

## ВЛИЯНИЕ БОЛЬШИХ МАГНИТНЫХ БУРЬ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ БОЛЬШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

© 2021 г. Г. А. Соболев\*

*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия*

*\*E-mail: sobolev@ifz.ru*

Поступила в редакцию 17.03.2020 г.

После доработки 03.04.2020 г.

Принята к публикации 17.04.2020 г.

Сопоставлены времена возникновения на земном шаре землетрясений с магнитудой  $M \geq 6.5$  и сильнейших магнитных бурь с планетарными  $Kp$ -индексами больше 7. В интервале 1994–2017 гг. 17 землетрясений произошли в течение 2-х сут после 50 бурь, что соответствовало их неслучайному возникновению с вероятностью свыше 95%. Такие землетрясения располагались в восточном полушарии и отсутствовали в западном. Самая сильная буря сопровождалась возникновением непривливых движений земной поверхности по данным широкополосных сейсмических станций.

*Ключевые слова:* землетрясение, деформация, сейсмическая станция, магнитная буря, метеостанция.

**DOI:** 10.31857/S0002333721010087

### ВВЕДЕНИЕ

Будем придерживаться представления о том, что землетрясение есть явление, главным образом, механическое, что не исключает влияния на его возникновение разнообразных процессов [Соболев, 2011; Sobolev, 2011]. Соответственно, должны учитываться положения механики разрушения твердых тел. Макроразрушение деформируемого тела в условиях трехосного неравномерного сжатия материала твердой Земли наступает после того, как тектоническое напряжение превосходит предел длительной прочности. Среда долго находится в близком к этому пределу “метастабильном” состоянии, испытывая при этом флуктуации напряжений и прочности. Вызывающее землетрясение локальное динамическое разрушение массива горных пород может произойти в этих условиях при небольших по энергии внешних воздействиях. Их источники принято называть триггерами.

Массивы горных пород в литосфере разбиты разломами и неоднородны по составу пород, прочности и напряженному состоянию. С этим связано большое разнообразие триггеров по энергии и физическому механизму. Принципиальная трудность определения момента землетрясения состоит в том, что энергия эффективного триггера меняется в зависимости от того, насколько напряженный массив близок к пределу прочности. В работе [Авагимов, Зейгарник, 2008] показано, что порог триггера уменьшается по степенному закону по мере роста накопленной лабо-

раторным образцом потенциальной энергии. Теория неравновесных процессов предсказывает экспоненциальное возрастание вероятности перехода метастабильной системы к неустойчивости (катастрофе) по мере приближения уровня внешнего воздействия к максимуму потенциальной барьеры [Smelyanskiy et al., 1999].

Магнитные бури неоднократно исследовались в качестве триггеров, влияющих на сейсмичность [Барсуков, 1991; Соболев и др., 2001; Закржевская, Соболев, 2004; Тарасов, 2017; 2019; Rabeň et al., 2010; Urata et al., 2018]. Это связано не только с научным интересом к электромагнитно-механическим преобразованиям в Земле. Вызванные вспышками на Солнце бури надежно документируются, как и землетрясения, что позволяет сопоставлять данные геофизические процессы на количественном уровне. В ряде работ методом накопления эпох было выявлено статистически значимое изменение количества землетрясений умеренной энергии  $E > 10^7$  Дж при сильных бурях с уровнем планетарных  $Kp$ -индексов  $> 5$ . Однако отмечались противоречивые явления. В работах [Соболев и др., 2001; Закржевская, Соболев, 2004] было указано, что в одних областях сейсмоактивного района проявляется тенденция увеличения сейсмичности при бурях, а в других — сейсмичность убывает. Кроме того, степень проявления триггерного эффекта меняется для одних и тех же областей во времени. В отличие от предыдущих исследований в настоящей работе исследуются не обобщенные связи между данными явлениями,

как в методе накопления эпох, а проводится прямое попарное сопоставление самых мощных магнитных бурь и землетрясений высокой энергии.

## ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ

Сведения о сильных магнитных бурях получены из архива <http://www.spaceweatherlive.com>. В таблицах архива приведены значения планетарных  $Kp$ -индексов – возмущений магнитного поля Земли от нормы в течение трехчасовых интервалов соответствующих суток (GFZ Potsdam official  $Kp$ -index). Значения  $Kp$ -индексов лежат в диапазоне от 0 до 9. Во время очень сильных магнитных бурь значения  $Kp = 9$  проявляются в нескольких трехчасовых интервалах. В архиве приведен список 50 сильнейших магнитных бурь, произошедших за период 1994–2017 гг. Они расположены в порядке убывания  $Ap$ -индексов. Последние вычисляются по  $Kp$ -индексам за сутки, характеризуют среднесуточную планетарную амплитуду возмущения магнитного поля Земли в линейной шкале и измеряются в наноТеслах (нТл) в интервале значений от 0 до 280 нТл [[http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagn\\_Kp\\_ap\\_Ap\\_ind.ru.html](http://www.wdcb.ru/stp/geomag/geomagn_Kp_ap_Ap_ind.ru.html)]. Наиболее сильная буря в архиве GFZ Potsdam произошла 29.10.2003 г. ( $Ap = 204$ ), самая слабая – 17.03.2013 г. ( $Ap = 72$ ). Мы сопоставили все эти бури с временами возникновения больших землетрясений мира, характеризующихся магнитудами  $M_w \geq 6.5$ . Сведения о землетрясениях получены по системе ИНТЕРНЕТ из базы данных Earthquake Catalog – USGS (Significant Earthquakes Archive). Таким образом, использованные в настоящей работе данные по магнитным бурям и землетрясениям получены из независимых источников, не связанных с целью нашего исследования: выявить наличие или отсутствие влияния бури на землетрясения.

В колонках 1, 2, 3 табл. 1 перечислены по мере убывания параметра  $Ap$  все сильнейшие за период с 1994 по 2017 гг. магнитные бури в том виде, как они представлены в базе (GFZ Potsdam official  $Kp$ -index). В правой части табл. 1 приведены сведения о сопровождающих конкретную бурю землетрясениях с  $M_w \geq 6.5$ . Представлены только землетрясения, возникшие в те же, что и буря, или в следующие сутки. Их оказалось 17. Будем для сокращения называть “вызванные магнитной бурей землетрясения” термином ВМБЗ, отдавая себе отчет о физической условности этого символа. Бури в строках 1, 3 и 15 длились в общей сложности в течение 3-х сут: 29–31.10.2003 г. Землетрясение отнесено к 31 октября, а предыдущие бури 29 и 30 октября отмечены в табл. 1 звездочками. Похожая ситуация была с бурями 8–10.11.2004 г. Землетрясения отнесены к бурям 9 и 10 ноября, а буря 8 ноября отмечена звездочкой. В табл. 2 все 17 сопровождающих бури землетрясений перечислены по мере их возникновения во времени.

Сведения в последней колонке означают: 0 – землетрясение произошло в те же сутки, что и буря; 1 – на следующие сутки.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Из табл. 1 следуют, по-видимому, два вывода: 1) ВМБЗ происходили в разных районах земного шара и на разной глубине гипоцентра; 2) не отмечено закономерности ВМБЗ в зависимости от силы магнитной бури. Из представленных в Earthquake Catalog – USGS (Significant Earthquakes Archive) материалов, кроме того, следует, что ВМБЗ отмечены при разных механизмах их очагов. Сопоставление с земными приливами показало, что ВМБЗ возникали при различных фазах земных приливов; последние были вычислены по программе PETGTAB [Wenzel, 1999]. При сопоставлении табл. 1 и табл. 2 можно видеть, что в отдельные годы ВМБЗ возникали чаще относительно числа произошедших в этот год бурь (1994, 2004) или они отсутствовали, несмотря на случившиеся бури (2001 г. – при 6 бурях). Однако статистики недостаточно, чтобы указать на какую-то закономерность.

Рассмотрим пространственное распределение выявленных ВМБЗ. На рис. 1 показана карта эпицентров 935 землетрясений с  $M_w \geq 6.5$ , произошедших на Земле в интервале 1994–2017 гг. (кружки). Звездочками отмечены 17 ВМБЗ из табл. 2. Здесь видны некоторые особенности: 5 событий произошли в районе Японии и 9 – на юго-западе Тихого океана. В то же время ВМБЗ отсутствуют в континентальной части Азии, Северной и Южной Америке. Проведем небольшой статистический анализ. Выделим на карте рис. 1 пять зон с координатами: зона 1 [60 с.ш.–20 с.ш.; 100 в.д.–200 в.д. – вблизи Японии;]; зона 2 [20 с.ш.–20 ю.ш.; 100 в.д.–200 в.д. – Индонезия, Филиппины]; зона 3 [0–40 ю.ш.; 150–200 з.д. – Тонга]; зона 4 [20 с.ш.–40 ю.ш.; 50 з.д.–100 з.д. – Ю. Америка]; зона 5 [60 с.ш.–20 с.ш.; 100 з.д.–200 з.д. – С. Америка]. Обозначим число произошедших в мире землетрясений как  $N$ ; их число в выделенных 5 зонах:  $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5$  и число ВМБЗ в выделенных пяти зонах:  $n_1, n_2, n_3, n_4, n_5$ . В зоне 1 произошли  $N_1 = 134$  землетрясения при числе ВМБЗ  $n_1 = 5$ ; в зоне 2:  $N = 251, n_2 = 9$ ; в зоне 3:  $N_3 = 65, n_3 = 3$ ; в зоне 4:  $N_4 = 129, n_4 = 1$ ; в зоне 5:  $N_5 = 47, n_5 = 0$ .

Выделим на интервале наблюдения с 1994 по 2017 гг.  $T = 24 \times 365 = 8766$  сут сумму времени  $T_2 = 100$  сут (50 бурь по 2-е сут), в которую могли попасть интересующие нас ВМБЗ. На самом деле этот интервал времени был меньше, так как землетрясения происходили только в части тех суток, где была буря. Но мы выберем не оптимальный, а худший вариант с точки зрения оценки случайности или неслучайности попадания ВМБЗ в двух-

**Таблица 1.** Сильнейшие за 1994–2017 гг. магнитные бури и возникшие после них землетрясения

Буря	<i>Ap</i>	Землетрясение
2003/10/29	204	*
2001/03/31	192	
2003/10/30	191	*
2004/07/27	186	2004-07-28 03:56:28 0.443° S 133.091° E 13.4 6.5 Papua Ind
2000/07/15	164	2000-07-16 03:57:45 7.747° S 150.917° E 10 6.6 New Britain
2004/11/10	161	2004-11-11 17:34:52 11.128° S 162.208° E 20 6.6 Solomon Isl 2004-11-11 21:26:41 8.152° S 124.868° E 13 7.5 Indonez
2004/07/25	154	2004-07-25 14:35:19 2.427° S 103.981° E 582 7.3 Ug Sumatra
2003/11/20	150	
1998/08/27	144	
2001/11/06	142	
2004/11/08	140	
2000/08/12	123	
2004/11/09	119	2004-11-09 23:58:23 11.150° S 163.706° E 9 6.9 Solomon Isl.
1998/09/25	117	
2003/10/31	116	2003-10-31 01:06:28 37.812° N 142.619° E 20 7 Japan
2000/10/05	116	2000-10-06 04:30:19 35.456° N 133.134° E 10 6.7 Western Honshu Jap
2003/05/29	109	
2015/03/17	108	
2003/08/18	108	
2017/09/08	106	2017-09-08 04:49:19 15.022° N 93.899° W 47.4 8.2 Mexico
2001/11/24	104	
2005/08/24	102	
2005/09/11	101	
1998/05/04	101	
1995/04/07	100	1995-04-07 22:06:56 15.199° S 173.529° W 21.2 7.4 Tonga
1994/04/17	100	1994-04-18 17:29:54 6.470° S 154.934° E 26.3 6.7 Papua New Gvinea
2001/10/22	96	
1994/02/21	95	
2006/12/15	94	
2000/05/24	93	
1994/04/03	92	
2005/05/08	91	
1999/10/22	91	
2005/05/30	90	
1994/10/03	88	1994-10-04 13:22:55 43.773° N 147.321° E 14.0 8.3 Kuril Shikotan
2012/03/09	87	2012-03-09 07:09:50 19.125° S 169.613° E 16.0 6.7 Vanuatu
2005/05/15	87	2005-05-16 03:54:14 32.589° S 179.353° W 34.0 6.6 Kermadec Isl
2001/04/11	85	
2005/01/18	84	2005-01-19 06:11:36 34.064° N 141.491° E 27.8 6.6 Honshu Jap
2000/04/06	82	
1999/02/18	80	
2012/07/15	78	
2002/05/23	78	
2005/09/12	75	

Таблица 1. Окончание

Буря	$A_p$	Землетрясение
1998/11/09	75	1998-11-09 05:30:14 6.954° S 129.022° E 33.0 6.7 Tonga  2015-06-23 12:18:30 27.738° N 139.725° E 460 6.5 Western Japan
2015/10/07	74	
2000/04/07	74	
2015/06/23	72	
2013/03/17	72	

Таблица 2. Последовательность во времени возникших после бурь землетрясений с  $M_w \geq 6.5$ 

Год	Мес	Сут	Ч:Мин	Шир	Долг	Глуб	$M_w$	$dt$
1994	4	18	17:29	-6.47	154.93	26	6.7	1
1994	10	4	13:23	43.83	147.33	14	8.3	1
1995	4	7	22:06	-15.33	-173.4	32	7.4	0
1998	11	9	5:30	-6.994	128.92	34	6.7	0
2000	7	16	3:57	-7.77	150.96	10	6.6	1
2000	10	6	4:30	35.38	133.17	10	6.7	1
2003	10	31	1:06	37.87	142.59	20	7	0
2004	7	25	14:35	-2.427	103.98	582	7.3	0
2004	7	28	3:56	-0.443	133.091	13	6.5	1
2004	11	9	23:58	-11.14	163.79	9	6.9	1
2004	11	11	17:34	-11.17	162.26	20	6.6	1
2004	11	11	21:26	-8.18	124.71	13	7.5	1
2005	1	19	6:11	34.06	141.51	20	6.6	1
2005	5	16	3:54	-32.86	-179.19	63	6.6	1
2012	3	9	7:09	-19.12	169.61	16	6.7	0
2015	6	23	12:18	27.738	139.72	460	6.5	0
2017	9	8	4:49	15.07	-93.72	51	8.2	0

суточные интервалы после бурь. Предположим, что наблюдается пуассоновский поток событий. Если они “выпадают” на интервал времени случайно и независимо друг от друга, то вероятность попадания в интервал  $n$  событий из  $N$  подчиняется биномиальному распределению и определяется по формулам:

$$p_N(n) = C_N^n p^n (1-p)^{N-n}, \quad \text{где } p = \frac{T_2}{T}, \quad (1)$$

$$C_N^n = \frac{N!}{n!(N-n)!}.$$

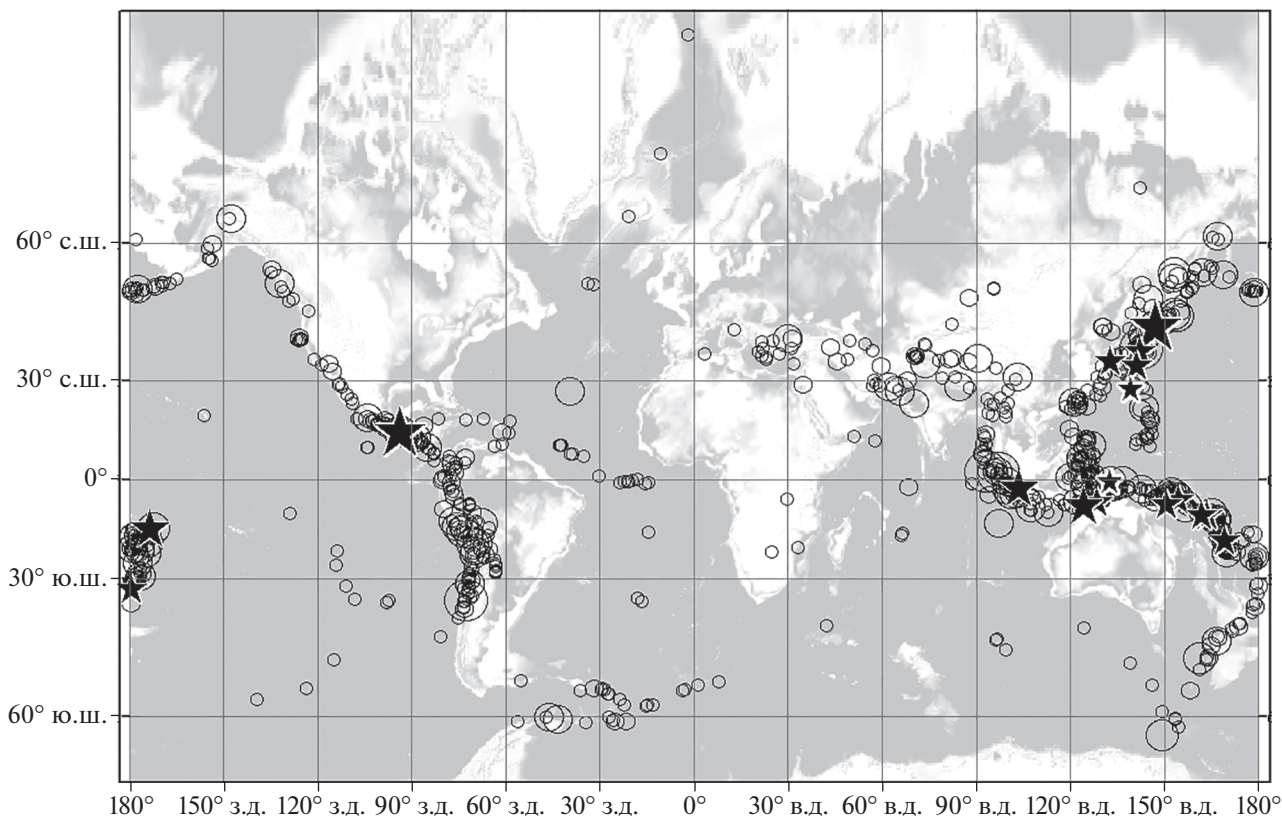
Уровень значимости того, что число “успехов”  $n$  не подчиняется биномиальному распределению и попадание в подинтервал  $T_2$  не является случайным, равен:

$$\alpha = \sum_{n=N_2}^N p_N(n). \quad (2)$$

Оценки значимости по формуле (2) неслучайного появления ВМБЗ на всем земном шаре и в зонах

1, 2, 3 соответствуют следующим величинам:  $\alpha (935 - 17) = 0.0241$ ;  $\alpha (134 - 5) = 0.0046$  – зона 1;  $\alpha (251 - 9) = 0.0007$  – зона 2;  $\alpha (65 - 3) = 0.0066$  – зона 3. Они меньше критического значения  $\alpha = 0.05$ . Это означает, что с вероятностью  $>0.95$  можно принять гипотезу 1 о том, что появление землетрясений после бурь в зонах 1–3 (Япония, Индонезия–Филиппины, Тонга) было не случайным. Привлекает внимание отсутствие ВМБЗ в регионах Американского континента, несмотря на измеримую с восточным полушарием сейсмичность.

Рассмотрим различные аспекты обсуждаемой связи между бурями и землетрясениями на примере зоны 1 (рис. 2). Из представленной на рис. 2 карты следует, что ВМБЗ происходили в разных местах. Одно землетрясение [37.87 с.ш.–142.59 в.д.],  $M = 7$  случилось в области будущего мегаземлетрясения Тохоку. Оно произошло на заключительной стадии магнитной бури, длившейся 29–31 октября 2003 г. В первую очередь, нас интересует вопрос: можно ли выявить связанные с бурей



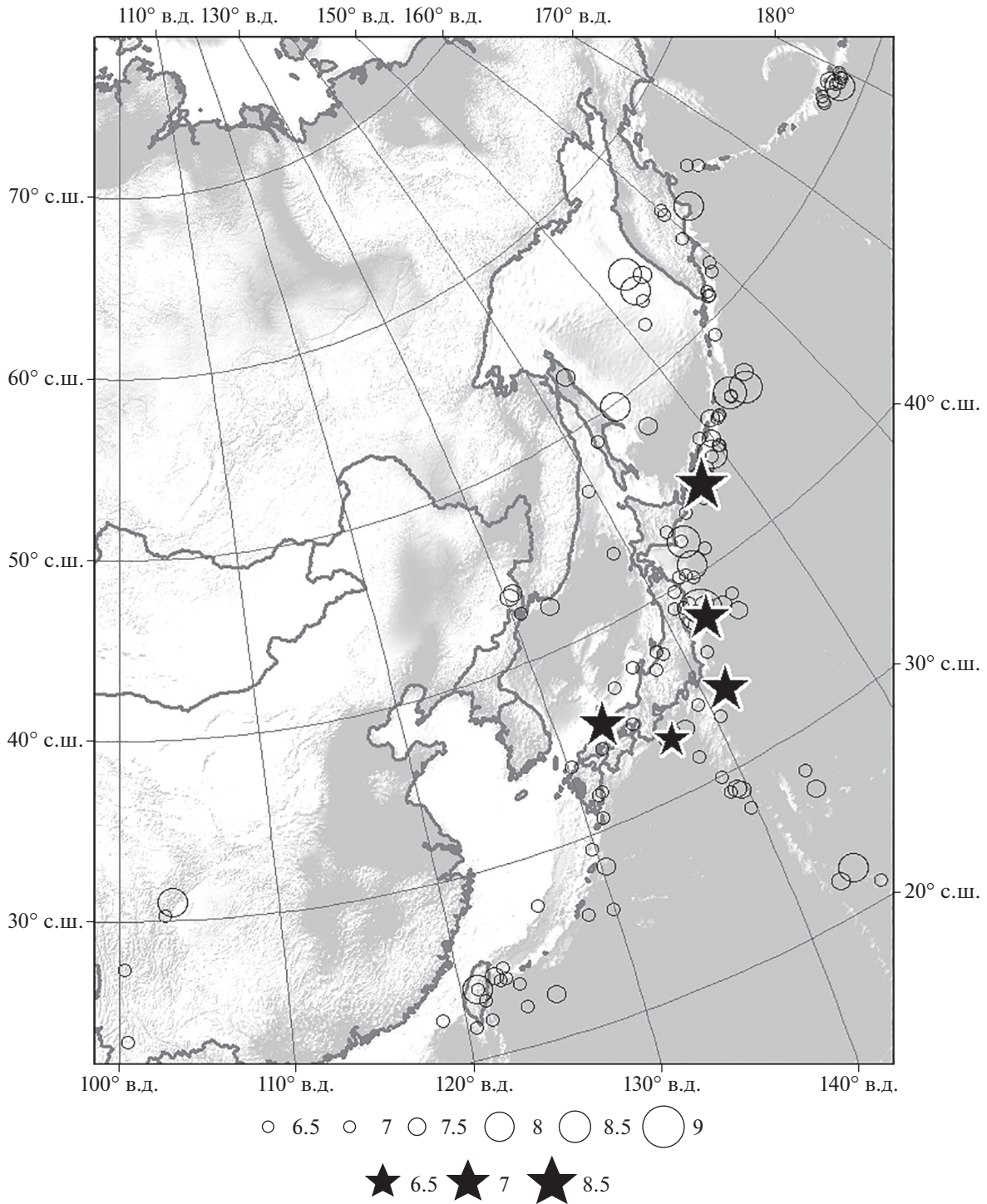
**Рис. 1.** Землетрясения земного шара за 1994–2017 гг. с  $M_w \geq 6.5$ . Звездочками обозначены 17 событий, произошедших в течение 2-х суток после бурь, перечисленных в табл. 1 и табл. 2.

тектонические изменения в литосфере? В 400 км от эпицентра данного землетрясения в Японии находится широкополосная сейсмическая станция MAJO [36.55 с.ш.–138.20 в.д.] системы IRIS, оснащенная велосиметром STS-1 [Wieland, Streckeisen, 1982]. Чувствительность канала STS-1 составляет на периоде 360 с примерно 1 отсчет при скорости изменения перемещения грунта в 1 нм/с. В сторону более длительных периодов колебаний чувствительность уменьшается в 100 раз с ростом периода на порядок. Этого достаточно, чтобы уверенно регистрировать скорость колебаний земных приливов с периодами 12 и 24 ч, при которых вертикальные перемещения земной поверхности достигают 400 мм [Мельхиор, 1968], а скорости изменения составляют  $\sim 2$  мм/мин.

Мы использовали данные этой станции, полученные по системе INTERNET. Записи с дискретизацией 1 отсчет в секунду были приведены осреднением к отсчетам через 10 с. Затем подавлялись вариации микросейсм секундного диапазона периодов с применением высокочастотного фильтра Гаусса с радиусом 30 точек [Hardle, 1989; Любушин, 2007]. При вычислениях применялась программа А.А. Любушина SpAn [<http://window.edu.ru/library/pdf2txt/967/71967/49364>]. В резуль-

тате фильтрации спектр мощности отражал вариации в диапазоне от 15 мин до десятков часов. Полученные временные ряды сглаживались осреднением до частоты 1 отсчет в минуту и сравнивались с теоретическими значениями земных приливов в точке расположения станции MAJO, вычисленными по программе PETGTAB [Wenzel, 1999].

На рис. 3 представлены результаты сопоставления теоретического прилива (далее – прилива), записи вертикального сейсмического канала LHZ и вариаций геомагнитного поля с 22.10.2003 г. по 11.11.2003 г. График 1 демонстрирует вертикальные перемещения поверхности Земли приливного происхождения  $D$ ; график 2 – производную по времени, т.е. скорость изменения прилива  $dD$ . График 3 соответствует записи вертикального сейсмического канала  $dS$ ; при этом значения вариаций уменьшены в  $10^3$  раз, чтобы представить их в едином масштабе с амплитудой минутных теоретических значений скорости изменения прилива на графике 2. В графиках 1, 2, 3 хорошо выражены 12-часовые колебания. Коэффициент корреляции значений сейсмического канала (график 3) и скорости теоретического прилива (график 2) достигает 0.99. Это позволяет вычис-



**Рис.2.** Землетрясения вблизи Японии (зона 1) за 1994–2017 гг. Звездочками обозначены 5 событий, произошедших в течение 2-х суток после бурь, перечисленных в табл. 1 и табл. 2.

лять разность колебаний, регистрируемых сейсмическим каналом, по сравнению с приливом  $dif = dS - dD$  (график 4). Стрелкой обозначено землетрясение 31.10.2003 г. Оно случилось при затухании бури, максимальные значения при которой от-

мечены пиками  $Kp$ -индексов 29, 30 и 31 октября (7–9 сутки на графике 5). График  $Hx$  соответствует изменениям напряженности геомагнитного поля на обсерватории Какиока [36.23 с.ш.–140.18 в.д.], расположенной в 150 км от сейсмической стан-

ции МАЮ. Представлена горизонтальная компонента, отчетливо демонстрирующая динамику бури. Наиболее сильное отклонение от нормального фона (300 нТл) опережало землетрясение в данном случае на 4 ч.

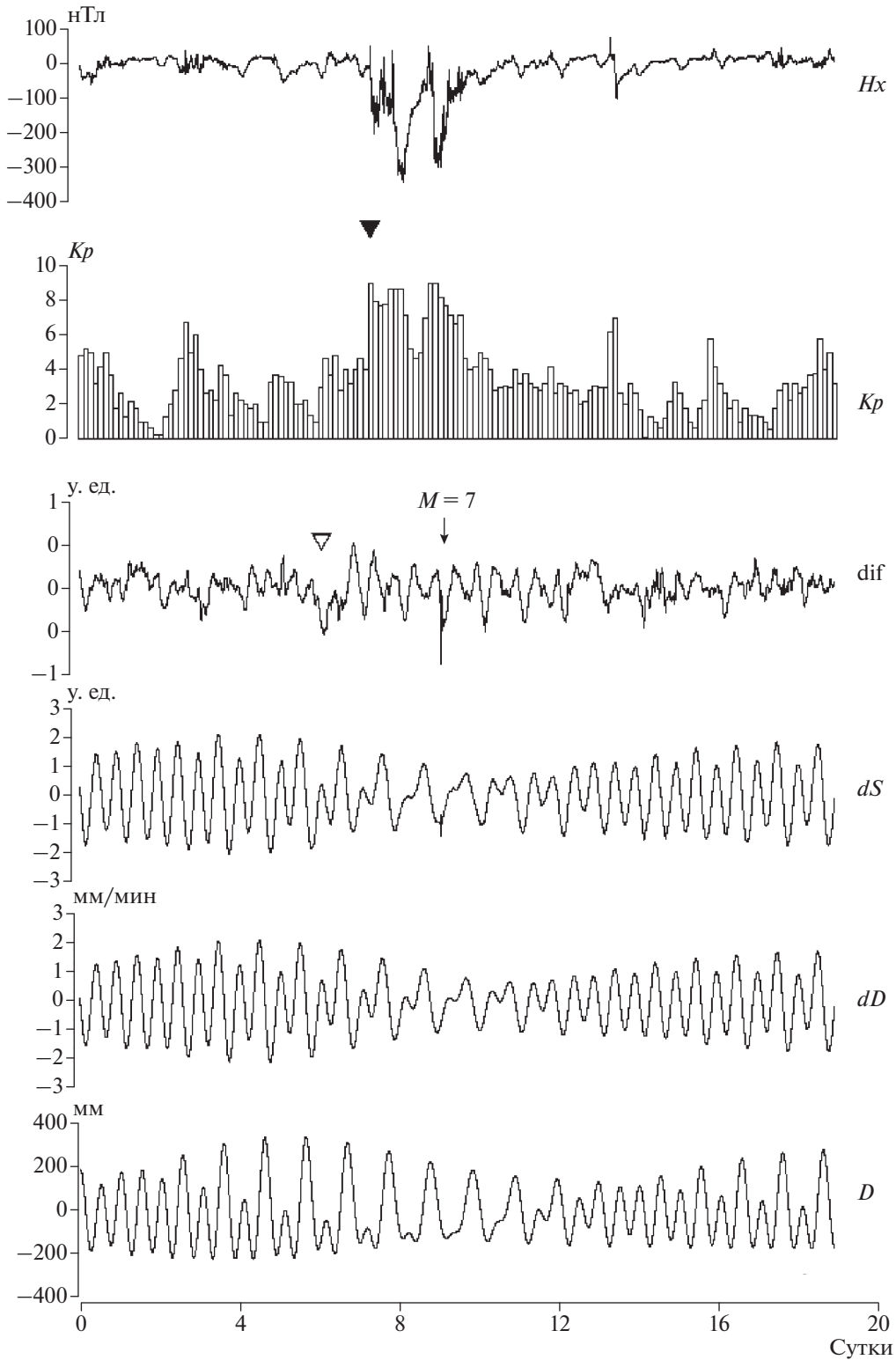
Отметим интересную особенность: выделенные светлым треугольником изменения  $dif$  на сейсмическом канале (график 4) произошли за сутки до начальной фазы бури (темный треугольник). Такие эффекты описаны в работах [Тарасов, 2017; 2019], где исследовалось влияние магнитных бурь на землетрясения с  $M > 4.4$ . Автор связывал это явление с приходом к Земле порожденного солнечной вспышкой ионизирующего электромагнитного излучения Солнца. У нас нет пока достаточных фактов, чтобы обсуждать этот механизм в настоящей работе. Но значимость изменений подтверждается формальным анализом. Мы применили критерии проверки сходства или различий выборки Колмогорова–Смирнова, Ансари–Бредли–Вилкоксона и  $t$ -test при их последовательном сопоставлении по ходу значений  $dif$  на рис. 4. Длина каждой из выборок составляла 2880 минутных значений (2-е сут). Выяснено, что включавшая отмеченный светлым треугольником интервал выборка характеризовалась величиной  $\alpha < 0.05$ . Это меньше критического значения и позволяет принять гипотезу 1 об аномальных отклонениях от фона зарегистрированных сейсмической станцией движений еще за сутки до бури 29–31.10.2003 г.

Итак, последовавшее после бури землетрясение под Тихим океаном произошло на фоне изменения деформации земли в центральной Японии. Возможно, эти изменения были чисто локальными возле станции МАЮ. Для проверки такого предположения мы проанализировали записи аналогичной широкополосной станции MDJ [44.62 с.ш.–129.59 в.д.], расположенной на Азиатском континенте в 1190 км от станции МАЮ. Результаты для станции MDJ представлены на рис. 4 при такой же обработке, как и для станции МАЮ. Значения теоретического прилива и его производной по времени (графики 1 и 2) рассчитаны для точки расположения станции MDJ. График 5 отражает планетарные индексы  $Kp$ , в связи с чем он повторяется на рис. 3 и рис. 4 без изменений. График  $Hx$  демонстрирует в этом случае изменения напряженности геомагнитного поля на обсерватории ММВ (Memambetsu) [43.91 с.ш.–144.19 в.д.]. Это ближайшая к MDJ обсерватория, расположенная примерно на той же широте; хорошо известно, что напряженность поля во время бури мало меняется вдоль широты. Сравнение рис. 3 и рис. 4 приводит к такому выводу: расположенная на азиатском континенте станция MDJ демонстрировала отклонения деформаций от прилива (график 4), предвещающие и сопровождающие магнитную бурю. Сравнение результатов

анализа по этим двум станциям дано на рис. 5. Первые превышающие фон импульсы начались одновременно (белый треугольник); они опережали максимум бури ( $Kp = 9$ ) на сутки. Совпадают также времена больших импульсов перед землетрясением.

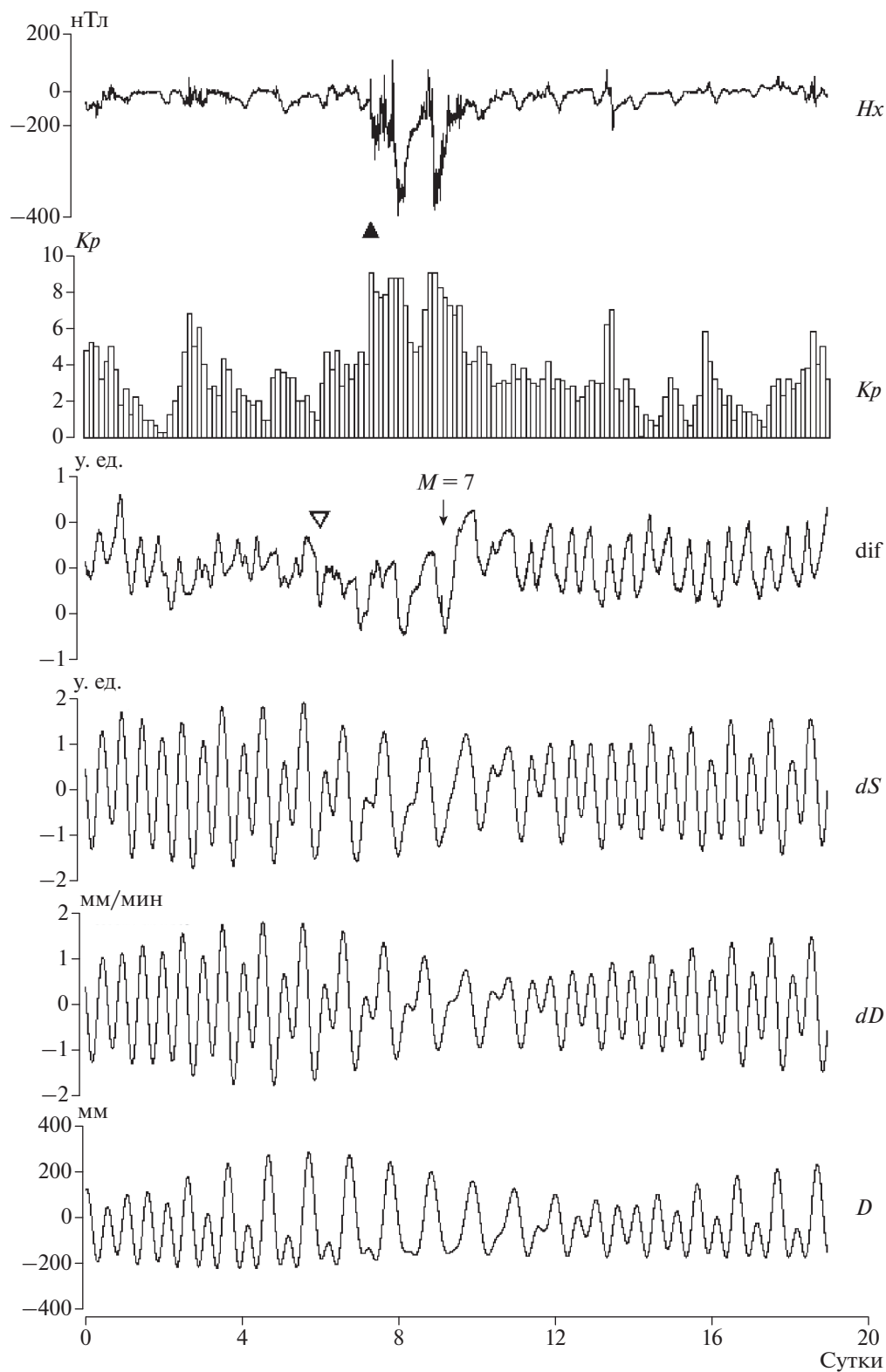
Таким образом, деформации при буре проявились как в зоне субдукции, так и на континенте на расстоянии между точками измерений 1200 км. В связи с этим можно предположить, что они были также и в районе землетрясения 31.10.2003. Физический механизм их генерации при буре остается невыясненным. Какой еще процесс мог повлиять на появление землетрясения? В работе [Соболев, Закржевская, 2020] отмечалось, что на возникновение землетрясений влияют резкие перепады атмосферного давления. Мы проверили, какая погода была в Японии во время бури 29–31.10.2003 г. и последовавшего за ней землетрясения 31 октября. Используются полученные по сети ИНТЕРНЕТ часовые данные атмосферного давления Ратм на 2-х метеостанциях: в районах Токио [35.56 с.ш.–139.77 в.д.] и Осака [34.78 с.ш.–135.40 в.д.]. Их вариации в интервале 22 октября–9 ноября представлены на рис. 6 в сопоставлении с деформациями  $dif$  на сейсмической станции МАЮ и изменениями  $Kp$ -индексов при буре. Видно, что большие значения  $Kp$ , участки импульсов отрицательной полярности  $dif$  и момент землетрясения явно не отражались в вариациях Ратм.

Кроме представленного на рис. 3 сопоставления геомагнитных и деформационных параметров при землетрясении 31.10.2003 г. мы имели возможность исследовать этот процесс и при 2-х других ВМБЗ в окрестности Японии: 06.10.2000 г. и 19.01.2005 г., когда сейсмическая станция МАЮ работала без пропусков и помех. Была выполнена обработка записей станции и характеристик магнитных бурь точно таким же образом, как это описано выше и представлено на рис. 3. Рисунок 7 демонстрирует результаты во время бури 05.10.2000 г. (табл. 1 и табл. 2). Сопоставляя рис. 3 и рис. 7, можно указать на следующие сходства и различия. В обоих случаях землетрясения произошли через несколько часов после резкого уменьшения интенсивности бури по уровню  $Kp$ -индексов и падения напряженности магнитного поля  $Hx$ . Но изменение во время бури 05.10.2000 г. деформации  $dif$  по сейсмическому каналу (рис. 7, график 4) неочевидно. Менее выразительные вариации деформаций, возможно, связаны с двумя свойствами бури 05.10.2000 г.: постепенным нарастанием уровня  $Kp$  на протяжении нескольких суток и меньшей силой бури, максимальные значения  $Kp$ -индексов в которой достигали  $Kp = 8$ , в то время как во время бури 29–31.10.2003 г. (рис. 3) они имели высшую в принятой системе оценок величину  $Kp = 9$ . Это же проявляется в меньшей

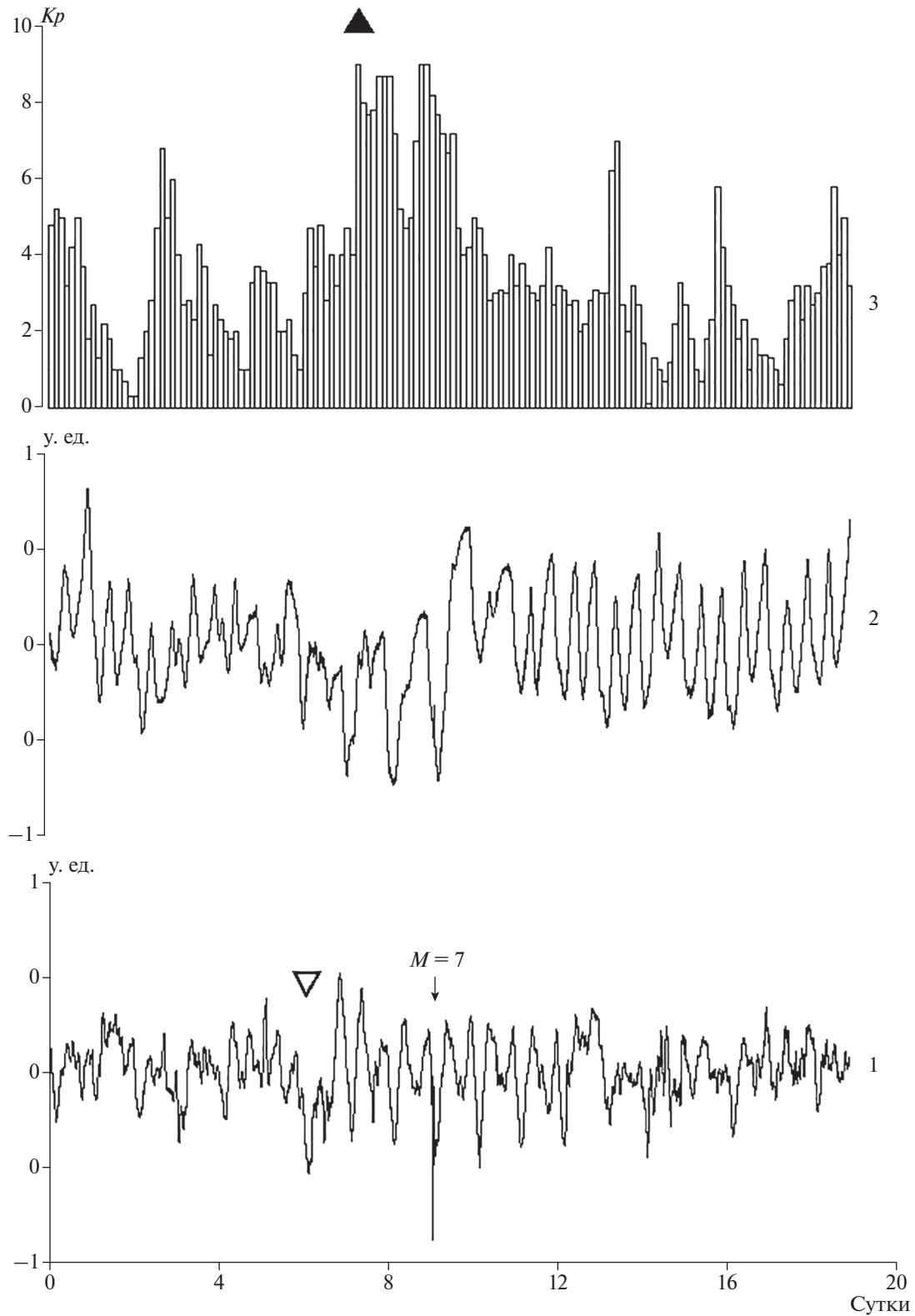


**Рис. 3.** Сопоставление геомагнитных и деформационных параметров при буре 29–31.10.2003 г.:  $D$  – прилив;  $dD$  – скорость изменения прилива;  $dS$  – скорость перемещения грунта на станции МАЮ;  $dif = dS - dD$ ;  $Kp$  – величина планетарных  $Kp$ -индексов;  $Hx$  – напряженность магнитного поля на обсерватории Kakioka.

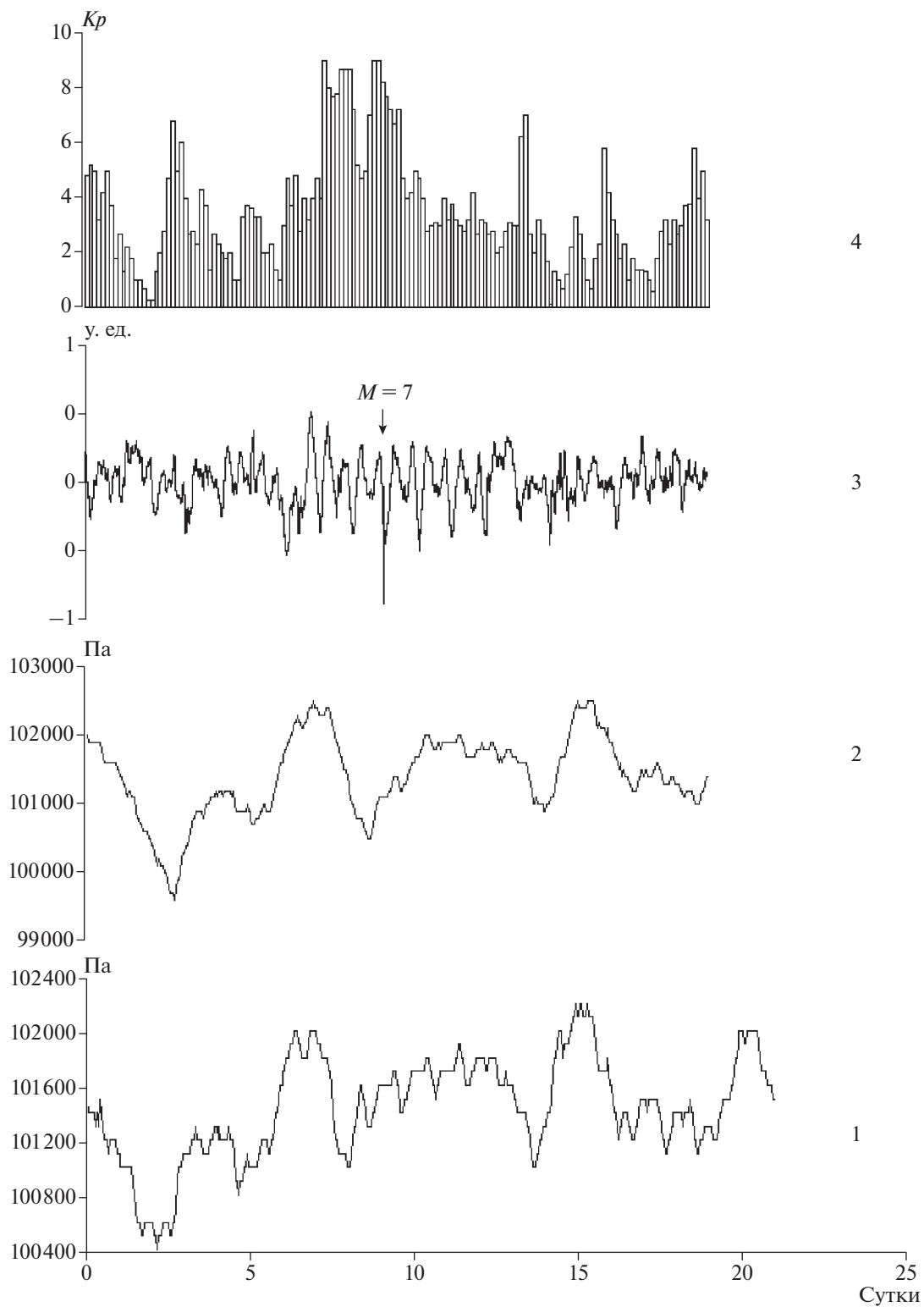




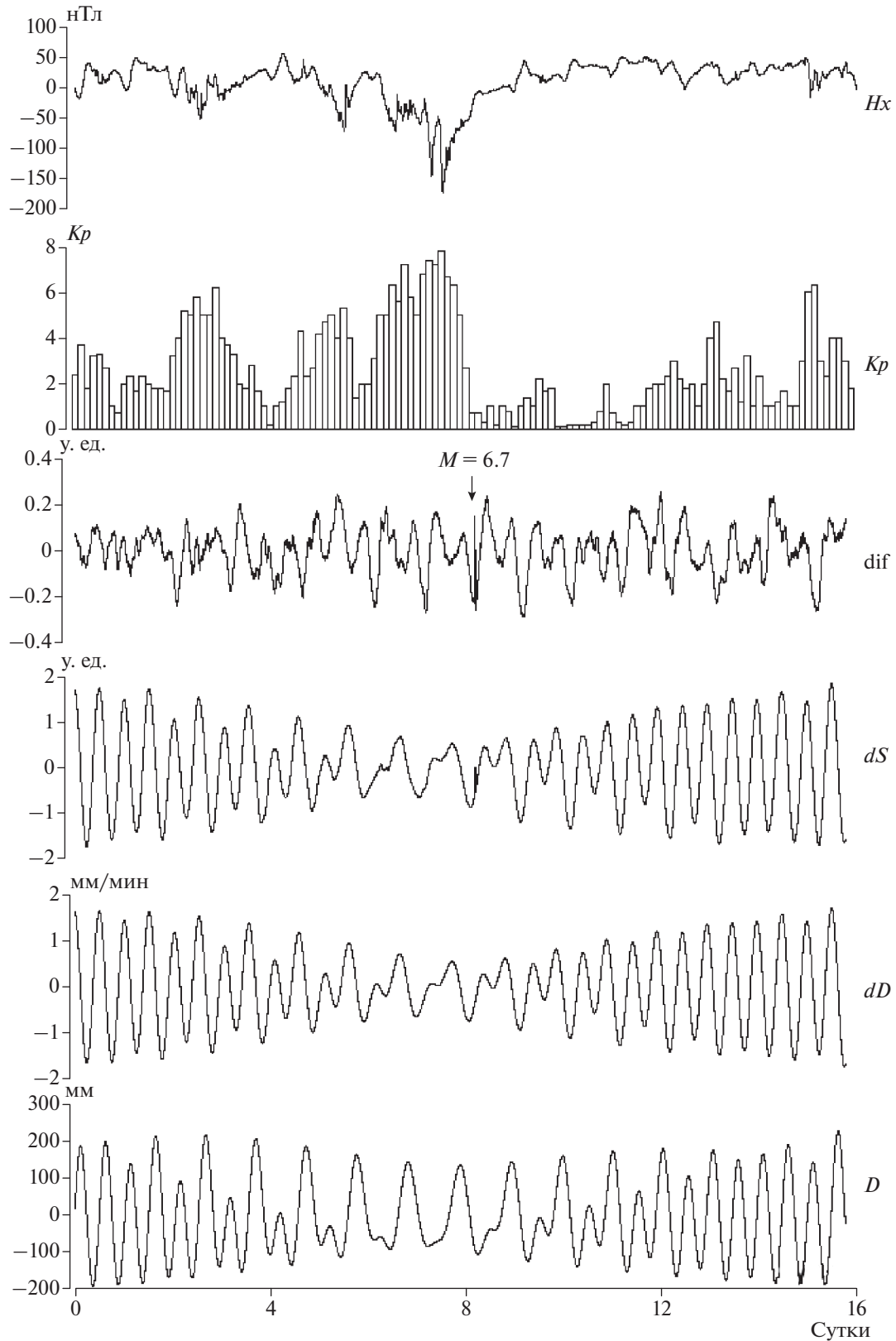
**Рис. 4.** Сопоставление геомагнитных и деформационных параметров при буре 29–31.10.2003 г.:  $D$  – прилив;  $dD$  – скорость изменения прилива;  $dS$  – скорость перемещения грунта на станции MDJ;  $\text{dif} = dS - dD$ ;  $Kp$  – величина планетарных  $Kp$ -индексов;  $Hx$  – напряженность магнитного поля на обсерватории Memambetsu.



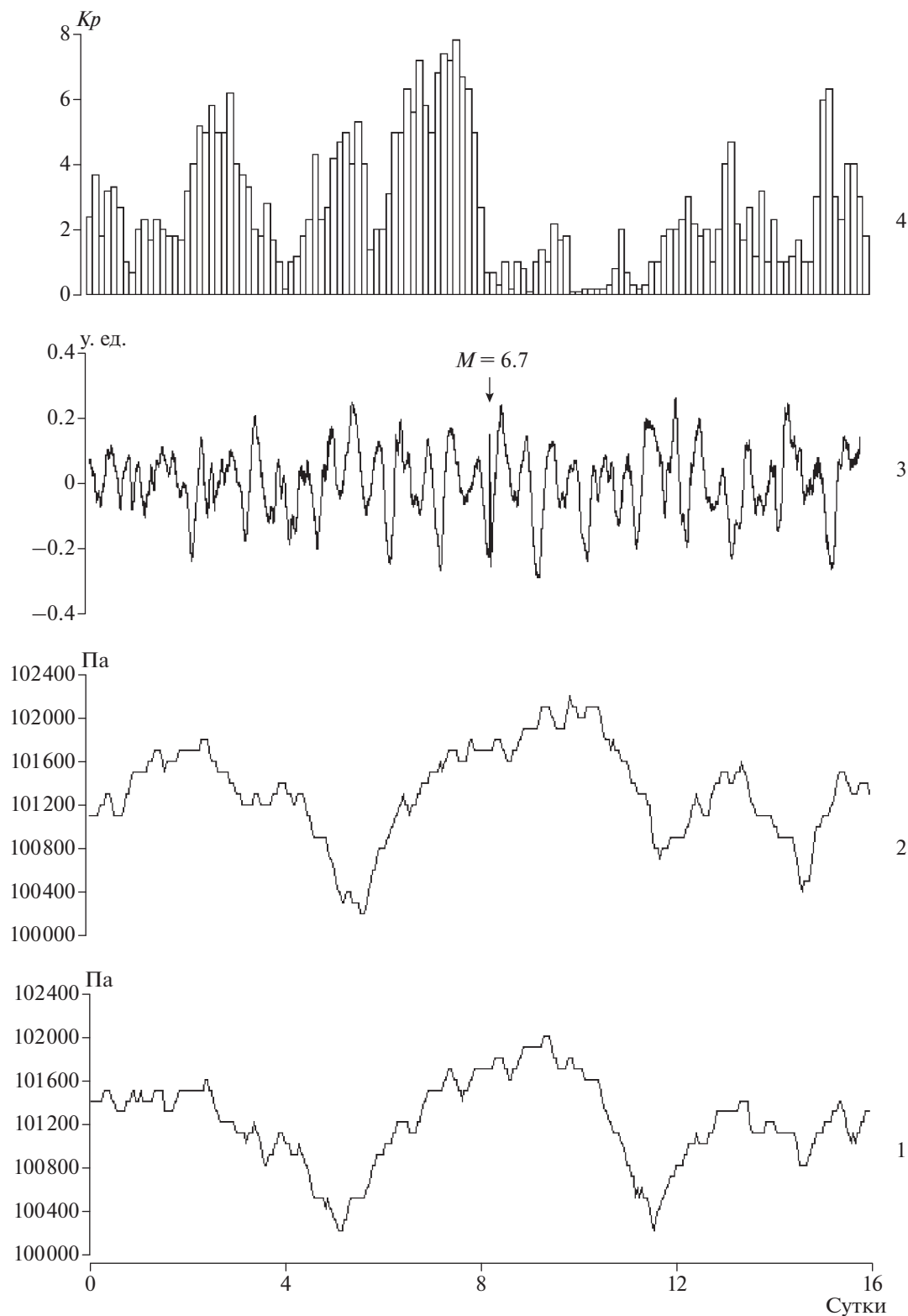
**Рис. 5.** Сравнение неприливных деформаций dif на станциях МАЖО (1) и МДЖ (2) во время бури 29–31.10.2003 г. График 3 – планетарные  $K_p$ -индексы.



**Рис. 6.** Сопоставление неприливных вариаций dif (3) с изменениями атмосферного давления на метеостанциях Осака (1) и Токио (2) во время бури 29–31.10.2003 г. График 4 – планетарные  $Kp$ -индексы.



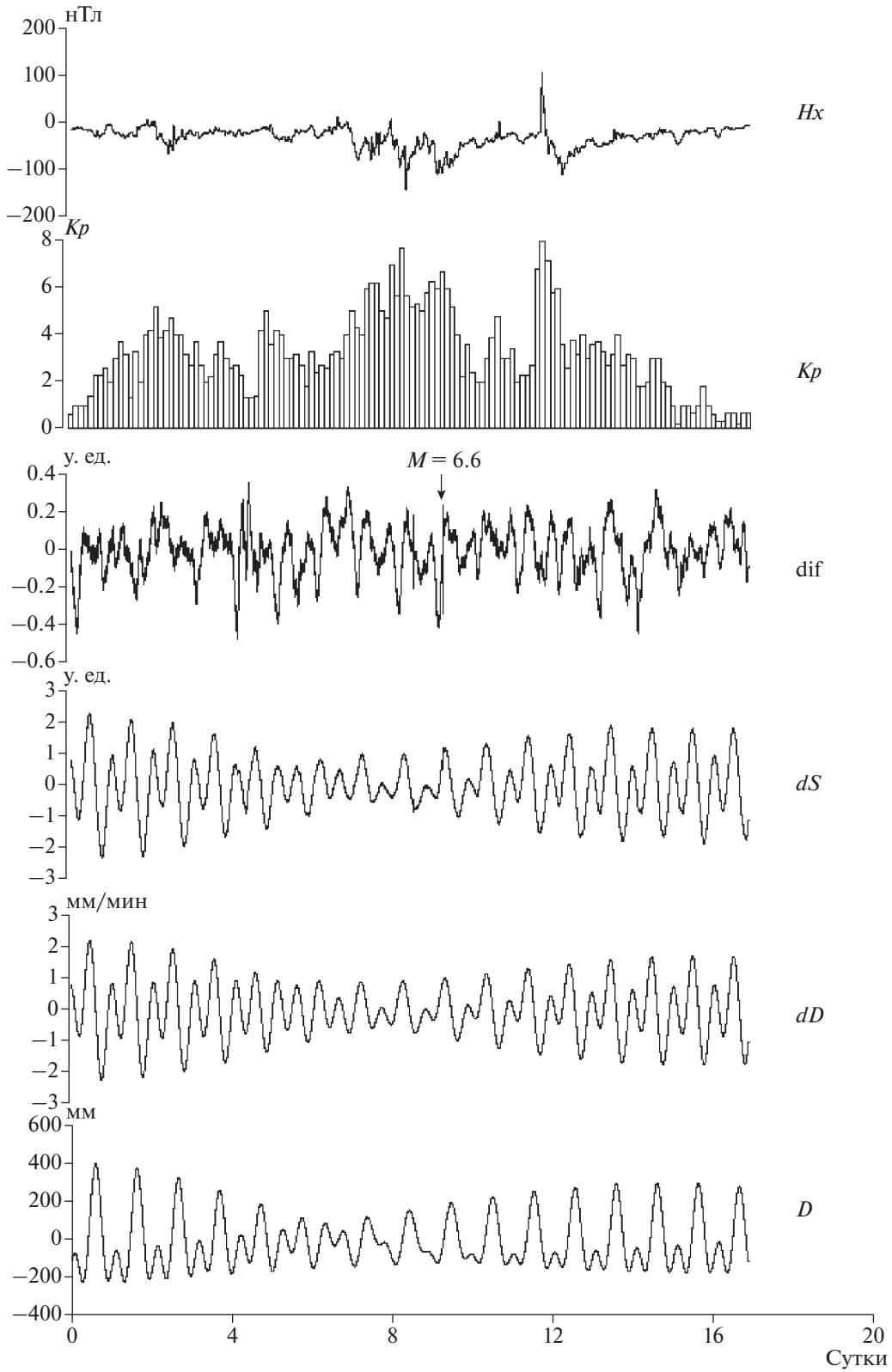
**Рис. 7.** Сопоставление геомагнитных и деформационных параметров при буре 05.10.2000 г.:  $D$  – прилив;  $dD$  – скорость изменения прилива;  $dS$  – скорость перемещения грунта на станции МАЮ;  $dif = dS - dD$ ,  $Kp$  – величина планетарных  $Kp$ -индексов;  $Hx$  – напряженность магнитного поля на обсерватории Какиока.



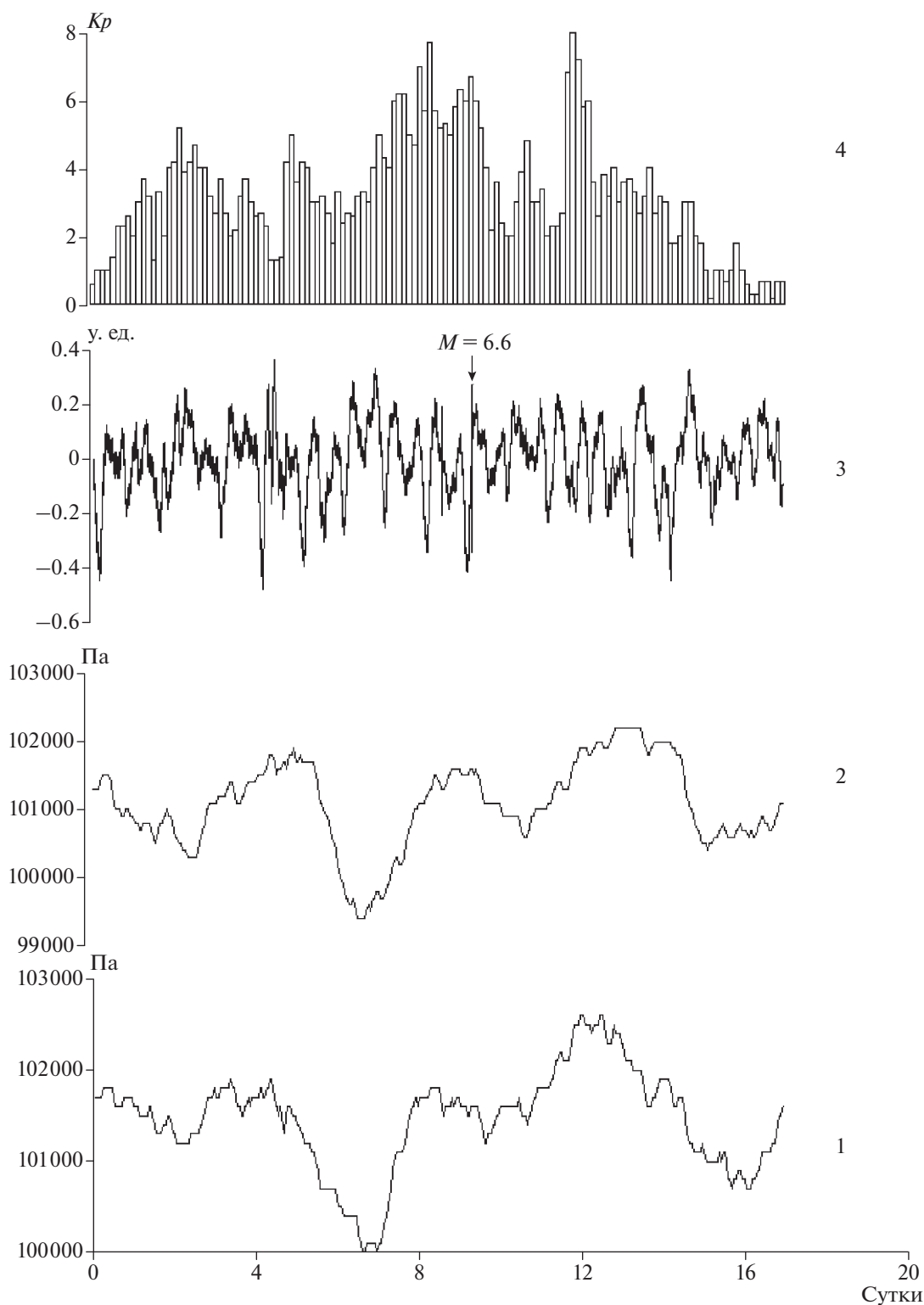
**Рис. 8.** Сопоставление неприливных вариаций dif (3) с изменениями атмосферного давления на метеостанциях Осака (1) и Токио (2) во время бури 05.10.2000 г. График 4 – планетарные  $K_p$ -индексы.

амплитуде возмущения магнитного поля  $A_p$  (табл. 1) и на графике  $H_x$ , рис. 7 (175 нТл). Заметим, что изменения погоды по данным близких к МАЖО ме-

теостанциям Токио и Осака никак не сказались на деформациях, что следует из рис. 8. Здесь также видно, что всплески  $K_p$ -индексов (график 4)



**Рис. 9.** Сопоставление геомагнитных и деформационных параметров при буре 19.01.2005 г.:  $D$  – прилив;  $dD$  – скорость изменения прилива;  $dS$  – скорость перемещения грунта на станции МАЮ;  $dif = dS - dD$ ;  $Kp$  – величина планетарных  $Kp$ -индексов;  $Hx$  – напряженность магнитного поля на обсерватории Кикиока.



**Рис. 10.** Сопоставление неприливных вариаций dif (3) с изменениями атмосферного давления на метеостанциях Осака (1) и Токио (2) во время бури 19.01.2005 г. График 4 – планетарные  $Kp$ -индексы.

не отразились в вариациях атмосферного давления  $P_{\text{атм}}$ .

Сопоставление геомагнитных параметров и деформаций во время бури 19.01.2005 г. представле-

но на рис. 9. Землетрясение 19.01.2005 г. ( $M = 6.6$ ) совпало с одним из пиков интенсивности бури ( $Kp = 6.7$ ). Явных изменений в уровне деформаций на станции МАЮ (график 4) не проявлено.

Возможно, это связано с тем, что интенсивность данной бури ( $A_p = 84$ ) и падение напряженности магнитного поля  $H_x \approx 130$  нТл (график 6) были значительно ниже по сравнению с бурей 29–31.10.2003 г. (рис. 3). Размах колебаний параметра  $dif$  (график 4) на всем исследованном интервале составлял  $\approx +/ - 1$  у. ед., что только в 2 раза меньше изменения скорости прилива  $dD$  (график 2). Если и были во время данной бури изменения деформаций, то они лежали за пределами реальной разрешающей способности использованного нами метода сопоставления записей сейсмического канала с теоретическим приливом. На рис. 10 деформации во время этой бури сопоставлены с вариациями атмосферного давления на метеостанциях Токио и Осака. Можно сделать вывод, что импульсы  $dif$  отрицательной полярности, в том числе перед землетрясением, не вызваны изменениями  $P_{атм}$ . Так же, как и в двух других исследованных случаях (рис. 6, рис. 8), магнитная буря не привела к изменениям атмосферного давления.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено сопоставление произошедших в интервале 1994–2017 гг. 50-ти сильнейших магнитных бурь и всех 935 землетрясений мира с  $M_w \geq 6.5$ . Установлено со степенью значимости  $>0.95$  статистически неслучайное возникновение 17-ти землетрясений в течение 2-х сут после бурь. Эти землетрясения характеризовались разной глубиной гипоцентров и механизмами очагов.

Выяснено, что вызванные бурями землетрясения происходили в восточном полушарии Земли – Япония, Индонезия, Филиппины – и отсутствовали в западном полушарии – Америка. Одной из причин может быть более высокая степень неустойчивости литосферы восточного полушария, о чем свидетельствует появление 2-х мега землетрясений с магнитудами 9: 26.12.2004 г. на Суматре и 11.03.2011 г. возле Японии. Не исключена также разница в геологическом строении. Ситуация может измениться в будущем. Пока за 2 прошедших года до нынешнего времени (февраль 2020 г.) не возникало новых мощных бурь с планетарными  $Kp$ -индексами  $\geq 8$ , кроме учтенных в нашем анализе (табл. 1).

При трех вызванных бурями землетрясениях вблизи Японии исследованы движения земной поверхности по записям ближайшей широкополосной сейсмической станции МАЮ. Вычислены отклонения от теоретических земных приливов. Сильнейшая из магнитных бурь 29–31.10.2003 г. с неоднократными значениями планетарных  $Kp$ -индексов = 9 сопровождалась изменениями скорости непривливых вертикальных движений  $\approx 0.5$  мм/мин, что составляло  $\approx 25\%$  от приливных колебаний. Эти движения возникли за сутки до начальной фазы бури и продолжались после нее в

течение 3-х сут. Землетрясение с  $M = 7$  произошло на максимуме  $Kp$ -индексов бури и через 4 ч после максимума вертикальных движений на станции. Аналогичные движения отмечены и для удаленной на 1200 км станции MDJ (азиатский континент), что указывает на их региональное распространение. Остается открытым вопрос о том, были ли эти движения триггером землетрясения 31.10.2003 г. При двух других землетрясениях вблизи Японии, возникших после бурь меньшей мощности с  $Kp \leq 8$ , аналогичных деформационных движений не выявлено.

Сопоставление с данными близ расположенных метеостанций показало, что во всех случаях не было аномальных вариаций атмосферного давления. Это, по-видимому, позволяет исключить следующую причину триггерного воздействия бури на последовавшие сильные землетрясения: изменение структуры и силы тяжести облачного покрова. Из полученных результатов (рис. 3, рис. 5) следует, что площадь вызванных бурей деформаций земной поверхности измерялась, по крайней мере, тысячами километров и длительность аномальных измерений – часами. Если источник преобразования электромагнитной энергии в упругую находится в твердой Земле, то существенную роль играет глубина проникновения в литосферу вызванных бурей э. м. колебаний. Она оценивается величиной скин-эффекта  $Z$ , на котором амплитуда колебаний убывает в  $e$  раз.  $Z = (2/\omega\mu\sigma)^{1/2}$ , где:  $\omega = 2\pi/T$ ,  $T$  – период колебаний;  $\mu$  – магнитная проницаемость;  $\sigma$  – электропроводность. При значениях удельного электрического сопротивления верхнего слоя литосферы  $\rho = 1/\sigma = 10^3 - 10^4$  Ом · м глубина проникновения плоской электромагнитной волны на периодах в несколько часов составляет десятки км. На таких глубинах под континентами существует гранитный слой; под океанами верхние горизонты включают водонасыщенные породы. Таким образом, не исключаются механизмы преобразования энергии электромагнитного поля в упругую за счет пьезо- и сейсмoeлектрических эффектов.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа поддержана грантом РФФИ № 18-05-00026.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авагимов А.А., Зейгарник В.А.* Оценка энергии триггерного воздействия в процессе разрушения модельного образца // Физика Земли. 2008. № 1. С. 77–80.
- Барсуков О.М.* Солнечные вспышки, внезапные начала и землетрясения // Физика Земли. 1991. № 12. С. 93–97.
- Закржевская Н.А., Соболев Г.А.* Влияние магнитных бурь с внезапным началом на сейсмичность в различ-



- ных регионах // Вулканоология и сейсмология. 2004. № 3. С. 63–75.
- Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М. Наука. 2007. С. 228.
- Мельхиор П. Земные приливы. М.: Мир. 1968. 454 с.
- 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. Концепция предсказуемости землетрясений на основе динамики сейсмичности при триггерном воздействии. М. ИФЗ РАН. 2011. С. 56.
- Соболев Г.А., Закржевская Н.А. Локальные тектонические деформации и близкие по месту и времени землетрясения // Вулканоология и сейсмология. 2020. № 3. С. 1–9.
- Тарасов Н.Т. О влиянии солнечной активности на сейсмичность Земли. В книге: “Триггерные эффекты в геосистемах”. Материалы IV Всероссийской конференции с международным участием / В.В. Адушкин, Г.Г. Кочарян. М.: ГЕОС. 2017. С. 356–365.
- Тарасов Н.Т. Влияние солнечной активности на сейсмичность Земли // Инженерная физика. 2019. № 6. С. 23–33.
- Hardle W. Applied nonparametric regression. Cambridge University Press, Cambridge, New York, New Rochell, Melbourne, Sydney. 1989. (Русский перевод: Хардле В. Прикладная непараметрическая регрессия. М.: Мир. 1993. 349 с.)
- Rabeh T., Miranda M., Milan H. Strong Earthquakes Associated with High Amplitude Daily Geomagnetic Variations // Natural Hazards. 2010. V. 53. P. 561–574. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9449-1>
- Smelyanskiy V.N., Dykman M.I., Golding B. Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. № 16. 3193–3197.
- Sobolev G.A. Seismicity dynamics and earthquake predictability // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2011. V. 11. P. 1–14.
- Urata N., Duma G., Freund F. Geomagnetic Kp Index and Earthquakes // Open J. Earthquake Research. 2018. V. 7. P. 39–52. <https://doi.org/10.4236/ojer.2018.71003>
- Wenzel G. Program PETGTAB. Version 3.01. 1999. University Hannover.
- Wieland E., Streckeisen G. The leaf-spring seismometer – design and performance // Bull. Seismol. Soc. Amer. 1982. V. 72. P. 2349–2367.

## The Effect of Strong Magnetic Storms on the Occurrence of Large Earthquakes

G. A. Sobolev\*

*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

*\*e-mail: sobolev@ifz.ru*

The times of occurrence of the earthquakes with magnitudes  $M \geq 6.5$  all over the world are compared to the commencement times of the strongest magnetic storms with the planetary  $Kp$ -indices above 7. In the interval from 1994 to 2017, 17 earthquakes occurred within two days after 50 storms, which corresponded to their non-random occurrence with a probability above 95%. These earthquakes took place in the eastern hemisphere and were absent in the western hemisphere. The strongest storm was accompanied by the emergence of non-tidal movements of the Earth's surface recorded by the broadband seismic stations.

*Keywords:* earthquake, deformation, seismic station, magnetic storm, weather station