Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 152–160.

*Юнга С.Л.* О классификации тензоров сейсмических моментов на основе их изометрического отображения на сферу. // Докл. РАН. 1997. Т. 352. № 2. С. 253–255.

*Chelidze T., De Rubeis V., Matcharasgvili T., Tosi P.* Influence of strong electromagnetic discharges on the dynamics of earthquake time distribution in the Bishkek test area (Central Asia) // Annals of Geophysics. 2006. V. 49. N. 4/5. P. 961–975.

*Eckmann J.P., Kamphorst S.O., Ruelle D.* Recurrence Plots of Dynamical Systems // Europhysics Letters. 1987. V. 5. P. 973–977.

# СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШКИ, ВАРИАЦИИ УРОВНЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА И СЕЙСМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ СЕВЕРНОГО ТЯНЬ-ШАНЯ

## *Н.А. Сычева, Л.М. Богомолов<sup>1</sup>, В.Н. Сычев*

Научная станция РАН в г. Бишкек, <sup>1</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН

В работе продолжено исследование вопроса о взаимосвязи сильных магнитных бурь, вызванных солнечными вспышками, и вариаций сейсмичности. Используются данные о временных зависимостях параметров сейсмического шума (среднего уровня, среднеквадратичного отклонения, СКО), регистрируемого станциями сейсмической сети КNET (Северный Тянь-Шань). Отмечены проявления влияния магнитных бурь, произошедших после сильных и сверхсильных солнечных вспышек в 2000–2006 гг. Полученные результаты согласуются с результатами работ о связи сейсмичности с магнитными бурями.

#### Введение

К настоящему времени наличие определенного влияния солнечной активности на сейсмичность Земли можно считать установленным [Сытинский, 1985; 1989; Соболев и др., 2001; Закржевская и Соболев, 2004]. Тем не менее, сохраняет актуальность поиск и анализ новых примеров, в которых проявляется влияние на сейсмичность активности Солнца, в частности, геоэффективных солнечных вспышек, сопровождающихся магнитными бурями с резким началом. Об этом свидетельствуют следующие обстоятельства. В обобщающих работах [Соболев и Пономарев, 2003; Сычев, 2008] обращено внимание на сходство изменений сейсмичности при возбуждении в земной коре импульсных токов, возбуждаемых естественными (магнитные бури) и искусственными источниками. По всей видимости, это соответствует общности механизма триггерного воздействия электромагнитных полей. В ситуации, когда проведение новых экспериментальных электромагнитных зондирований с мощными источниками (геофизические магнитогидродинамические (МГД) генераторы, электроимпульсные системы [Сычев и др., 2008]), сталкивается с экономическими и прочими трудностями, случаи естественной реализации «электровоздействий» становятся востребованными в исследованиях по наведенной и техногенной сейсмичности (включая вопрос о разрядке избыточных напряжений в Земной коре).

Целью данной работы является исследование влияния таких вспышек и магнитных бурь на параметры сейсмического шума (на примере Северного Тянь-Шаня), и сопоставление с ранее полученными результатами о вариациях в потоке сейсмических событий в периоды с такими возмущениями [Соболев и др., 1998, 2001].

## Методика исследования сейсмического шума

В качестве исходного материала рассматривались цифровые записи станций сейсмической сети KNET (рис. 1). Для обработки и анализа были привлечены данные с шести из десяти станций KNET: AAK, AML, EKS2, KBK, KZA, TKM2 (на рис. 1 отмечены черными треугольниками).

В период эксплуатации сети KNET было установлено, что наиболее низким уровнем шумов в частотном диапазоне 1–50 Гц характеризуются станции AAK, AML и TKM2. К наиболее зашумленным можно отнести станции KZA и EKS2. В некоторых случаях причины шумовых отличий понятны. Так, например, одна из малошумных станций AAK размещена в штольне института сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской Республики (НАН КР), а довольно высокий уровень шумов на станции KZA объясняется сильным ветром. В исследовании ва-



Рис. 1. Киргизская сейсмологическая сеть KNET: ∆ – местоположение станций. Черными треугольниками отмечены станции, данные с которых рассматриваются в данной работе

риаций сейсмического шума в данной работе основная роль отводится записям с малошумящих станций ААК, ТКМ2.

Для анализа возможного влияния солнечных вспышек и магнитных бурь на уровень сейсмического шума используется текущее значение его среднеквадратичного отклонения (СКО) как достаточно устойчивая характеристика. Для расчета СКО сейсмического шума формировались выборки за каждые 20 минут. Определялось среднее значение, дисперсия и среднеквадратичное отклонение (72 точки за сутки). Время исследования по каждой солнечной вспышке определялось датой ее возникновения ±20 сут, и в целом составляло 41 сутки. В таблице представлен список и некоторые характеристики наиболее значимых солнечных вспышек, которые произошли за 2000-2006 гг., а также сведения о магнитных бурях, которые, как правило, возникали после этих вспышек. Таблица составлена по данным Интернетсайта http://www.izmiran.ru/services/saf/forecast. Данные о возмущениях магнитного поля Земли были получены по станции Ак-Суу геомагнитной сети Научной станции РАН, где наблюдения ведутся с 1983 года. Время начала бури определялось непосредственно из суточного хода поля по станции по резким отклонениям абсолютной величины магнитного поля от тренда, учитывающего характерный суточный ход, то есть усредненные вариации в магнитоспокойные дни.

Таблица

Nº	Рис.	Солнечная вспышка		D	Магнитная буря	
		начало	конец	Рмах Дж/м²	начало	конец
		дата; час	дата; час		дата; час	дата; час
1	2a	05/12/2006; 07	05/12/2006; 08	0,71	06/12/2006; 07	08/12/2006; 23
2	26	07/09/2005; 21	11/09/2005; 21	2,60	09/09/2005; 14	13/09/2005; 15
3	2в	15/01/2005; 05	17/01/2005; 17	0,63	16/01/2005; 13	19/01/2005; 18
4	2г	28/10/2003; 11	29/10/2003; 04	1,80	28/10/2003; 02	31/10/2003; 17
5	2д	28/05/2003;00	28/05/2003; 03	0,28	29/05/2003; 12	31/05/2003; 03
6	2e	26/07/2002; 20	26/07/2002; 23		26/07/2002	26/07/2002
6	<b>3</b> a	21/04/2002; 01	21/04/2002; 10	0,60	Нет бури	
8	36	04/11/2001; 12	06/11/2001; 00	0,22	05/11/2001; 11	06/11/2001; 23
9	3в	24/09/2001; 16	25/09/2001; 09	0,63	25/09/2001; 20	26/09/2001; 14
10	3г	08/11/2000; 23	09/11/2000; 07	0,21	10/11/2000; 06	10/11/2000; 20
11	3д	14/07/2000; 09	15/07/2000; 12	0,75	15/07/2000; 15	16/07/2000; 16

Солнечные вспышки и, вызванные ими, магнитные бури

#### Результаты исследования

Временные зависимости СКО сейсмического шума для станций ААК и ТКМ по каждому из одиннадцати исследуемых интервалов с солнечной вспышкой в середине представлены на рисунках 2, 3 (ААК – слева, ТКМ – справа). Цена деления по оси абсцисс – 1 сут. На графики также вынесена следующая информация: серый вертикальный прямоугольник в середине окна – день аномальной солнечной вспышки; черные полосы под осью абсцисс – дни магнитных бурь; серые кружки – локальные сейсмические события; черные ромбики – глобальные сейсмические события. Серыми вертикальными прямоугольниками отмечены дни не только аномальных солнечных вспышек (в середине окна), но и дни эруптивных событий [http://www.izmiran.ru/services/saf/forecast], которые произошли в период ±20 дней относительно главной солнечной вспышки. Как показывают рисунки 2, 3, графики отличаются друг от друга и на первый взгляд не дают закономерной картины. Для анализа результатов рассмотрим каждый временной интервал с солнечной вспышкой (вспышками). При этом будем выделять случаи нарастания текущих значений СКО, если при вспышках и магнитных бурях (или вскоре после них) такие приросты происходят.

05.12.2006. (рис. 2, а). В этот период кроме сверхсильной вспышки 5-6 декабря произошло еще несколько достаточно мощных солнечных вспышек 13, 14 декабря 2006 г., за которыми последовали магнитные бури (6-8.12.06) и (14-15.12.06), и магнитные возмущения с 18.12.2006 г. по 23.12.2006 г. На графике рис. 2, а видно, что после первой вспышки происходит незначительное повышение СКО сейсмического шума на станции ААК (слева) и заметное возрастание СКО сейсмического шума на станции ТКМ (справа). Отмеченное повышение носит кратковременный характер (сутки). После вспышки возникла магнитная буря и после ее окончания происходит резкое возрастание СКО, которое может быть вызвано серией локальных сейсмических событий, произошедших с 10 по 12 декабря 2006 г. Следующая солнечная вспышка наложилась на спадающий участок графика СКО, и новое возрастание СКО начинается после вспышки, во время магнитной бури 13–14 декабря. Магнитные возмущения, которые произошли с 18 по 23 декабря, сопровождаются новым ростом амплитуды СКО. 26 декабря в районе Кочкорской впадины произошло Кочкорское землетрясение (М = 5,8, каталог СМТ, координаты эпицентра 42,2° с.ш., 76° в.д.), которое является наиболее сильным событием для рассматриваемой территории за период 2006-2007 гг.

07.09.2005. (рис. 2. б). В рассматриваемый период произошли еще вспышки 8, 9 и 10 сентября. В период этих вспышек происходит кратковременный прирост СКО сейсмического шума, максимум амплитуды приходится на 9 сентября. Магнитная буря началась через сутки после первой вспышки и продолжалась до 13 сентября. 13 сентября произошла еще одна солнечная вспышка, вызвавшая магнитную бурю, с началом которой происходит значительный рост СКО и продолжается до ее окончания.

15.01.2005. (рис. 2, в). В рассматриваемый период произошло 3 вспышки. Первая половина окна характеризуется высоким уровнем СКО, что может быть вызвано сейсмической активностью локального и глобального характера. Во второй половине окна рост СКО начинается в день второй солнечной вспышки 17.01.2005, то есть одновременно или с краткой задержкой с началом магнитной бури, а спад и возвращение к исходному уровню СКО соответствуют по времени окончанию бури.

28.10.2003. (рис. 2, г). В рассматриваемый период произошло несколько вспышек. 26 октября, после первой вспышки, наблюдается резкий рост СКО, который длится до окончания магнитной бури, начавшейся сразу после вспышки 28 октября 2003 г. При этом отмечается значительный рост амплитуды СКО в момент магнитной бури и ее спад сразу же после нее.

28.05.2003. (рис. 2, д). Период, в который произошла вспышка, не сопровождался другими вспышками. Как видно из рисунка, до вспышки средний уровень сейсмического шума стабильный. После солнечной вспышки последовала магнитная буря 29–31 мая 2003 г. В период магнитной бури происходит значительный рост СКО, после окончания бури СКО возвращается примерно к исходному уровню.

26.07.2002. (рис. 2, е). За период исследования произошло несколько солнечных вспышек, три из которых – в первой половине окна и одна вспышка – по-



**Рис. 2.** Временные зависимости СКО сейсмического шума на станциях ААК (слева) и ТКМ (справа) в окне 20 дней до – 20 дней после солнечных вспышек (таблица (а–е)).

Вертикальными серыми прямоугольниками отмечены дни солнечных вспышек, черными линиями – дни магнитных бурь. Серыми кружечками отмечены локальные события, черными ромбиками – глобальные сейсмические события



Рис. 3. То же, что на рис. 2 для солнечных вспышек, указанных в таблице, случаи За, 3д

сле центральной рассматриваемой вспышки. Можно отметить рост СКО в период центральной вспышки, которая сопровождалась магнитными возмущениями в течение суток. Влияние других солнечных вспышек на уровень СКО незначительно.

21.04.2002. (рис. 3. а). После солнечной вспышки 21.04.2002 существенного роста СКО не наблюдается.

04.11.2001. (рис. 3, б). В рассматриваемом окне наблюдается повышение СКО сейсмического шума начинающееся раньше центральной солнечной вспышки 4.11.2001 и магнитной бури 5–6 ноября. Этот рост может быть вызван солнечной вспышкой, которая произошла 1 ноября 2001 г. Окончание солнечной вспышки совпадает с периодом снижения амплитуды СКО до среднего фонового уровня. Магнитная буря после солнечной вспышки не влияет на ход графика СКО, его уровень некоторое время остается стабильным.

24.09.2001. (рис. 3, в). В этом окне зависимость СКО сейсмического шума характеризуется небольшими вариациями СКО перед солнечной вспышкой. Как показывает рис. 3, в, некоторое повышение амплитуды СКО начинается в день магнитной бури 25.09.2001 и продолжается после ее окончания. Во второй половине рассматриваемого периода можно отметить резкие всплески СКО после солнечной вспышки 1 октября 2001 года и в дни магнитных возмущений.

08.11.2000. (рис. 3, г) и 14.07.2000. (рис. 3, д). В период солнечной вспышки и магнитной бури не выражены какие-либо изменения во временных графиках СКО.

В итоге, по представленным на рисунках 2, 3 временным графикам можно говорить о реакции сейсмического шума на солнечную вспышку и/или на последующую за ней магнитную бурю в <u>восьми</u> случаях из <u>одиннадцати (72%)</u>. Результаты показывают, что повышение СКО сейсмического шума чаще происходит не во время вспышки, а в период последовавшей за ней магнитной бурей. При этом оказалось, что фронт нарастания амплитуды СКО в период вспышек и бурь в большей степени коррелирует с магнитными бурями. Действительно, случаев прироста СКО в течение интервала с магнитными бурями или на следующие сутки после бури – 9 из 11, при трех сомнительных случаях, когда прирост происходит практически одновременно с какими-либо сейсмическими событиями. Для суток с солнечными вспышками количество таких случаев (гипотетических откликов) – 5 из 11. И только в двух случаях из 11 (окна со вспышками 28.10.2003 и 4.11.2001) нарастание амплитуды СКО при вспышке на Солнце опередило по времени начало магнитной бури, соответствующей этой вспышке.

В трех случаях (окна со вспышками 14.07.2000, 08.11.2000 и 21.04.2002) на графиках СКО сейсмического шума заведомо отсутствует реакция на вспышку и магнитную бурю. Во всех этих случаях ход графика СКО перед вспышками – квазистационарный, с наименьшим разбросом. Однако имеются примеры «квазистационарных» окон, у которых в предыстории отсутствуют резкие изменения СКО, а во время магнитных бурь на графиках СКО заметен отклик (это случаи вспышек 8.11.2000 и 24.09.2001). Для сравнения временных вариаций СКО сейсмического шума на исследуемых станциях (ААК, AML, EKS2, KBK, KZA, TKM2), на рис. 4 представлены кумулятивные графики этого параметра, полученные при совмещении 11 периодов наблюдений с солнечными вспышками. Рис. 4 показывает, что наиболее низкий уровень шума наблюдается на станции ААК и ТКМ2, наиболее высокий – на станции EKS2. На графиках отмечается «квазистационарный» фоновый уровень в первой половине окна, и существенные изменения (кратковременные повышения) во второй половине для всех исследуемых станций.



Рис. 4. Кумулятивные зависимости СКО сейсмического шума, полученные при совмещении одиннадцати периодов длительностью ±20 суток от дат солнечных вспышек по всем исследуемым станциям. а – AAK; б – AML; в – EKS2; г – KBK; д – KZA; е – TKM2. Серым вертикальным прямоугольником отмечен день солнечной вспышки

Для сравнения с вышерассмотренными кумулятивными шумовыми зависимостями на рис. 5 приведены кумулятивные графики суточного числа событий, подобные тем, что широко использовались в предшествующих работах, посвященных влиянию сильных магнитных бурь на сейсмичность (например [Закржевская и Соболев, 2002; 2004]). На графике суточного числа локальных событий (рис. 5, а), зарегистрированных на территории Бишкекского геодинамического полигона (рис. 1), также можно заметить прирост на вторые сутки после даты солнечной вспышки. Далее на 4–7 сутки, когда отмечается следующий прирост СКО сейсмического шума (рис. 4), на рис. 5, а имеет место некоторое уменьшение суточного числа событий. На рис. 5, б показана кумулятивная зависимость суточного числа событий по каталогу PDE, полученная при совмещении тех же периодов наблюдений, что и в случае рис. 5, а. Ход кумулятивного графика глобальной сейсмичности не позволяет выделить вариаций, приуроченных к совмещенной дате солнечных вспышек и последующим суткам с магнитными бурями.

Здесь прослеживается следующее соответствие с результатами работ [Закржевская и Соболев, 2002; 2004]. В этих работах показано, в частности, что на терри-



**Рис. 5.** Кумулятивные зависимости суточного числа локальных (KNET) (a) и глобальных сейсмических событий(PDE) (б), полученные при совмещении одиннадцати периодов длительностью ±20 суток от дат солнечных вспышек.

Серым вертикальным прямоугольником отмечен день солнечной вспышки

тории Центральной Азии (большей по площади по сравнению с контролируемой сетью KNET) активация сейсмичности происходит с типичной задержкой на несколько суток после сильных магнитных бурь с резким началом. СКО сейсмического шума чувствительно не только к локальным, но и к более удаленным сильным землетрясениям. При дополнительном инициировании сейсмограмма каждого события вносит вклад в рост СКО, следовательно, усредненное за 20 мин значение СКО также будет возрастать. В этой связи важно отметить соответствие между длительностью задержки наибольшего прироста СКО (4–5 суток согласно кумулятивному графику на рис. 5, а) и ранее полученными результатами о задержках вариаций числа событий. Что касается возрастания СКО сейсмического шума вскоре после начала магнитной бури, то в нем может выразиться начальная фаза реакции среды на внешнее воздействие, опережающая сейсмический отклик [Богомолов и др., 2006]. На этой фазе изменения затрагивают относительно высокие частоты (десятки Гц).

Вышеизложенные результаты свидетельствуют, что для территории Северного Тянь-Шаня в период 2000–2006 гг. вариации сейсмического шума, а также суточного числа событий при сильных солнечных вспышках можно связывать именно с магнитными бурями. Было отмечено два эпизода прироста СКО сейсмического шума, опережающего начала магнитных бурь после вспышек 28.10.2003 и 4.11.2001, которые могли бы подтвердить влияние солнечных вспышек через гравитационное возмущение, независимо от возникающих после них магнитных бурь. Однако количество таких примеров (2 случая из 11) явно недостаточно, чтобы отказываться от представлений, что в цепочке Солнечно-Земных взаимосвязей присутствует звено, ответственное за триггерное влияние на сейсмичность, возникновение в земной коре индукционных токов при геоэффективных солнечных вспышках и вызванных ими ионосферных возмущениях.

#### Заключение

Проведен анализ СКО сейсмического шума в период крупных солнечных вспышек, произошедших в 2000–2006 гг., которые сопровождались магнитными бурями. Отражением этих явлений стало повышение значений СКО сейсмического шума. Увеличение СКО сейсмического шума обнаруживает более устойчивую корреляцию с магнитной бурей, чем с предшествующей ей солнечной вспышкой. По кумулятивным графикам также отмечен прирост СКО и некоторая активизация сейсмических событий, происходящая с задержкой после дня совмещенных вспышек. Длительность задержки такова, что магнитные бури начинаются раньше сейсмической активации, причем интервал времени между приростом сейсмичности и началом магнитных бурь согласуется с результатами других исследователей о соответствующих задержках.

Настоящее исследование осуществлено при финансовой поддержке Программы № 15 фундаментальных исследований Президиума РАН и РФФИ (гранты 09-05-00687а, 09-05-00919а).

## Литература

Богомолов Л.М., Сычев В.Н., Ильичев П.В. Феноменологическая модель потока возбужденных эмиссионных сигналов геосреды // Физика Земли. 2006. № 9. С. 71–80.

Закржевская Н.А., Соболев Г.А. О возможном влиянии магнитных бурь на сейсмичность // Физика Земли. 2002. № 4. С. 3–15.

Закржевская Н.А., Соболев Г.А. Влияние магнитных бурь с внезапным началом на сейсмичность в различных регионах // Вулканология и сейсмология. 2004. № 3. С. 63–75.

Соболев Г.А., Шестопалов И.П., Харин Е.П. Геоэффективные солнечные вспышки и сейсмическая активность Земли // Физика Земли. 1998. № 7. С. 85–90.

Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Харин Е.П. О связи сейсмичности с магнитными бурями // Физика Земли. 2001. № 11. С. 62–72.

Соболев Г.А., Пономарев А.В. Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.

*Сытинский А.Д.* Связь сейсмической активности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами. Л.: Наука.1985. 206 с.

*Сытинский А.Д.* О связи землетрясений с солнечной активностью // Физика Земли. 1989. № 2. С. 13–21.

*Сычев В.Н.* Исследование влияния импульсных энергетических воздействий на вариации пространственно-временных распределений сейсмичности на территории Северного Тянь-Шаня // Дисс. ... уч. степени к.ф.-м.н. М.: ИФЗ. 2008. 210 с.