

УДК 550.348

## О ГЕОЭФФЕКТИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШКАХ И ВАРИАЦИЯХ УРОВНЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА

© 2011 г. Н. А. Сычева<sup>1</sup>, Л. М. Богомолов<sup>2</sup>, В. Н. Сычев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научная станция РАН, г. Бишкек

<sup>2</sup>Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск

Поступила в редакцию 28.09.2009 г.

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 КНЕТ при мониторинге территории Бишкекского геодинамического полигона (Северный Тянь-Шань). Представлены результаты, свидетельствующие о большей чувствительности сейсмического шума в диапазоне частот 10–20 Гц к внешним, в частности, электромагнитным воздействиям по сравнению с сейсмической активностью. Отмечены проявления влияния магнитных бурь, произошедших после сильных и сверхсильных солнечных вспышек в 2000–2006 гг. Это кратковременный прирост СКО сейсмического шума, опережающий изменения скорости накопления числа событий. Полученные результаты согласуются с результатами работ о связи сейсмичности с магнитными бурями. Предложена модель, описывающая один из возможных механизмов влияния на сейсмический процесс электромагнитных импульсов и наведенных ими токов в среде без пьезоэлектрических свойств.

### ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени наличие определенного влияния солнечной активности на сейсмичность Земли можно считать установленным [Сытинский, 1985; 1989; Соболев и др., 2001; Закржевская, Соболев, 2004]. Оно заняло свое место среди земных явлений в живой и неживой природе, чувствительных к взаимосвязанным процессам на Солнце, в межпланетном пространстве, магнитосфере, ионосфере, атмосфере и “твердых” слоях Земли. 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, 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 МГД-генераторы, электроимпульсные системы, [Сычев и др., 2008; 2009]), сталкивается с экономическими и прочими трудностями, случаи естественной реализации “электровоздействий” становятся востребованными в исследованиях по наведенной и техногенной сейсмичности (включая вопрос о разрядке избы-

точных напряжений в Земной коре). Произошедшие в начале XXI века сверхсильные вспышки на поверхности Солнца и последовавшие после них аномальные магнитные бури позволяют получить новые данные в дополнение к известным результатам о влиянии электрических импульсов на вариации сейсмичности [Тарасов, 1997; Тарасов и др., 1999; Chelidze et al., 2006; Сычева и др., 2003; Богомолов и др., 2005].

Целью данной работы является исследование влияния таких вспышек и магнитных бурь на параметры сейсмического шума и потока событий (на примере Северного Тянь-Шаня), сопоставление с ранее полученными результатами [Соболев и др., 1998; 2001; Орлов и др., 2008] и обсуждение на этой основе физической природы сейсмических вариаций при “геоэффективных” солнечных вспышках. Ключевым является анализ времени задержек между солнечной вспышкой и откликов в виде вариаций параметров сейсмических рядов. Есть ли случаи, когда эти задержки краткие, и прирост среднего уровня шума либо числа событий опережает начало магнитной бури? Для пояснения значимости вопроса можно отметить, что к настоящему времени имеются два варианта объяснения взаимосвязи солнечных вспышек и изменений сейсмичности. Наиболее распространен подход, согласно которому влияние возмущений на Солнце можно схематически представить как цепочку: мощная вспышка на Солнце—увеличение концентрации заряженных частиц, т.е. солнечного ветра в межпланетной среде—возмущение магнитосферы и ионосферы (магнитная

буря с резким началом)—изменения величины и направления теллурических токов из-за возникновения в земной коре индукционных токов изображения. С индукционными токами как раз и связывается триггерный эффект перераспределения сейсмичности [Авагимов и др., 2005]. При таком подходе достаточно очевидно существование сходных признаков в вариациях сейсмичности при воздействии естественных (при магнитных бурях) и искусственных источников (при сильноточных электротондированиях), как, например, приуроченность откликов к зонам концентрации фоновой сейсмичности, расположение гипоцентров в верхних слоях земной коры (глубины до 20 км), задержки откликов с длительностью несколько суток и пр. [Современная..., 2005]. Однако в недавних работах [Орлов и др., 2008; 2009] обращено внимание на другой, чисто механический (гравитационный) канал взаимосвязи сверхсильных вспышек на Солнце и вариаций сейсмичности. Согласно этим работам, при сильных вспышках, подобных возникшей 5–6 декабря 2006 г. (одной из десяти самых сильных за всю историю наблюдений), происходит выброс огромной массы заряженных частиц, из-за чего имеет место смещение центра массы Солнца и, как следствие, смещение центра масс системы Солнце—Земля. Вслед за этим возбуждаются колебательные (релаксационные) движения внутреннего ядра Земли, что проявляется по деформационным колебаниям с периодом 1–12 ч, зарегистрированным при прецизионных измерениях с помощью лазерного деформографа [Багаев и др., 1992], установленного в штольне в Байкальской рифтовой зоне. Под влиянием колебаний внутреннего ядра, передающихся слоям земной коры, как раз и происходит перераспределение планетарной сейсмичности [Орлов и др., 2009], причем по данным локальных сейсмических сетей реакция на сильную вспышку будет выглядеть как отклик, т.е. прирост числа событий в некоторой зоне. При таком механизме можно ожидать отличия в характере сейсмических откликов по сравнению со случаем электромагнитного воздействия с искусственными источниками, например, большую глубину очагов землетрясений, инициированных после солнечных вспышек, или краткость задержек, а возможно и опережение магнитной бури.

В принципе любой из упомянутых двух механизмов может играть ведущую роль в том, или ином регионе, в зависимости от геодинамических условий и особенностей сейсмического режима. В частности, согласно [Левин, 2001], можно ожидать, что связанные с внутренним ядром процессы (включая колебания) проявятся, прежде всего, в вариациях сейсмичности в приэкваториальной зоне между 35° ю.ш. и 35° с.ш., а в более высокоширотных областях их вклад менее значим. По мнению авторов, для идентификации основного механизма могут быть полезными новые результаты о региональной сейсмичности с привлече-

нием данных о временных зависимостях сейсмического шума.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА

В качестве исходного материала рассматривались цифровые записи сейсмической сети KNET, охватывающей территорию Бишкекского геодинамического полигона, Северный Тянь-Шань (рис. 1). Для обработки и анализа были привлечены данные с шести из десяти станций KNET: ААК, АМЛ, ЕКС2, КВК, КЗА, ТКМ2. На рис. 1 эти станции отмечены черными треугольниками. Локальные особенности рельефа в месте расположения этих станций представлены на рис. 2.

Станция ААК расположена в ущелье Ала-Арча, простирающемся с севера на юг. Станция находится в окружении крутых склонов высотой несколько сотен метров. Севернее площадки станции ААК лежат предгорья с пологими южными и крутыми северными склонами, трассирующие выход разлома в Чуйскую долину.

АМЛ стоит на коренных породах на плоском участке возле вершины хребта Арамсу, возвышаясь над западной стороной Суусамырской долины. Рядом со станцией находится несколько обнажений слегка потрескавшегося гранита. АМЛ расположена непосредственно над плоскостью разлома Суусамырского землетрясения 1992 г.  $M_S = 7.4$ .

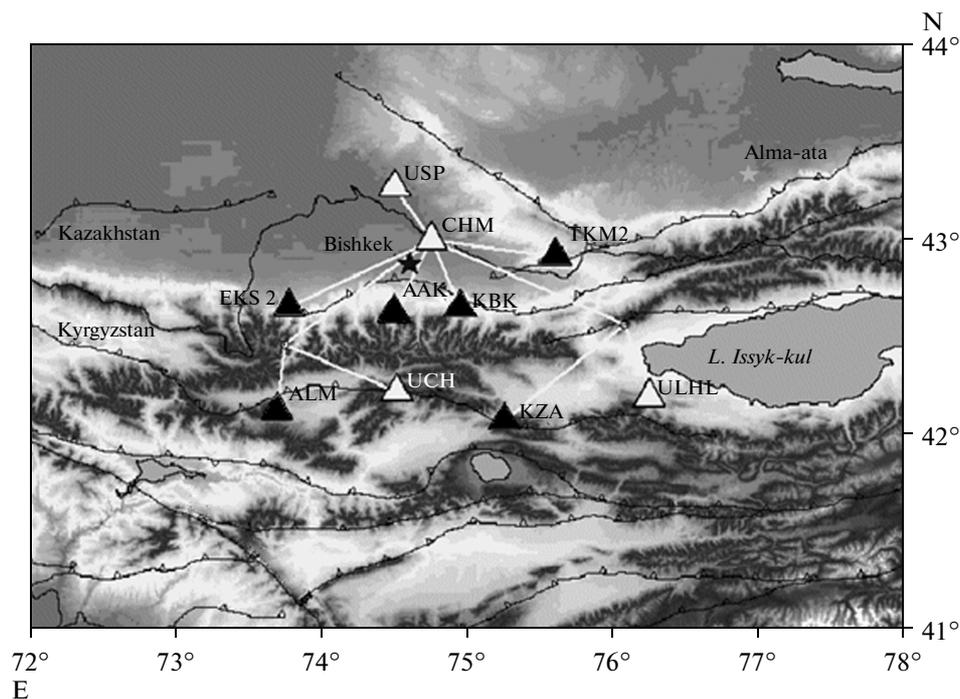
ЕКС2 расположена непосредственно у подножия Киргизского хребта. Она стоит на осадочных породах рядом с маленькой ложиной на юго-западном склоне холма.

КВК находится в нескольких километрах к северу от основного Киргизского хребта. Площадка лежит на вершине холма, которая резко обрывается в нескольких метрах к югу от станции. Северный склон холма менее крутой, чем склоны на юге, востоке и западе.

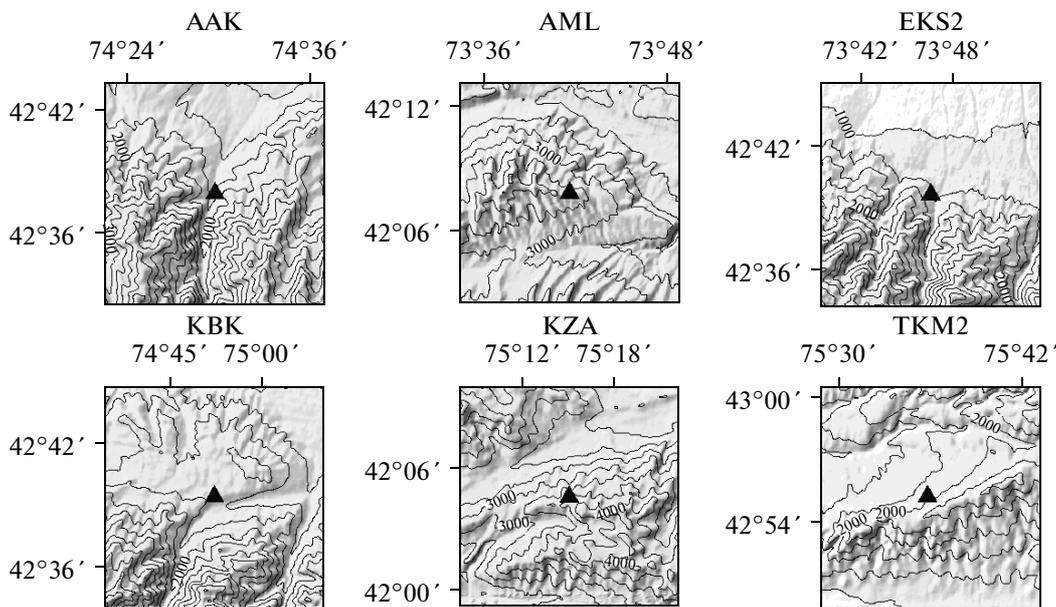
КЗА находится в конце короткого хребта, направленного на север, на большой высоте над долиной. Склон обрывается очень резко как с запада, так и с востока, а к югу медленно поднимается до плоской площадки. Порода — гранит.

ТКМ2 расположена относительно высоко на хребте, ограничивающем северо-восточную часть Чуйской долины, на длинном склоне, уходящем вниз на северо-восток.

В период, предшествующий эксплуатации сети KNET в режиме реального времени (до 1998 г.), было установлено, что наиболее низким уровнем шумов в частотном диапазоне 1–50 Гц характеризуются станции ААК, АМЛ и ТКМ2. К наиболее зашумленным можно отнести станции КЗА и ЕКС2. В некоторых случаях причины шумовых отличий понятны. Так, например, одна из малозумных станций ААК размещена в штольне института сейсмологии НАН КР,



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

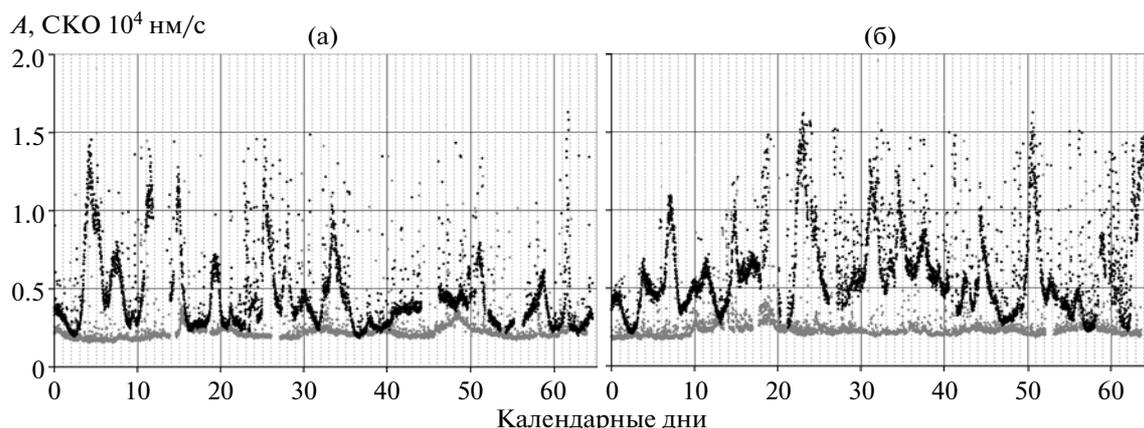


**Рис. 2.** Геоморфологические особенности расположения станций сети KNET: AAK, AML, EKS2, KBK, KZA, TKM2.

а довольно высокий уровень шумов на станции KZA объясняется сильным ветром. Но, в целом, такие особенности станций, как больший или меньший уровень шумов, остаются эмпирическими обобщениями, поскольку для их объяснения необходима информация о неоднородностях среды с размерами порядка десятков метров. В исследовании вариаций

сейсмического шума в данной работе основная роль отводится записям с малозумящих станций AAK, TKM2.

Для анализа возможного влияния солнечных вспышек и магнитных бурь на уровень сейсмического шума необходимо выбрать подходящую характери-



**Рис. 3.** Изменение СКО сейсмического шума на станции Аларча (ААК) в летние (серый) и зимние (черный) месяцы: (а) 22.05.2003–22.07.2003, 22.11.2003–22.01.2004; (б) 22.05.2004–22.07.2004, 22.11.2004–22.01.2005.

стику во временных сейсмических рядах и далее рассматривать ее изменения. Поскольку уровень сейсмического шума сильно меняется в отдельные моменты, то использование его усредненного значения за определенный квант времени является нецелесообразным. В данной работе используется текущее значение среднеквадратичного отклонения (СКО) как достаточно устойчивая характеристика.

Для того чтобы определить характер изменения этого параметра во времени и корреляций с солнечными вспышками и магнитными бурями важна априорная информация о периодических вариациях или сезонности СКО. В предварительном порядке были проведены такие исследования сейсмического шума на станции ААК. Период исследования 2003–2005 гг. Канал исследования ВНЗ (40 отсчетов/с). Для расчета СКО сейсмического шума формировались выборки за каждые 15 минут. Определялось среднее значение, дисперсия и среднеквадратичное отклонение (96 точек за сутки). Если в какой-то момент времени произошло землетрясение, то эта точка характеризуется повышенным значением СКО относительно общего уровня. Поскольку интерес вызывает изменение уровня в течение более длительного времени (несколько суток), то отдельные выбросы, связанные с локальными и глобальными событиями не исключались, ввиду неоднозначности алгоритма исключения и во избежание субъективности. Чтобы определить проявления сезонности в уровне сейсмического шума, проанализировано изменение СКО в зимние и летние месяцы года. В качестве летних месяцев использован 2-х месячный период с серединой в самый продолжительный день года (22 июня), а для зимних месяцев выбран 2-х месячный период с серединой, выпадающей на самый короткий день года (22 декабря). Изменения СКО сейсмического шума на станции ААК за периоды 22.05.2003–22.07.2003 (лето) и 22.11.2003–22.01.2004 (зима) представлены на рис. 3а, и за периоды 22.05.2004–22.07.2004 (лето) и

22.11.2004–22.01.2005 (зима) на рис. 3б. По оси абсцисс откладывается количество календарных дней (сутки – 96 точек). Для наглядности выполнено наложение данных в течение летних и зимних периодов на один график. Видно, что средний уровень СКО в летние месяцы ниже, чем в зимние: если в летние месяцы его значение колеблется на уровне  $0.2 \times 10^4$  нм/с, то в зимние месяцы его уровень достигает  $0.5 \times 10^4$  нм/с. В зимние месяцы также наблюдается некоторая квазипериодичность, и более значительные перепады значения СКО. Отдельные отклонения (точки) на фоне общего хода СКО сейсмического шума вызваны сильными далекими землетрясениями, зарегистрированными сетью KNET и локальными событиями. Более высокий уровень шума с резкими изменениями в зимний период может свидетельствовать о подвижках снежного покрова, который образуется в местах расположения станций (рис. 2) обычно в конце ноября–начале декабря. Проявлений летнего сезонного фактора – фильтрации воды после грозных дождей – не обнаружено.

После получения предварительных материалов проводился поиск возмущений уровня СКО сейсмического шума, связываемых с влиянием геоэффективных солнечных вспышек и вызванных ими магнитных бурь. При этом в методике исследования изменились только следующие параметры: время исследования по каждой солнечной вспышке определялось датой ее возникновения  $\pm 20$  сут., и в целом составляло 41 сутки; период осреднения сейсмического шума – 20 минут (72 значения за сутки). В табл. 1 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. Табл. 1 составлена по данным Интернет – сайта <http://www.izmiran.ru/services/saf/forecast>. Данные о возмущениях магнитного поля Земли были получены по станции Ак-Суу гео-

Таблица 1. Солнечные вспышки и вызванные ими магнитные бури

№	Рис.	Солнечная вспышка		$P_{\max}$	Магнитная буря	
		Начало	Конец		Начало	Конец
		Дата; час	Дата; час	Дж/м <sup>2</sup>	Дата; час	Дата; час
1	4а	05/12/2006; 07	05/12/2006; 08	0.71	06/12/2006; 07	08/12/2006; 23
2	4б	07/09/2005; 21	11/09/2005; 21	2.60	09/09/2005; 14	13/09/2005; 15
3	4в	15/01/2005; 05	17/01/2005; 17	0.63	16/01/2005; 13	19/01/2005; 18
4	4г	28/10/2003; 11	29/10/2003; 04	1.80	28/10/2003; 02	31/10/2003; 17
5	4д	28/05/2003; 00	28/05/2003; 03	0.28	29/05/2003; 12	31/05/2003; 03
6	4е	26/07/2002; 20	26/07/2002; 23		26/07/2002	26/07/2002
6	5а	21/04/2002; 01	21/04/2002; 10	0.60	Нет бури	6
8	5б	04/11/2001; 12	06/11/2001; 00	0.22	05/11/2001; 11	06/11/2001; 23
9	5в	24/09/2001; 16	25/09/2001; 09	0.63	25/09/2001; 20	26/09/2001; 14
10	5г	08/11/2000; 23	09/11/2000; 07	0.21	10/11/2000; 06	10/11/2000; 20
11	5д	14/07/2000; 09	15/07/2000; 12	0.75	15/07/2000; 15	16/07/2000; 16

магнитной сети Научной станции РАН, где наблюдения ведутся с 1983 г. по настоящее время. На станциях сети для измерений используются магнитовариационные станции МВ-01, дискретность измерений 20 секунд (4320 значений в сутки). Время начала бури определялось непосредственно из суточного хода поля по станции по резким отклонениям абсолютной величины магнитного поля от тренда, учитывающего характерный суточный ход, т.е. усредненные вариации в магнитоспокойные дни.

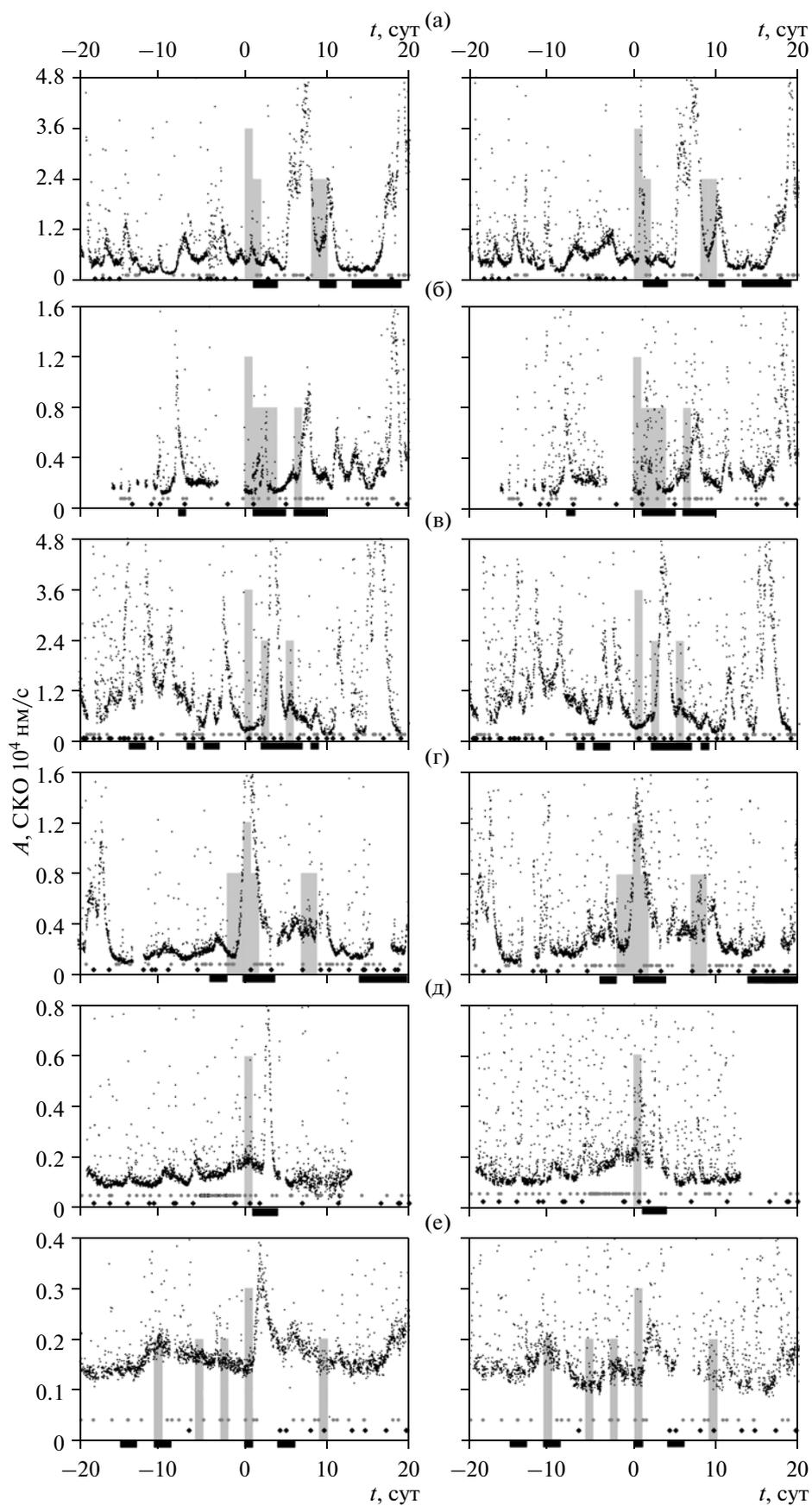
Для визуального анализа влияния на уровень сейсмического шума солнечных вспышек и/или магнитных бурь строились графики временных рядов СКО сейсмического шума. На графиках в отдельных полях также представлялась следующая информация: 1) – время солнечной вспышки (серый вертикальный прямоугольник); 2) – период, в который происходила магнитная буря, вызванная солнечной вспышкой (черная горизонтальная линия ниже временной оси); 3) – глобальные сейсмические события с  $M > 6$  из каталога PDE ([http://www.neic.cr.usgs.gov/neis/epic/epic\\_global.html](http://www.neic.cr.usgs.gov/neis/epic/epic_global.html), черные ромбики); 4) – локальные сейсмические события, зарегистрированные сейсмической сетью KNET (серые кружки).

## 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 рис. 4, рис. 5 (ААК слева, ТКМ – справа). Цена деления по оси абсцисс – 1 день. 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 (табл. 2), которые произошли в период  $\pm 20$  дней относительно главной солнечной вспышки. По каждой солнечной вспышке результаты изменения СКО представлены в масштабе, удобном для оценки степени влияния солнечной вспышки или магнитной бури на сейсмический шум. Как показывают рис. 4, рис. 5, 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 г.** (Рис. 4а). 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 г.), и магнитные возмущения с 18.12.2006 г. по 23.12.2006 г. Характеристики вспышек приведены в табл. 2. На графике рис. 4а 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. Следующие



шая 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 ( $M = 5.8$ , каталог СМТ, координаты эпицентра  $42.2^\circ$  с.ш.,  $76^\circ$  в.д.), которое является наиболее сильным событием для рассматриваемой территории за период 2006–2007 гг.

**07.09.2005 г.** (Рис. 4б). По энергетической характеристике солнечная вспышка 7 сентября 2005 г. является наиболее значительной из всех рассматриваемых. Вскоре после этой даты произошли еще вспышки 8, 9 и 10 сентября, что указано одним серым вертикальным прямоугольником на рис. 4б. 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. Этот период характеризуется ростом числа локальных сейсмических событий, причем активация отмечается позже, чем начало нарастания СКО сейсмического шума.

**15.01.2005 г.** (Рис. 4в). В рассматриваемый период эта вспышка также не была единственной, наряду с ней произошли еще солнечные вспышки, отмеченные в табл. 2. Во время, соответствующее первой половине окна, произошел ряд землетрясений, чем обусловлен рост амплитуды СКО. Перед рассматриваемыми вспышками уровень шума снизился. При этом обращает на себя внимание, что после магнитного возмущения 12.01.2005 г., возникшего в отсутствие сильной бури, произошло несколько сейсмических событий, и имел место всплеск СКО. Во второй половине окна в дни с солнечными вспышками и магнитной бурей отмечен прирост глобальной и локальной сейсмичности. При этом рост СКО начинается в день второй солнечной вспышки 17.01.2005 г., т.е. 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 г.** (Рис. 4г). В рассматриваемый период кроме этой вспышки произошло еще несколько вспышек, в том числе и вспышка 29 октября (табл. 2). 26 октября, после первой вспышки, наблюдается рез-

кий рост СКО, который длится до окончания магнитной бури, которая началась 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. Вслед за этим в те же сутки имеет место повышение локальной сейсмической активности. Следующие солнечные вспышки произошли 4–5 ноября 2003 г., которые вызвали кратковременный рост СКО сейсмического шума и рост числа сейсмических событий.

**28.05.2003 г.** (Рис. 4д). 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. Стоит отметить, что эта вспышка как раз и рассматривалась в [Орлов и др., 2008; 2009]. В первой половине окна наблюдается серия локальных сейсмических событий, которые являются афтершоками Луговского землетрясения 22.05.2003 ( $M = 5.7$ ).

**26.07.2002 г.** (Рис. 4е). За период исследования произошло несколько солнечных вспышек, три из которых – в первой половине окна и одна вспышка после центральной рассматриваемой вспышки. Можно отметить рост СКО в период центральной вспышки, которая сопровождалась магнитными возмущениями в течении суток. Влияние других солнечных вспышек на уровень СКО незначительно.

**21.04.2002 г.** (Рис. 5а). За четыре дня до центральной вспышки произошла вспышка и магнитная буря после нее. После центральной солнечной вспышки магнитная буря не последовала. Зависимость СКО сейсмического шума в окне имеет меньший разброс по сравнению с другими окнами. После солнечной вспышки 21.04.2002 г. существенного роста СКО не наблюдается. Этот случай можно отнести к “отрицательному” результату проверки гипотезы.

**04.11.2001 г.** (Рис. 5б). 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. Дальнейшие выбросы СКО можно

**Рис. 4.** Временные зависимости СКО сейсмического шума на станциях ААК (слева) и ТКМ (справа) в окне 20 дней до – 20 дней после солнечных вспышек (табл. 1, (а)–(е)). Вертикальными серыми прямоугольниками отмечены дни солнечных вспышек, черными линиями – дни магнитных бурь. Серыми кружочками отмечены локальные события, черными ромбиками глобальные сейсмические события.

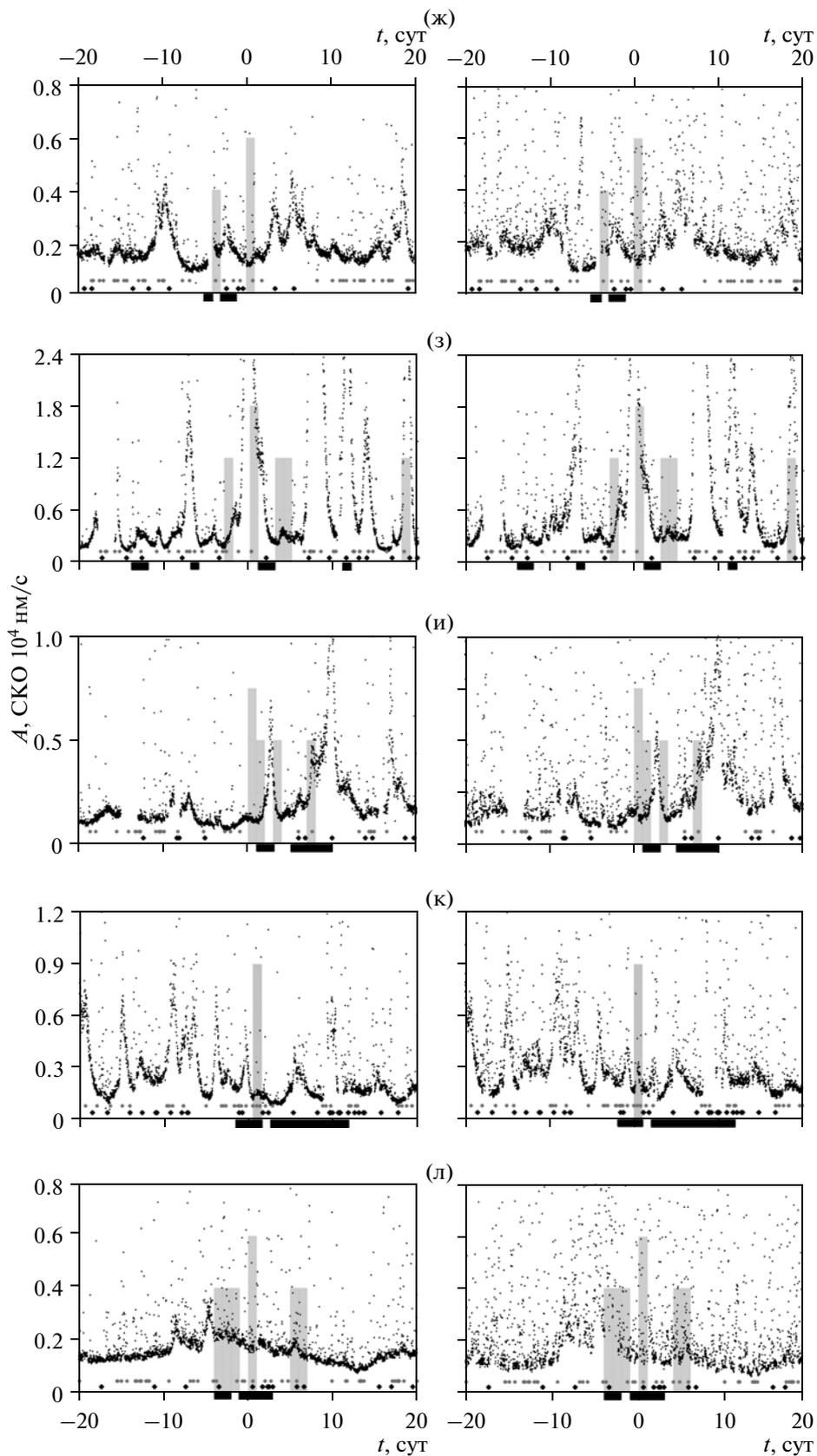


Рис. 5. То же, что на рис. 4 для солнечных вспышек, указанных в табл. 1, случаи (ж)–(л).

Таблица 2. Мощные, “геоэффективные” и сопутствующие им события – вспышки на Солнце в период 2000–2006 гг.

№	Дата	Время			$P_{\max}$	Примеч	
		t_start	t_max	t_end	Дж/м <sup>2</sup>		
<b>1</b>	05/12/2006	10:18	10:24	10:45	0.71	Основ (4а)	
1.1	06/12/2006	08:02	08:23	09:03	0.14		
1.2	06/12/2006	18:29	18:47	19:00	0.48		
1.3	13/12/2006	02:14	02:40	02:57	0.51		
1.4	14/12/2006	21:07	22:55	22:26	0.12		
<b>2</b>	07/09/2005	17:17	23:28	18:47	2.60	Основ (4б)	
2.1	08/09/2005	20:52	21:06	24:42	0.38		
2.2	09/09/2005	09:42	09:59	10:08	0.23		
2.3	09/09/2005	19:13	20:04	20:36	1.70		
2.4	10/09/2005	21:30	22:11	22:43	0.64		
2.5	13/09/2005	19:19	19:27	23:13	0.55		
<b>3</b>	15/01/2005	22:25	16:20	23:31	0.63	Основ (4в)	
3.1	17/01/2005	06:59	09:52	11:57	0.84		
3.2	19/01/2005	08:03	08:22	08:40	0.22		
3.3	20/01/2005	06:36	07:01	08:54	1.30		
<b>4</b>	28/10/2003	09:51	10:38	14:20	1.80	Основ (4г)	
4.1	26/10/2003	05:57	06:54	09:17	0.51		
4.2	26/10/2003	17:21	18:19	20:16	0.63		
4.3	27/10/2003	07:51	08:33	10:18	0.12		
4.4	29/10/2003	20:37	20:49	22:53	0.87		
4.5	02/11/2003	17:03	17:25	19:54	0.91		
4.6	03/11/2003	09:43	09:55	10:06	0.56		
<b>5</b>	28/05/2003	00:17	01:51	02:45	0.28		
<b>6</b>	26/07/2002	20:51	21:12	22:59	0.12		Основ (4е)
6.1	15/07/2002	19:59	20:08	23:34	0.14		
6.2	20/07/2002	21:04	21:30	21:54	0.72	Макс. $P$	
6.2	23/07/2002	00:18	00:35	02:40	0.46		
6.3	04/08/2002	08:58	09:55	10:33	0.23	Основ (5а)	
<b>7</b>	21/04/2002	00:43	00:27	02:51	0.60		
7.1	17/04/2002	07:46	08:24	11:41	0.15		
<b>8</b>	04/11/2001	16:03	11:10	23:40	0.22	Основ (5б)	
8.1	25/10/2001	14:42	15:02	19:06	0.23		
8.2	07/11/2001	19:30	20:01	21:21	0.12		
8.3	08/11/2001	14:59	15:35	16:25	0.10		
8.4	22/11/2001	22:09	23:30	00:41	0.31		
<b>9</b>	24/09/2001	09:32	20:49	12:17	0.63		Макс. $P$
9.1	27/09/2001	08:55	12:13	14:06	0.40		
9.2	01/10/2001	04:41	05:15	05:23	0.09		Основ (5в)
<b>10</b>	08/11/2000	22:42	23:02	00:05	0.21		
<b>11</b>	14/07/2000	10:03	17:40	11:46	0.75	Основ (5д)	
11.1	10/07/2000	21:05	21:42	00:46	0.22		
11.2	11/07/2000	12:12	13:10	13:35	0.31		
11.3	12/07/2000	10:18	10:37	11:44	0.14		
11.4	19/07/2000	06:45	07:26	09:01	0.16		
11.5	20/07/2000	09:21	10:06	11:21	0.11		

связать с последующими солнечными вспышками и сейсмическими событиями глобального характера.

**24.09.2001 г.** (Рис. 5в). В этом окне зависимость СКО сейсмического шума характеризуется небольшими вариациями СКО перед солнечной вспыш-

кой. Как показывает рис. 5и, некоторое повышение амплитуды СКО начинается в день магнитной бури 25.09.2001 г. и продолжается после ее окончания. Во второй половине рассматриваемого периода можно отметить резкие всплески СКО после солнечной

вспышки 1 октября 2001 г., и в дни магнитных возмущений.

**08.11.2000 г.** (Рис. 5г). Как показывает этот рисунок, в первом полуокне всплески амплитуды СКО соответствуют возникновению событий глобальной или локальной сейсмичности. Но и магнитная буря, произошедшая на следующий день после солнечной вспышки 8.11.2000 г., сопровождалась некоторым нарастанием СКО. Заметим, что случай рис. 5к является примером отсутствия каких-либо значимых изменений СКО непосредственно в период магнитной бури, которая произошла перед солнечной вспышкой и примером отсутствия магнитной бури после солнечной вспышки.

**14.07.2000 г.** (Рис. 5д). В период солнечной вспышки и магнитной бури не выражены какие-либо изменения во временных графиках СКО.

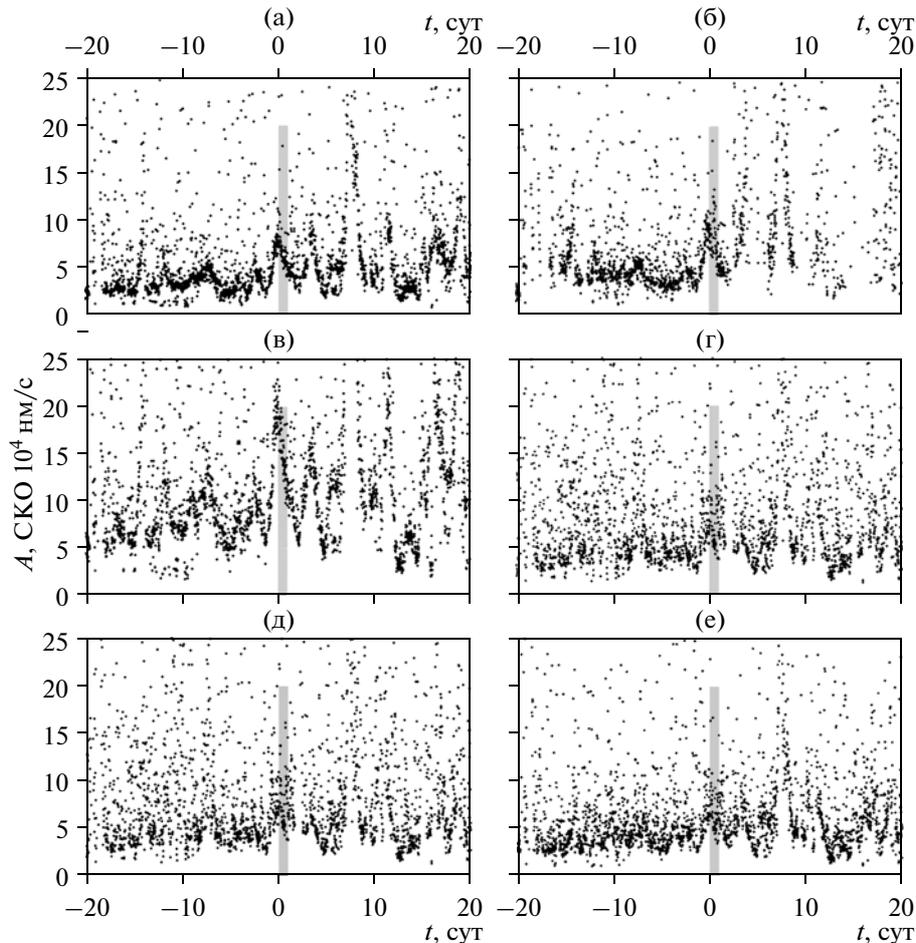
В итоге, по представленным на рис. 4, рис. 5 временным графикам можно говорить о реакции сейсмического шума на солнечную вспышку и/или на последующую за ней магнитную бурю в восьми случаях из одиннадцати (72%). Результаты показывают, что повышение СКО сейсмического шума чаще происходит не во время вспышки, а в период последовавшей за ней магнитной бури. 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 г. и 4.11.2001 г.) 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 г., 08.11.2000 г. и 21.04.2002 г.) 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 г.). Любопытно также отметить следующее обстоятельство. Половина из числа рассматриваемых окон приходится на зимнее время года, характеризующееся более высоким разбросом значений СКО по сравнению с летом (рис. 3). Именно эти окна дают основной вклад в статистику всплесков СКО в течение суток со вспышками (три случая из четырех).

Для сравнения временных вариаций СКО сейсмического шума на различных станциях (ААК, АМЛ, ЕКС2, КВК, КЗА, ТКМ2), на рис. 6 представлены кумулятивные графики этого параметра, полученные при совмещении 11 периодов наблюдений с солнечными вспышками (табл. 2). Рис. 6 показывает, что графики для каждой из рассматриваемых станций имеют свои особенности. Наиболее низкий уровень шума наблюдается на станции ААК и ТКМ2, наиболее высокий уровень – на станции ЕКС2. Вместе с тем по рис. 6 видно, что для всех шести станций в правом полуокне наблюдается возрастание уровня СКО сейсмического шума. Для определенности выберем запись со станции ААК (рис. 6а) для обсуждения хода кумулятивных графиков СКО сейсмического шума. На графике отмечается “квазистационарный” фоновый уровень в первой половине окна и существенные изменения (кратковременные повышения) во второй половине. Первый прирост приходится на следующие сутки после совмещенной даты солнечных вспышек, т.е. на время, когда, в большинстве случаев, уже начались магнитные бури. Далее на 4–7 сутки после даты солнечной вспышки происходит следующий, более масштабный всплеск СКО сейсмического шума.

Для сравнения с вышерассмотренными кумулятивными шумовыми зависимостями на рис. 7 приведены кумулятивные графики суточного числа событий, подобные тем, что широко использовались в предшествующих работах, посвященных влиянию сильных магнитных бурь на сейсмичность (например [Закржевская, Соболев, 2002; 2004]). На рис. 7а на графике суточного числа локальных событий, зарегистрированных на территории Бишкекского геодинимического 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, на рис. 7а имеет место некоторое уменьшение суточного числа событий. На рис. 7б показана кумулятивная зависимость суточного числа событий по каталогу PDE, полученная при совмещении тех же периодов наблюдений, что и в случае рис. 7а. 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, Соболев, 2002; 2004]. В этих работах показано, в частности, что на территории 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 землетрясениям. При дополнительном иницировании сейсмограмма каждого события вносит вклад в рост СКО, следовательно,



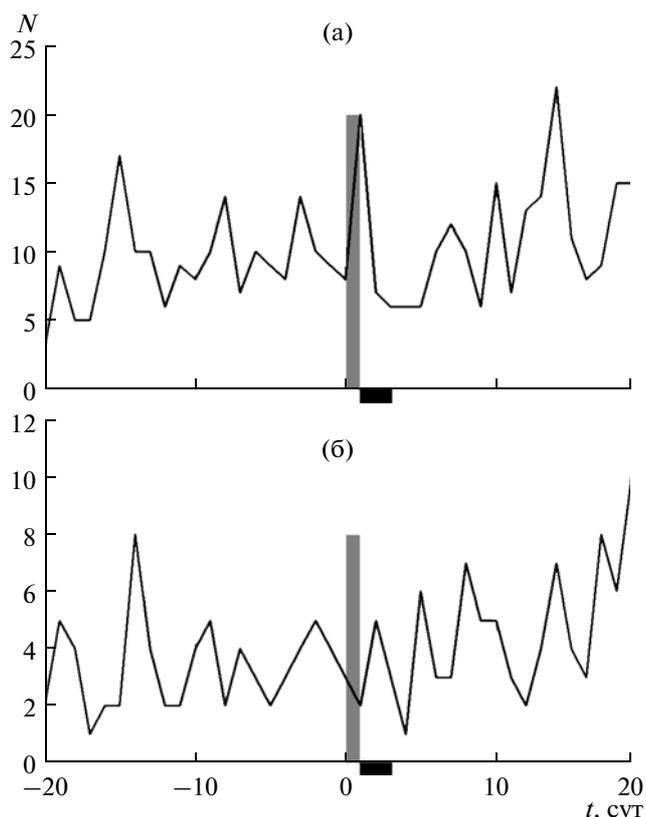
**Рис. 6.** Кумулятивные зависимости СКО сейсмического шума полученные при совмещении одиннадцати периодов длительностью  $\pm 20$  суток от дат солнечных вспышек по всем исследуемым станциям: (а) – ААК; (б) – АМЛ; (в) – ЕКС2; (г) – КВК; (д) – КЗА; (е) – ТКМ2. Серым вертикальным прямоугольником отмечен день солнечной вспышки.

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. 7а) 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 реакция среды на внешнее воздействие, опережающая сейсмический отклик [Богомолов и др., 2006]. На этой фазе изменения затрагивают относительно высокие частоты (десятки Гц).

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И КАЧЕСТВЕННАЯ МОДЕЛЬ

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 маг-

нитными бурями. Было отмечено два эпизода прироста СКО сейсмического шума, опережающего начала магнитных бурь после вспышек 28.10.2003 г. и 4.11.2001 г., 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. До настоящего времени механизм электромагнитного влияния на сейсмический процесс не был описан с такой же степенью наглядности, как предложенный в [Орлов и др., 2008; 2009] гравитационный механизм, с возмущением внутреннего ядра Земли. Попробуем рассмотреть этот вопрос, используя известные результаты о стимулирующем влиянии вибраций, даже весьма слабых по амплитуде, на сейсмическую активность



**Рис. 7.** Кумулятивные зависимости суточного числа локальных (KNET) (а) и глобальных сейсмических событий (PDE) (б), полученные при совмещении одиннадцати периодов длительностью  $\pm 20$  суток от дат солнечных вспышек. Серым вертикальным прямоугольником отмечен день солнечной вспышки.

[Садовский и др., 1987; Мирзоев и др., 1987; 2009] и сейсмоакустическую эмиссию [Береснев, 1993].

Не вызывает сомнений, что при воздействии на геосреду электромагнитных импульсов и/или наведенных токов в ней возбуждаются колебания. Но при каких условиях уровень амплитуды этих колебаний может достигать характерных значений, обеспечивающих виброактивацию? Вопрос сводится к сравнительному анализу механизмов возбуждения колебаний. В работах по взаимосвязи электромагнитных и деформационных полей в земной коре, в частности, по физическим основам метода сейсмоэлектроразведки [Потапов и др., 1995], рассматриваются следующие механизмы преобразования электрической энергии в механическую: обратный пьезоэлектрический эффект, пондермоторные силы и термическое расширение при нагреве среды. По оценке, основанной на сравнении лабораторных и натуральных экспериментов [Богомолов и др., 2001; 2006], эффект виброактивации роста трещин или межблоковых подвижек проявляется, когда амплитуда колебания давления становится порядка  $10^{-6}$  от уровня главного напряжения в среде. Эта оценка согласуется с результатами работ [Садовский и др.,

1981; Кочарян и др., 2006] об изменении характера режима деформации при динамическом смещении (отождествляемом с амплитудой вибраций) более чем на 0.1–0.5 микрон. Однако вышеперечисленных, традиционно рассматриваемых механизмов электромеханической взаимосвязи недостаточно для объяснения генерации вибраций с такими амплитудами. Сначала остановимся на возможном вкладе каждого из этих, традиционно рассматриваемых механизмов, а затем обсудим модель, в большей степени учитывающую специфику задачи – фактор резкости, крутизны нарастания возмущений.

Для обратного пьезоэффекта оценочный расчет проведен в работе [Ярославский, Капустян, 1990], согласно которой только для весьма высоких значений напряженности электрического поля  $E \sim 3 \times 10^5$  В/м в кварцсодержащей среде могут получаться добавочные напряжения  $\Delta\sigma \sim 10^3$  Па. Наличие таких полей на поверхности Земли допускалось вблизи грозных облаков. Если принять во внимание, что некоторое влияние на трещинообразование могут оказывать и меньшие  $\Delta\sigma \sim 20\text{--}200$  Па (что соответствует  $10^{-6}$  от уровня литостатических напряжений на глубинах 1–10 км), то, в силу линейности пьезоэффекта, требования к напряженности электрического поля снизятся пропорционально до  $E \sim 0.6\text{--}6 \times 10^3$  В/м. Но и это значение слишком велико и вряд ли достигается при магнитных бурях (но вдали от грозных облаков). Следовательно, обратный пьезоэффект может играть роль в откликах среды на электромагнитные импульсы только при условии, что локально, на микроуровне, наводятся поля с аномально большой напряженностью  $E$ .

Термический эффект электромагнитных возмущений фактически изучался в работе [Авагимов и др., 2005], так как он связан с рассматриваемыми в ней распределениями потока энергии электромагнитного поля (абсолютными значениями вектора Умова–Пойнтинга). Согласно этой работе механизм, связанный с нагревом среды, может быть существенным для зон с достаточно высокой электропроводностью. Однако при неполноте информации о теплоемкости и теплопроводности пород на глубинах в десятки км возможности анализа тепловых (термических) эффектов ограничены весьма грубыми приближениями. При неочевидной общности результата [Авагимов и др., 2005], представляет интерес поиск других механизмов влияния магнитных бурь.

При оценках возможности непосредственного вклада пондермоторных сил в возбуждение колебаний давления с достаточной высокой амплитудой удобно воспользоваться следующим выражением для плотности пондермоторной силы в сжимаемых и, вообще говоря, неоднородных диэлектриках [Ландау, Лившиц, 1982].

$$f = \rho_E E + f_{el} = \rho_{ст} E + (\epsilon_0/2) \text{grad}[E^2 \rho(\partial\epsilon/\partial\rho)] - (\epsilon_0/2) E^2 \text{grad } \epsilon, \quad (1)$$

где  $\rho_E$  — плотность избыточных (сторонних) электрических зарядов,  $\varepsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость,  $\varepsilon_0$  — проницаемость вакуума,  $\rho$  — массовая плотность. Для упрощения и наглядности использовано изотропное “жидкостное” представление, материал описывается одним параметром — плотностью  $\rho$ , что позволяет сфокусироваться на главном, не отвлекаясь на детали тензорного описания.

Присутствие свободных заряженных частиц в геосреде определяется флюидами-электролитами, заполняющими трещинно-поровое пространство. Кроме того, как отмечено в работах [Корнфельд, 1975; Боев, Гаханов, 1980; Freund, 2000], разрушение диэлектрического материала на микроуровне при трещинообразовании в геосреде может сопровождаться диссоциативным высвобождением зарядов, переносимых вакансионными дефектами. Взаимодействие этих зарядов с внешним электрическим полем описывается первым слагаемым в (1), линейным по напряженности  $E$ . Прочие, квадратичные по  $E$  слагаемые описывают электростриксию. В выражении (1) плотность сил электрострикции можно переписать в форме

$$f_{el} = (\varepsilon_0/2)\rho(\partial\varepsilon/\partial\rho)\text{grad } E^2 + (\varepsilon_0/2)E^2[\text{grad } \rho(\partial\varepsilon/\partial\rho) - \text{grad } \varepsilon], \quad (2)$$

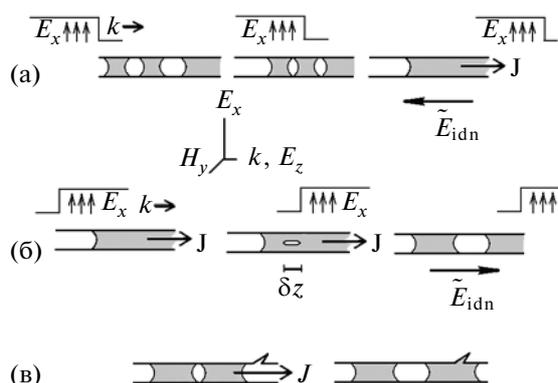
Во многих случаях для практических оценок считается, что разность  $\varepsilon - 1$  примерно пропорциональна плотности, так что  $\rho(\partial\varepsilon/\partial\rho) \approx \varepsilon - 1$ , а второе слагаемое в (2) есть малое более высокого порядка. Тогда напряжения, действующие вследствие пондермоторных сил на границе поляризуемого тела или блока напряжений, описываются известной формулой

$$\Delta\sigma \cong \rho_S E + (\varepsilon_0/2)(\varepsilon - 1)E^2/2, \quad (3)$$

где  $\rho_S$  — поверхностная плотность заряда, которая в некоторых случаях (растрескивание в ионных кристаллах, [Финкель, 1977]) может достигать  $3 \times 10^{-3} - 10^{-2}$  Кл/м<sup>2</sup>. При этом напряжения  $\Delta\sigma \sim 100$  Па получаются при напряженности поля  $E \sim (1-3) \times 10^4$  В/м. Выражение (3) дает малые оценки для напряжений, вызванных электростриксией. Действительно, при тех же значениях  $E$  и даже в случае аномальных  $\varepsilon \sim 10^3$  [Черняк, 1987],  $\Delta\sigma$  заведомо не превышает 10 Па. Однако нужно заметить, что в среде с дилатансионными трещинами вклад электрострикции может быть больше на несколько порядков, так как в этом случае фактор  $\rho(\partial\varepsilon/\partial\rho)$  в исходном выражении (1) становится аномально большим, зависящим не только от плотности, и расчет по упрощенной формуле (3) некорректен. Физический смысл аномалии электрострикции, описываемой фактором  $\rho(\partial\varepsilon/\partial\rho)$ , заключается в том, что при возникновении новых поверхностей (рост трещин) могут происходить резкие изменения поляризации (в частности, из-за по-

ступления воды и образования пленок на новых поверхностях) при изменениях  $\rho$  более высокого порядка малости, т.е. за счет электрохимических превращений без существенного массопереноса. Но и снижение пороговой напряженности поля  $E_{\min}$ , генерирующего пульсации  $\Delta\sigma \sim 100$  Па, до значений 10–100 В/м оставляет вопрос о реальности возбуждения таких локальных полей. Для положительного ответа на этот вопрос ниже рассмотрим один из возможных механизмов, связанный с особенностью резкого нарастания и убывания тока в каналах с проводящим флюидом. Предварительно заметим, что выбор пороговых значений  $E_{\min}$  основан не только на соображениях о факторе  $\rho(\partial\varepsilon/\partial\rho)$ , но и на результатах недавних экспериментов на гранитных образцах [Gavrilov et al., 2008]. В этих экспериментах продемонстрирована возможность снижения амплитуды напряженности электрических импульсов, вызывающих отклик АЭ нагруженных образцов, до уровня  $E \sim 50$  В/м (почти в 20 раз меньше, чем для типовых параметров воздействия при лабораторных исследованиях электромагнитного влияния [Закупин и др., 2006]). Естественно предположить, что и в природных условиях порог  $E_{\min}$  имеет такой же порядок величины.

Токи, наводимые в земной коре при естественных и искусственных электромагнитных возмущениях, концентрируются в каналах с проводящей жидкостью [Барсуков, 1979]. В условиях тектонической расслоенности коры Тянь-Шаня [Макаров, 1977; Белов и др., 1990] такие каналы располагаются на границах слоев. Вблизи дневной поверхности токопроводящие каналы, несомненно, существуют в разломных зонах. Рассмотрим случай токового канала в полости дилатансионной трещины (рис. 8). Будем считать жидкость смачивающей и не слишком вязкой. При расширении полости трещины жидкий объем может распадаться на несколько капель, способных перемещаться относительно стенок и друг относительно друга. Между каплями — насыщенный пар. И обратно, при частичном водозаполнении полости отдельные капли могут объединяться, в частности, при сближении стенок. Если объединение капель происходит как раз при приходе фронта импульса, сопротивление будет резко убывать, а нарастание тока будет более быстрым, чем в случае омического проводника. При быстром, пробойном формировании токового канала, в диэлектрической среде вокруг него будет наводиться противоЭДС, с напряженностью поля  $E$ , которая может существенно превысить амплитудное значение в падающей волне. Взаимодействием наведенного поля с пьезоэлектрическими фракциями и сторонними зарядами в скелетном веществе можно объяснять возбуждение колебаний, стимулирующих рост трещин во вмещающей среде (рис. 8а). При прохождении фронта спадания волны аналогичным образом может происходить быстрый разрыв токового канала в жидкости (рис. 8б) и индуцироваться “перенапряже-



**Рис. 8.** Гипотеза каналного механизма. Для распространяющегося в направлении  $k$  электромагнитного импульса фронты нарастания/спада амплитуды поперечной компоненты  $E_x$  опережают соответствующие фронты тока  $J$ : (а) – вступление мощного импульса – формирование токового канала при слиянии жидких объемов в полости; (б) – разрыв токового канала после прохождения импульса; (в) – эффект, сопутствующий случаю (б), – перемещение столба жидкости в канале может подкачивать ее в трещины, сопряженные с основной полостью.

ние” в окружающей области. В отличие от подхода перколяции возникновение “бесконечного кластера”, т.е. в данном случае токового канала, не рассматривается как чисто необратимый процесс. Схематически описанный механизм может работать многократно в случае повторяющихся электромагнитных импульсов достаточно большой мощности. Одним из вторичных эффектов, сопровождающих перемещение столба жидкости при разрыве канала, может быть более интенсивное поступление воды к вершинам трещин, ответвляющихся от рассматриваемой трещины – канала (рис. 8в), что в последствии оказывает существенное влияние на их дальнейший рост [Соболев и др., 2006].

Используя приближение “телеграфного” уравнения для распространения электромагнитной волны, легко оценить, при каком условии становится возможным быстрый разрыв токового канала. Для упрощения будем считать, что волна электрического (по поляризации) типа распространяется по направлению, совпадающему с продольной осью полости (рис. 8б). Рассматриваются случаи мощностей, когда тепловыми эффектами, приводящими к взрыву проводника, заведомо можно пренебрегать. Будем также считать, что равновесие стенок полости обеспечивается распределением напряжений в твердой фазе, так что изменения в жидкости внутри полости можно рассматривать независимо от параметров состояния твердой фазы. Это существенно упрощает задачу по сравнению с общим подходом в работе [Назаров, Радостин, 2007], где рассматривались совместные колебания тела с трещиной и жидкости, частично заполняющей трещину. Чтобы на некотором

сегменте  $\delta z$  (рис. 8б) произошел разрыв жидкого проводника с током  $J$ , нужно, чтобы часть энергии поля  $L\delta z J^2/2$  ( $L$  – индуктивность единицы длины) пошла на образование новых поверхностей в жидкости и работу по раздвиганию жидких объемов, т.е. быстро диссипировала. Но для этого, прежде всего, необходимо, чтобы потенциально высвобождающаяся энергия превышала энергетические затраты. Соответствующее условие записывается в форме

$$L\delta z J^2/2 \geq 2\gamma s\delta z + p_0 s w \delta z, \quad (4)$$

где  $\gamma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, отождествляемый, как и в задаче Гриффитса, с энергией образования новых поверхностей,  $w$  – ширина, т.е. узкий размер канала,  $s$  – характерный размер по простиранию (перпендикулярно плоскости рис. 8),  $p_0$  – давление жидкости. В правой части (4) первое слагаемое представляет собой энергию образования двух новых поверхностей с площадью  $s\delta z$ , второе – работу против давления  $p_0$  при перемещении границы жидкости. В условии (4) принято во внимание, что для гидрофильных поверхностей энергия десорбции поверхностной пленки флюида больше, чем энергия образования новых поверхностей. При этом остающаяся на поверхности пленка связанной жидкости (монослой молекул) не обеспечивает прохождение тока. При небольшой ширине канала  $w$  условие (4) сводится к простому выражению

$$J \geq 2(\gamma s/L)^{1/2}, \quad (5)$$

смысл которого сходен с критерием Гриффитса – разрывная неустойчивость реализуется в ослабленных местах при локализованном накоплении там достаточной энергии. В классическом случае это происходит с трещиной, а в нашем случае – в жидкой фазе в полости трещины (рис. 8б). Если выбрать для оценки  $\gamma \sim 0.05$  Н/м (вода при температуре 70–90°C),  $L \sim 0.01$ – $0.1$  мГн/м,  $s \sim 0.1$ – $1$  м, то выражение (5) будет описывать минимальную для реализации эффекта амплитуду тока в одиночном канале (полости)  $J \sim 50$  А. Критическое для эффекта значение тока может быть и меньше при комбинированном воздействии электромагнитной волны и сейсмозолн от близкого землетрясения. В зонах кластеризации сейсмичности слабые события следуют с достаточной частотой, так что, при длительности магнитной бури сутки и более, такое совпадение по времени (комбинированное воздействие) отнюдь не является невероятным. Если при формировании токового канала (нарастании тока) приходит волна сжатия, уменьшающая просвет в полости, это облегчает и ускоряет слияние капель и нарастание  $J$ . Аналогично, если на фазе спада тока приходит волна растяжения в направлении, нормальном к плоскости простирания полости, то это подтолкнет разрыв сплошного канала. С такого рода комбинационными эффектами, возможно, связана приуроченность зон, где наиболее выражена реак-

ция среды на магнитные бури, к местам концентрации средней сейсмической активности.

При распаде токового канала, наряду с вышеупомянутой ЭДС во вмещающей среде, генерирующей колебания, могут возбуждаться упругие волны непосредственно в канале. Это происходит с достаточной эффективностью при выполнении условия, что характерное время распада тока и высвобождения энергии меньше или порядка времени пробега упругой волны (фактически, условие фазового резонанса в некоторый момент времени):

$$\delta z (LC)^{1/2} \leq \delta z / V_S, \text{ т.е. } V_S (LC)^{1/2} \leq 1. \quad (6)$$

В выражении (6) новые обозначения:  $C$  — емкость единицы длины канала,  $V_S$  — скорость упругих (звуковых возмущений в жидкости). Отметим, что величина  $1/(LC)^{1/2}$  представляет собой скорость распространения электромагнитной волны в приближении “телеграфного” уравнения, поэтому условие (6) выполняется в типичном случае. Таким образом, для среды с трещинами, частично заполненными жидкостью, имеются механизмы (или, другими словами, элементарные процессы) электромеханического взаимодействия, с которыми можно связывать наблюдаемые эффекты сейсмических вариаций при электромагнитных возмущениях естественной или искусственной природы. Механизм специфичен, он может функционировать только в отдельных подобластях среды, где выполняются необходимые условия, и это позволяет понять всю сложность обнаружения влияния электромагнитных возмущений методами статистического анализа параметров сейсмичности, который по необходимости проводится по всему изучаемому объему геосреды [Тарасов и др., 1999; Сычев, 2008; Chelidze et al., 2006]. Выдвинутая гипотеза механизма электромеханической взаимосвязи “на крутых фронтах” допускает прямую проверку, поскольку из нее вытекает предсказание, что в зонах по месту возникновения откликов на магнитную бурю должно резко (с высокой частотой) меняться электросопротивление. Но проведение достаточно точных измерений электросопротивления в период магнитных бурь может представлять самостоятельную проблему. Авторы намерены рассмотреть этот вопрос в следующих работах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ СКО сейсмического шума в период крупных солнечных вспышек, произошедших в 2000–2006 гг., которые сопровождалась 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. Для интерпретации полученных результатов и в развитие представлений о влиянии на сейсмичность токов в Земле, наводимых при мощных естественных и искусственных электромагнитных возмущениях, предложена каналовая модель, описывающая первичное преобразование электромагнитной энергии в колебательную (механическую) энергию. Модель указывает причину, по которой крутизна фронтов электромагнитных импульсов может играть принципиально важную роль в эффекте возникновения откликов среды. Получена оценка для минимальной амплитуды тока, концентрирующегося в проводящих каналах в трещиноватой водонасыщенной среде, при возбуждении и разрывах которого могут иметь место динамические эффекты. Следствием этих динамических эффектов (микроударов при схлопывании полости, генерации вторичных электромагнитных полей) является более интенсивное поступление воды к устьям трещин, что, в конечном счете, инициирует сейсмические события.

Авторы признательны А.А. Авагимову и Г.А. Соболеву за полезные обсуждения ряда вопросов по теме работы на различных этапах ее выполнения.

Настоящее исследование осуществлено частично благодаря проекту по Программе № 15 фундаментальных исследований Президиума РАН и грантам РФФИ № 07-05-00687а, 09-05-00687а, 09-05-00919а.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Файнберг Э.Б.* О пространственно-временной структуре сейсмичности, вызванной электромагнитным воздействием // Физика Земли. 2005. № 6. С. 55–65.
- Багаев С.Н., Орлов В.А., Фомин Ю.Н., Чеботаяев В.П.* Гетеродинные лазерные деформографы для прецизионных геофизических измерений // Физика Земли. 1992. № 1. С. 85–91.
- Барсуков О.М.* Возможная причина электрических предвестников землетрясений // Изв. РАН. Сер. Физика Земли. 1979. № 8. С. 85–90.
- Белов А.А., Буртман В.С., Зинкевич В.П. и др.* Тектоническая расслоенность литосферы и региональные геологические исследования. М.: Наука. 1990. 293 с.
- Береснев И.А.* Сейсмическая эмиссия, наведенная вибровоздействием. Разработка концепции мониторинга природно-технических систем. М. 1993. Т. 2. С. 80–84.
- Богомолов Л.М., Манжиков Б.Ц., Сычев В.Н., Трапезников Ю.А. и др.* Виброупругость, акустопластика и акустическая эмиссия нагруженных горных пород // Геология и геофизика. 2001. Т. 42. № 10. С. 1678–1689.

- Богомолов Л.М., Авагимов А.А., Сычев В.Н., Сычева Н.А. и др.* О проявлениях электротриггерной сейсмичности на Бишкекском полигоне (на пути к активному сейсмо-электрическому мониторингу). Активный геофизический мониторинг литосферы Земли / Ред. Гольдин С.В. Новосибирск: СО РАН. 2005. С. 112–116.
- Богомолов Л.М., Сычев В.Н., Ильичев П.В.* Феноменологическая модель потока возбужденных эмиссионных сигналов геосреды // Физика Земли. 2006. № 9. С. 71–80.
- Боев С.Г., Гаханов А.Н.* Заряжение монокристалла фтористого натрия при раскалывании // ФТТ. 1980. Т. 22. № 10. С. 3068–3079.
- 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.
- Закупин А.С., Сычев В.Н., Аладьев А.В., Богомолов Л.М. и др.* Взаимосвязь электрической поляризации и акустической эмиссии образцов геоматериалов в условиях одноосного сжатия // Вулканология и сейсмология. 2006. № 6. С. 22–33.
- Корнфельд М.И.* Электризация ионного кристалла при пластической деформации и расщеплении // УФН. 1975. Т. 116. № 2. С. 328–339.
- Кочарян Г.Г., Кулюкин А.А., Павлов Д.В.* Некоторые особенности динамики межблокового деформирования в земной коре // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 5. С. 669–683.
- Ландау Л.Д., Лившиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Наука. 2 изд. 1982. 620 с.
- Левин Б.В.* Роль движений внутреннего ядра Земли в тектонических процессах. Фундаментальные проблемы общей тектоники. М.: Научный мир. 2001. С. 444–460.
- Макаров В.И.* Новейшая тектоническая структура Центрального Тянь-Шаня. М.: Наука. 1977. 171 с.
- Мирзоев К.М., Негматуллаев С.Х., Дастури Т.Ю.* Влияние механических вибраций на характер высвобождения сейсмической энергии в районе водохранилища Нурекской ГЭС. Сейсмологические исследования в районах строительства крупных водохранилищ Таджикистана. Душанбе: Дониш. 1987. С. 101–119.
- Мирзоев К.М., Николаев А.В., Лукк А.А., Юнга С.Л.* Наведенная сейсмичность и возможности контролируемой разрядки накопленных напряжений в земной коре // Физика Земли. 2009. № 10. С. 49–68.
- Назаров В.Е., Радостин А.В.* Нелинейные волновые процессы в упругих микронеоднородных средах. Нижний Новгород: ИПФ РАН. 2007. 256 с.
- Орлов В.А., Панов С.В., Парушкин М.Д., Фомин Ю.Н.* О связи сейсмичности Земли с солнечной активностью по результатам прецизионных деформографических наблюдений. Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Новосибирск: изд-во Института горного дела СО РАН. 2008. С. 31–40.
- Орлов В.А., Панов С.В., Парушкин М.Д., Фомин Ю.Н.* Солнечная активность, колебания внутреннего ядра Земли, общепланетарная сейсмичность. Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы / Ред. Леонов Ю.Г. Бишкек. 2009. С. 321–326.
- Потапов О.А., Лизун С.А., Кондрат В.Ф. и др.* Основы сейсмоэлектроразведки. М.: Недра. 1995. 268 с.
- Ризниченко Ю.В.* Проблемы сейсмологии. Избранные труды. М.: Наука. 1985. 408 с.
- Садовский М.А., Мирзоев К.М., Нигматуллаев С.Х., Саломов Н.Г.* Влияние механических микроколебаний на характер пластических деформаций материалов // Физика Земли. 1981. № 6. С. 32–42.
- Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф.* Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука. 1987. 101 с.
- 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.
- Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В., Круглов А.А. и др.* Влияние инъекции воды на акустическую эмиссию при долговременном эксперименте // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 5. С. 608–621.
- Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия) / Отв. ред. Лавров Н.П., Макаров В.И. М.: Научный мир. 2005. 400 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 // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1989. № 2. С. 13–21.
- Сычева Н.А., Авагимов А.А., Богомолов Л.М., Зейгарник В.А. и др.* Корреляционный анализ данных КНЕТ в связи с электроимпульсным воздействием. Геодинамика и геоэкологические проблемы высокогорных регионов / Отв. ред. Гольдин С.В. и Леонов Ю.Г. Москва – Бишкек. 2003. С. 254–275.
- Сычева Н.А., Юнга С.Л., Богомолов Л.М., Мухамдиева В.А.* Сейсмотектонические деформации земной коры Северного Тянь-Шаня (по данным определений механизмов очагов землетрясений на базе цифровой сейсмической сети КНЕТ) // Физика Земли. 2005. № 11. С. 62–78.
- Сычев В.Н.* Исследование влияния импульсных энергетических воздействий на вариации пространственно-временных распределений сейсмичности на территории Северного Тянь-Шаня. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. М.: ИФЗ. 2008. 210 с.
- Сычев В.Н., Авагимов А.А., Богомолов Л.М. и др.* О триггерном влиянии электромагнитных импульсов на слабую сейсмичность. Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Новосибирск: изд-во Института горного дела СО РАН. 2008. С. 179–188.
- Сычев В.Н., Авагимов А.А., Богомолов Л.М., Сычева Н.А.* Аномальная магнитная буря после солнечной вспышки 5–6 декабря 2006 г. – тест концепции электромагнитного воздействия для разрядки избыточных напряжений в геосреде. Геодинамика внутриконтиненталь-

- ных орогенов и геоэкологические проблемы / Ред. Леонов Ю.Г. Бишкек. 2009. С. 331–334.
- Тарасов Н.Т.* Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии // Докл. РАН. 1997. Т. 353. № 4. С. 542–545.
- Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А.* Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана // Вулкано-логия и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 152–160.
- Финкель В.М.* Физические основы торможения разрушения. М.: Металлургия. 1977. 359 с.
- Черняк Г.Я.* Электромагнитные методы в гидрогеологии и инженерной геологии. М.: Недра. 1987. 213 с.
- Ярославский М.А., Капустян Н.К.* О возможности электросейсмического эффекта // Докл. АН СССР. 1990. С. 352–354.
- Chelidze T., De Rubeis V., Matcharashvili 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. № 4/5. P. 961–975.
- Freund F.* Time-resolved study of charge generation and propagation in igneous rocks // J. Geophys. Res. 2000. V. 105. B5. P. 11001–11020.
- Gavrilov V.A., Bogomolov L.M., Zakupina G.S.* The effect of the geoacoustic emission level modulation with natural electromagnetic field – comparison with the results of experiments. Proc. XX-th Session of the Russian Acoustical Society. Moscow. 2008. P. 195–198.