of phases corresponding to maximum and minimum of sun's activity cycle can serve as qualitative additional criteria at a real-time middle-term forecasting of powerful Kamchatkan earthquakes.