

О СВЯЗИ СИЛЬНЫХ ($M_W \geq 7.5$) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КАМЧАТКИ С СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТЬЮ

Серафимова Ю.К.

Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский,

yulka@emsd.iks.ru

Введение

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 группируемость сильных землетрясений на временных интервалах продолжительностью в первые годы [8]. В качестве одной из возможных причин такой группируемости 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 [9, 10] не только показана, но и статистически подтверждена зависимость общей сейсмичности Земли и отдельных ее регионов от фазы цикла СА. В частности, показано, что наиболее высокая сейсмичность Курило-Камчатской зоны наблюдается в эпохи максимума и минимума в 11-летнем солнечном цикле.

По данным [2, 3] 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 [1, 11].

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

По мнению А.Д. Сытинского [9] зависимость сейсмичности Земли от фазы 11-летнего цикла СА имеет прогностическое значение. На основании этой зависимости предполагается решение не только задач долгосрочного прогноза уровня сейсмичности на всей Земле, но и разработка среднесрочных прогнозных оценок в отдельных регионах.

Данная работа посвящена изучению связи возникновения сильных и сильнейших камчатских землетрясений с фазами цикла СА 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 прогнозного признака рассматривается наличие определенной фазы цикла СА.

Исходные данные

1. Каталог сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд с 1737 г., впервые опубликованный в работе [6] с учетом исправлений и дополнений по [5]. Рассматриваются землетрясения с магнитудой $M_W \geq 7.5$. Их количество составляет 31 событие, из которых девять имеют магнитуду $M_W \geq 8.0$. Каталог рассматриваемых землетрясений представлен в табл. 1.

Таблица 1. Каталог землетрясений Камчатки за период 1737-2005 гг., $M_W \geq 7.5$ [6, 5]

№ 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	19040625	21:00:00	52.00	159.00	30	7.5
15	19050915	06:02:46	53.00	164.00	30	7.5
16	19110504	00:00:00	51.80	156.00	140	7.5
17	19150731	01:31:23	53.50	163.30	20	7.8
18	19170130	02:45:30	55.20	164.50	20	8.0
19	19230203	16:01:46	53.00	161.00	20	8.5
20	19230224	07:34:30	55.00	162.40	20	7.6
21	19230413	15:30:57	55.40	162.80	20	7.4-8.2
22	19271228	18:20:15	53.80	161.40	20	7.5
23	19290113	00:00:00	50.60	154.70	135	7.7
24	19360630	15:06:40	55.00	165.00	20	7.6
25	19521104	16:58:22	52.30	161.00	20	9.0
26	19590504	07:15:40	53.10	160.30	20	8.0
27	19691122	23:09:00	57.80	163.60	20	7.7
28	19711124	19:35:30	52.67	159.50	125	7.5
29	19711215	08:29:55	55.91	163.37	30	7.8
30	19930608	13:03:37	51.25	157.77	54	7.5
31	19971205	11:26:51	54.88	161.95	33	7.9

Примечание: жирным шрифтом выделены землетрясения с $M_W \geq 8.0$.

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

Число Вольфа W – 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 $k \approx 1$.

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 СА. 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.

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 СА, 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 СА двумя способами выделялись четыре фазы (рис. 1).

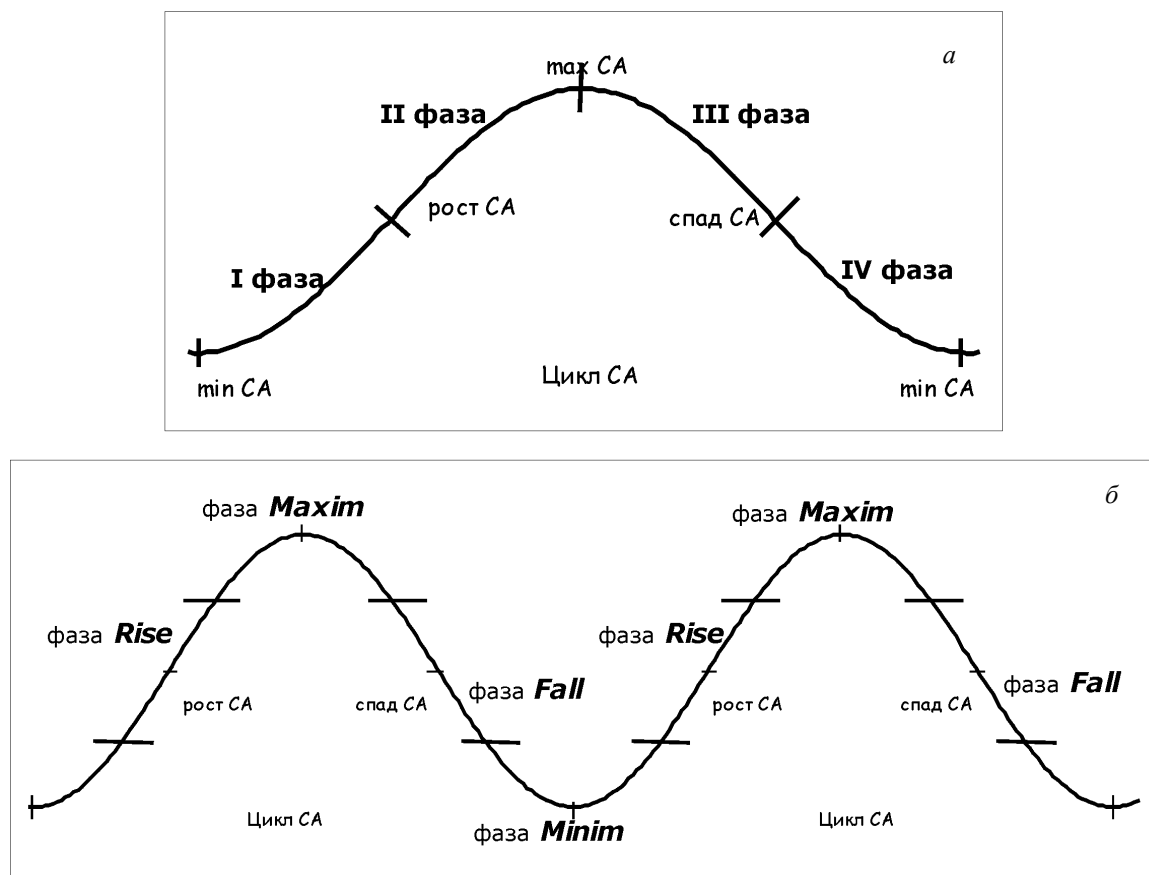


Рис. 1. Схема выделения четырех фаз в циклах солнечной активности: *а* - строго от максимума до минимума с определением середины стадий роста и спада – фазы I - IV; *б* - с выделением фазы роста "Rise", фазы максимума "Maxim" и фазы спада "Fall" в циклах солнечной активности, а также фазы минимума "Minim"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

При первом способе (рис. 1 *а*) деление проводилось по стадиям роста и спада циклов СА с определением середин каждой стадии. Даты 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 СА (рис. 2). Такое сопоставление позволило, во-первых, определить статистическую связь между возникновением землетрясений и выделенными фазами цикла солнечной активности

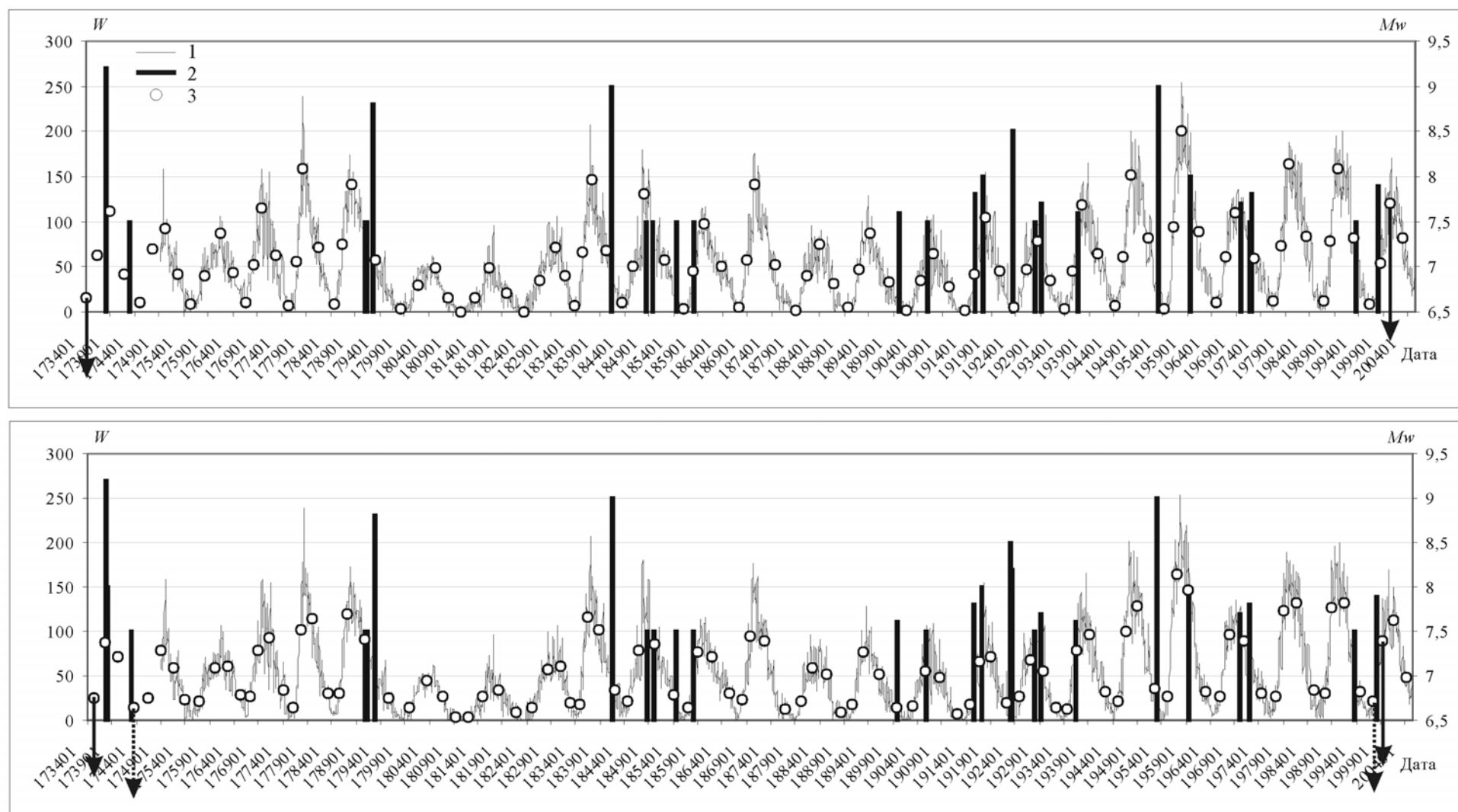


Рис. 2. Сопоставление вариаций чисел Вольфа (W) и моментов сильных землетрясений Камчатки ($M_w \geq 7.5$): а - при первом способе деления циклов СА на фазы; б - при втором способе деления циклов СА на фазы. 1 – среднемесячные значения чисел Вольфа; 2 – моменты землетрясений Камчатки с $M_w \geq 7.5$; 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.

и, во-вторых, оценить ретроспективную эффективность прогнозирования землетрясений в конкретные фазы цикла СА.

Определение связи между возникновением землетрясения и фазами цикла, а также оценка эффективности прогнозирования проводилось по методике А.А. Гусева [4].

За меру эффективности прогноза принималось следующее отношение:

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

где $P(\text{землетрясение} / \text{прогноз})$ - вероятность возникновения землетрясений в прогнозируемые интервалы времени. В нашем случае такие интервалы времени соответствуют конкретным фазам цикла СА, $P_{\text{безул}}(\text{землетрясение})$ - 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 (см. 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 длительность всех циклов СА. 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 СА. 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 СА. 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, величины J превышают 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 пятнадцати 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

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.	Вероятность попадания землетрясений в фазу	Эффективность прогнозирования J	Всего землетрясений в фазе, шт.	Вероятность попадания землетрясений в фазу	Эффективность прогнозирования J
фаза I	26.4	6.9	42	17	660	3	0.1	0.5	-	-	-
фаза II	25.8	6.9	41	17	644	8	0.26	1.3	3	0.33	1.7
фаза III	39.7	7.6	61	24	953	10	0.32	1.1	2	0.23	0.7
фаза IV	39.1	7.6	61	24	938	10	0.32	1.1	4	0.44	1.5
Minim	32.5	5.6	50	22	782	5	0.16	0.7	3	0.33	1.7
Rise	26.2	7.0	43	17	655	6	0.2	0.9	-	-	-
Maxim	32.7	3.7	41	27	786	10	0.32	1.3	4	0.44	1.8
Fall	39.4	7.7	61	24	947	10	0.32	1.1	2	0.23	0.7

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

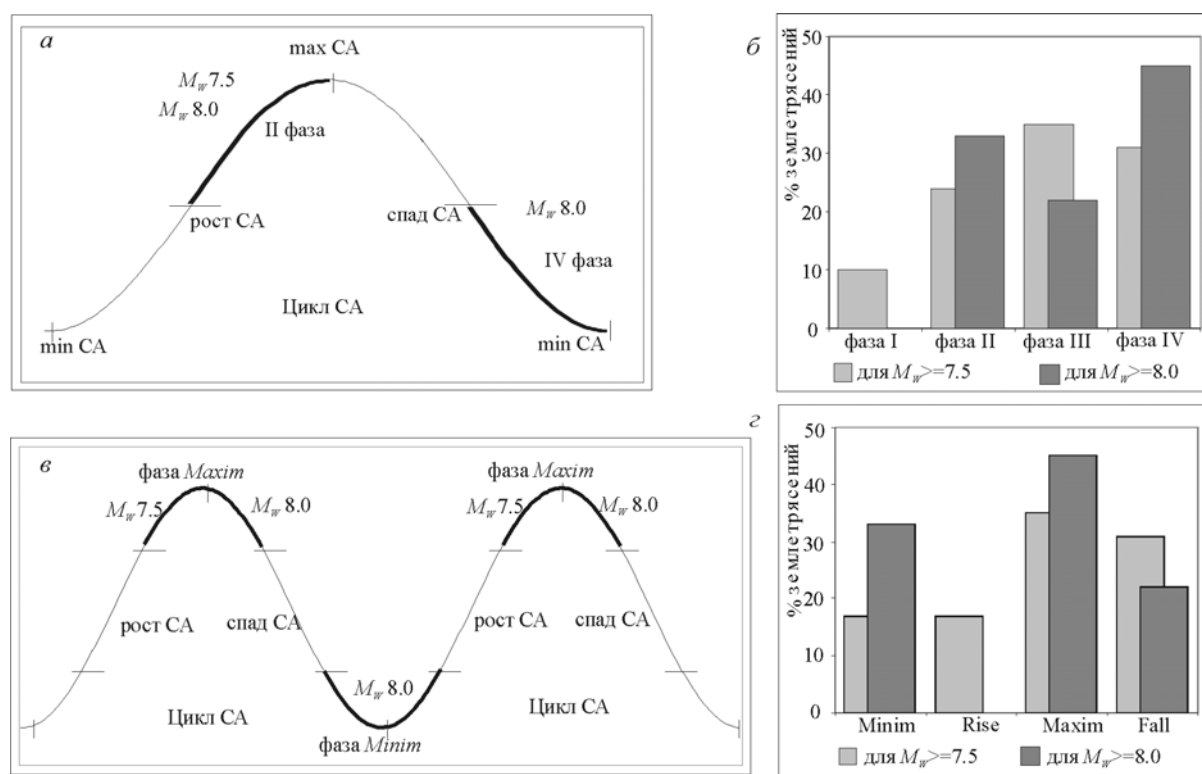


Рис. 3. Характеристика связи фаз циклов солнечной активности с сильными ($M_W \geq 7.5$) и сильнейшими ($M_W \geq 8.0$) камчатскими землетрясениями: а-б – при первом способе выделения фаз СА, в-г – при втором способе выделения фаз СА. На диаграммах а и в жирными линиями показаны фазы, для которых $J > 1$ (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.

фазы максимума и минимума [7, 10]. Кроме этого, триггерным механизмом может служить наложение фаз с повышенной вероятностью сильных землетрясений, выявленных в других природных процессах, например в 18.6-летнем лунном цикле [12].

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 1.3 - 1.8.

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

1. 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 "Геофизика-99", Санкт-Петербург, 9-12 ноября 1999 г. Москва. 2000. С. 8-19.
2. Бузевич А.В. Солнечная активность и сейсмичность на Камчатке // 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/>].
3. 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.
4. 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.
5. Гусев А.А. Схема очаговых зон сильных землетрясений Камчатки за инструментальный период // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский, 2004. С. 75-80.
6. Гусев А.А., Шумилина Л.С. Повторяемость сильных землетрясений Камчатки в шкале моментных магнитуд // Физика Земли. 2004. № 3. С. 34-42.
7. Кузьмин Ю.Д., Широков В.А. О влиянии космических факторов на сейсмичность и вулканизм Камчатки // Вопросы географии Камчатки. 1990. Вып. 10. С. 90-98.
8. Сильные камчатские землетрясения 1971 года / Под. ред. С.А. Федотова. Владивосток, 1975. 152 с.
9. 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.
10. Сытинский А.Д. О связи землетрясений с солнечной активностью // Физика Земли. 1989. № 2. С. 13-30.
11. 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/>].
12. 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.